

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté de Foresterie et de Géomatique
Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

Mémoire présenté en audience publique
tenue par le
BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT

Programme de dégagement de la régénération forestière par le
Ministère des Ressources naturelles

*«La régie des écosystèmes forestiers par le sol et
les mécanismes qui y
président»*

par le
Professeur Gilles Lemieux

en collaboration avec
André Couillard Ing. F.
Valentin Furlan biologiste
Lionel Lachance Agronome
R. Alban Lapointe Ing. F.
Louis Larochelle Agronome
André Létourneau Ing. F.

Publication n° 70

1997
Université Laval
Département des Sciences du Bois et de la Forêt
Québec G1K 7P4
QUÉBEC Canada

AVANT-PROPOS

Nous avons collectivement souscrit à la présentation de ce mémoire dans le cadre de la problématique soulevée par les présentes audiences publiques sur la question forestière. Il a pour but de toucher les fondements biologiques de la forêt à la suite d'expérimentations, tant au Québec que dans divers pays.

Ce mémoire a pour but non seulement d'apporter des solutions théoriques mais également de proposer des techniques qui ont pour but de modifier la dégradation des forêts productives vers un processus d'aggradation où les stades traditionnels de reconstruction peuvent être accélérés par la fragmentation des rameaux destinés à la reconstruction du sol et de sa fertilité.

Nous désirons souligner la possibilité de susciter une régénération de meilleure qualité dans des temps plus courts en évitant plusieurs inconvénients traditionnels que sont certains insectes et l'incendie forestier. Ce dernier exporte en fumée le fruit d'un siècle et plus d'efforts biologiques de l'écosystème forestier pour se constituer un capital basé sur la biodiversité et la cumulation de nutriments échangeables biologiquement, et se construire une métastabilité obligatoire à tout groupement biologique, aussi bien végétal qu'animal.

Nous pensons pouvoir ainsi infléchir l'habitude que nous avons de nous rallier à des processus agricoles, basés sur la mécanique et la chimie pour «cultiver» une forêt en assumant uniquement la plantation en peuplements artificiels: c'est sans en assurer pour autant les soins que nécessite toute opération agricole jusqu'à la récolte pour des raisons économiques évidentes.

Nous espérons vivement que ces propos seront entendus, discutés et que les mécanismes et techniques que nous proposons seront évalués par rapport à la tradition qui date de plusieurs siècles et qui, jusqu'ici, n'a pas été remise en cause.

Table des matières

	page
<u>1-Introduction</u>	1
1.1 Une expérience inusitée, d'abord agricole	2
1.2 L'expérimentation forestière	3
2- Les critères d'évaluation	4
2.1 Le pH et l'accessibilité aux nutriments	5
2.2 L'exemple de l'épinette blanche	7
2.3 Des remarques sur le comportement de l'épinette blanche dans les parcelles témoin	7
2.4 Le sapin baumier l'instabilité de la survie des plantules et le peu de réceptivité des parcelles	9
2.5 Les feuillus engendrent les feuillus	10
2.6 La perméabilité des parcelles	12
3- Les premières déductions et commentaires	12
3.1 Nous sommes des prisonniers intellectuels du productivisme	13
3.2 La pédogénèse un ensemble de mécanismes universels d'abord d'origine forestière	14
3.3 L'universalisme de la pédogénèse nous convie sous les tropiques	15
4- La composition organique du bois et son apport à la métastabilité par la voie de la pédogénèse	15
4.1 Une première liaison avec la genèse des sols	17
4.2 Une estimation des volumes de BRF produits: certainement des milliards de tonnes annuellement	17
4.3 Les dérivés de la lignine: polyphénols, acides aliphatiques, terpènes, les bases mêmes de la formation des sols et de leur dynamique	19
4.4 La connaissance de la lignine et de la pédogénèse se manifeste par l'étude des phénomènes de décomposition et de dégradation	19
5- «Matière organique» un terme sans concept ni définition possible	20
5.1 Les premières références à l'humification	20
5.2 L'évolution de la compréhension actuelle	21
5.3 Décomposition et dégradation: une évocation par la négative	21
5.4 La notion de bois raméal une ouverture vers de nouvelles connaissances sur la pédogénèse	22
5.5 La régie chimique et biologique des nutriments	22
5.6 Les raisonnements que nous suggère la logique	23
5.7 La logique de la fragmentation	23
6- L'association nutriments et énergie= nourriture	24
6.1 Les différences entre le compostage et la pédogénèse	24
6.2 Les principes qui sous-tendent la nécessité de la fragmentation	25
6.3 La production des fractions fulviques et humiques	25
6.4 La «matière organique» dans l'optique d'une fertilité agricole annuelle sans signification forestière	27
6.5 Une approche univoque: la translocation des nutriments	27
6.6 Les lignines et les polyphénols	28
6.7 Les blocages polyphénoliques et la biologie de la régulation	29
6.8 La définition des nutriments	29
6.9 L'eau	30
6.10 L'azote	31
6.10.1 La fixation non symbiotique: N ₂	31
6.10.2 L'azote disponible : à repenser pour en faire un bilan dynamique	32
6.10.3 Le phosphore et les phosphatases	32
7- La biologie tellurienne s'impose par les voies historiques de l'adaptation	33
7.1 Quelques lumières sur la dynamique de la biologie tellurienne	34

7.2 Le comportement des écosystèmes forestiers et la génération différentielle des sols	34
7.3 L'énergie au centre de nos théories plutôt que les nutriments	36
7.4 Les arbres dirigent les quatre cinquièmes de leur production énergétique vers le sol	36
7.5 L'apport énergétique de l'écosystème épigé: la base de la vie tellurienne	37
7.6 Les sources de lignine peu polymérisée: les racines et les rameaux	37
8- Un début de compréhension des résultats observés par la voie expérimentale	38
8.1 La forme des arbres: une brève histoire de l'évolution	38
8.2 La pédogénèse en forêt de Gymnospermes	40
9- Quelques réflexions sur le bois raméal	41
9.1 Une définition de la fertilité	41
9.2 Quelques nuances sur l'impact des biotechnologies	42
10- Les pratiques de la foresterie moderne	42
10.1 Logique forestière contre logique agricole	42
10.2 De retour aux techniques d'exploitation	43
10.3 La distinction nécessaire entre bois de tronc et bois de rameaux	44
10.4 La place des Basidiomycètes	45
10.5 Le cycle du carbone	45
10.6 La perception des biosurplus	46
10.7 Sauvegarder un «héritage» durement acquis	46
10.8 Le rôle des mycorhizes	47
10.9 Que faire des bois de tronc	48
10.10 Lignine et manganèse	48
10.11 Les modes et les temps de la fragmentation	49
10.12 Ce qu'il faut attendre des conifères et des feuillus fragmentés	49
10.13 L'énergie concentrée dans les sols des forêts feuillues	49
10.14 Les objections économiques et logistiques en perte de vitesse	50
11- <u>Quelques recommandations</u>	51
11.1 L'expérimentation technique sur le milieu forestier	52
11.2 L'expérimentation scientifique: Le monde fongique	53
11.3 La mésofaune et la microfaune	53
11.4 Les bilans phosphorés et azotés	53
11.5 Lignines et polyphénols	54
12- Un rapprochement nécessaire avec l'industrie des pâtes et papiers	55
12.1 La science fondamentale	55
13- Une implication de nos institutions de haut-savoir à l'échelle internationale	55
13.1 De la philosophie à la physique	55
Glossaire	57
Bibliographie	59

Le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

HISTORIQUE

L'attention portée au bois raméal est due à l'initiative de hauts fonctionnaires des Ministères des Forêts ainsi que de l'Agriculture et de l'Alimentation à la fin de la décennie des années '70 dans le but de mettre en valeur les résidus industriels de l'entraînement à la valeur des huiles essentielles de conifères. Les premiers essais furent faits entre 1979 et 1982 dans la région de Québec pour des fins agricoles; lutte à la sécheresse et au manque de matière organique avec la collaboration d'Hydro-Québec. Les premiers résultats, à la fois spectaculaires et inattendus, forcèrent la réflexion et l'expérimentation en agriculture à l'aide de «copeaux de broussailles», le premier terme utilisé qui deviendra plus tard les BRF (Bois Raméal Fragmenté). Le concept d'origine purement agricole évolua rapidement vers une utilisation environnementale dans le cadre des nuisances causées par les lisiers de porc.

À l'automne 1982, avec l'appui du Doyen Bernier de la Faculté de Foresterie de l'Université Laval, les premières expériences forestières furent planifiées avec l'appui logistique du Professeur Marcel Goulet† et établies dès le printemps 1983. Les premiers résultats, portant sur la régénération, furent publiés lors d'un colloque en 1985. En 1986, avec l'appui du Doyen de la Faculté de Foresterie, le Dr André Plamondon, nous mettions sur pied le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux dont le but était l'expérimentation et la promotion des bois raméaux au Québec et dans le monde. C'est à cette époque que les concepts premiers montrèrent une évolution, les copeaux étant devenus des BRF dont les effets positifs étaient perceptibles aussi bien du point de vue agricole que forestier. Par la suite nous avons passé du concept d'amendement organique à celui de l'instigateur de la pédogénèse tant agricole qu'e forestière.

La décennie suivante à vu de nombreuses publications et colloques dont le dernier d'envergure internationale. La collaboration s'est intensifiée avec l'industrie jusqu'en 1992 alors que les difficultés financières de cette dernière la força à nous abandonner à notre sort (REXFOR). Dans les mêmes temps, nous procédions sur le plan international avec de nombreuses missions et conférences en Europe (Allemagne, Belgique, France, Portugal). Dès 1992, nous entreprenions nos premiers travaux sous les tropiques grâce à l'appui de l'ACDI au Sénégal. En 1994, ce furent les premiers travaux dans les Antilles (République Dominicaine). En 1995, l'ACDI nous invita à nous adresser aux membres du Club du Sahel composé des 12 pays responsables du financement du développement du Sahel en Afrique occidentale. En 1996 nous étions invités par le CRDI (Centre de Recherche en Développement International) à donner un séminaire sur la question à l'ICRAF (International Center for Research in Agroforestry) de Nairobi au Kenya et l'Académie des Sciences Agricoles d'Ukraine à Kiev où nous avons maintenant un important projet agroforestier soutenu financièrement par le CRDI; donc par le gouvernement canadien. À la demande du gouvernement de la Colombie Britannique, nous venons de rédiger un traité sur la question forestière depuis les mécanismes pédogénétiques qui, à notre connaissance, est le premier essai de synthèse basé sur des techniques mises à l'essai avec des références de base provenant de la littérature scientifiques .

Enfin, mentionnons qu'en plus d'avoir donné conférences et colloques au Québec, dans les Antilles en Afrique et en Europe nous avons plus de 80 publications diverses traitant à la fois de la question forestière, de la question agricole et de l'aspect scientifique de la pédogénèse.

La régie des écosystèmes forestiers par le sol et les mécanismes qui y président.

1- INTRODUCTION

1 • L'ensemble des raisonnements et des déductions logiques suivants, ne peuvent être interprétés et évalués sans faire référence à l'"aventure" qu'il nous a fallu vivre durant deux décennies. Toujours sceptique et souvent hostile, l'appui qui nous a été réservé tout au long de ces travaux nous a interdit, à toute fin pratique, l'accès au financement à tous les niveaux. Le secteur forestier nous a, le plus souvent, renvoyé au secteur agricole et inversement. Ceci nous a valu une grande liberté d'expérimentation et maintenant une grande liberté d'expression.

2 • Nous avons également pu évaluer combien la pensée était devenue pauvre au sein des sciences biologiques et particulièrement dans celles de la foresterie et de l'agriculture. Il nous est rapidement apparu que les idées étaient disparues au profit des données: c'est le conflit de la science et de la technique, souvent traduit par l'utilisation du terme *technologie*.

3 • Plusieurs autres caractéristiques nous ont étonnés au regard de nos découvertes, comme la signification des termes et leur origine qui bloquent l'évolution de la connaissance fondamentale. Ainsi, bien que les mécanismes de la pédogénèse soient d'origine forestière, ils sont décrits ou ignorés dans un vocabulaire tout à fait agricole. Alors que nous devrions, depuis longtemps, avoir mis au point des techniques propres à la régénération forestière, c'est, dans la plupart des cas, une copie ou un plagiat des données, us et coutumes agricoles. Inversement, aucune référence n'est faite à la forêt dans la conception et la connaissance du sol agricole, mais uniquement des références chimiques ou pathologiques. Dans les deux cas, la pédologie nous est apparue comme uniquement descriptive, pis encore, basée seulement sur des données physiques et chimiques alors que la réalité est toute autre, sans exclure la chimie et la physique; bien au contraire.

4 • Nous espérons donc que les lecteurs seront sensibles à l'histoire agro-forestière du sol et seront à même de réfléchir sur son importance et de porter jugement sur les raisons de sa méconnaissance, si ce n'est que par la voie descriptive.

1.1- Une expérience inusitée, d'abord agricole.

5 • Pour bien comprendre le dédale des raisonnements et des hypothèses qui sont l'objet de cet exposé, il faut se rapporter à la fin des années '70, alors que trois chercheurs se lancèrent dans la mise en valeur des milliers de tonnes de résidus appelés «drêches» qui s'accumulaient auprès des usines de distillation par entraînement à la vapeur des huiles essentielles. Ces résidus industriels étaient constitués uniquement de rameaux de conifères (*sapin baumier* et *Thuja*), préalablement fragmentés et pour lesquels il n'y avait aucune utilisation. C'est alors que les chercheurs eurent l'idée d'utiliser ces résidus industriels pour en faire un paillis dans la culture de la pomme de terre, puis du blé, de l'avoine, des fraises etc. Ce faisant, ils eurent la curiosité de faire l'analyse du contenu de ces drêches pour s'apercevoir qu'elles étaient d'une richesse très importante du point vue chimique et biochimique. Par la suite, des essais montrèrent que les rameaux fragmentés de conifères ou de feuillus appliqués au sol avaient des effets différents portant sur plusieurs années.

6 • La technique mise de l'avant par ces auteurs est un compromis entre le «sheet composting» des Américains et le compost de broussailles des Français. Ainsi, les rameaux de moins de 7 cm. sont fragmentés en copeaux de quelques centimètres et épandus sur le sol, au taux de 200 m³/ha ou 2 cm d'épaisseur avec lequel ils sont mélangés sur les 10 premiers centimètres. Les résultats obtenus furent multiples et se sont répercutés sur plusieurs années.

7 • C'est en me demandant pourquoi ils avaient ces différences et ces rendements que Guay, Lachance et Lapointe me posèrent un véritable défi auquel je ne puis me soustraire. À mon grand

étonnement, je ne puis relever aucun article sur cette importante source de production végétale que sont les rameaux des arbres dont j'estimais alors la production mondiale à quelques milliards de tonnes annuellement. Dès 1985, lors d'une première publication importante, je proposais le nom de «bois raméal» ou **BRF** (**Bois Raméal Fragmenté**) dont je fis la description l'année suivante.

8 • Les résultats obtenus au point de vue agricole par l'utilisation de ces rameaux fragmentés et appliqués au sol en mélange avec les premiers centimètres de ce dernier, les modifications obtenues dans la structure et la texture du sol, l'évolution de paramètres comme le ratio C/N ou le pH; plus tard, celle du comportement des mauvaises herbes, des insectes et des maladies nous montra, à tous égards, que nous étions en présence d'un phénomène important sur lequel la littérature scientifique était muette.

9 • Toutefois deux importantes publications nous mirent sur des pistes fertiles dont la première de **Leisola, M.S.A., & Garcia, S. (1989)** met en valeur et décrit le rôle des Basidiomycètes dans la dépolymérisation de la lignine par une enzyme, la lignoperoxydase, dépendante du manganèse, produisant les fractions humiques et fulviques avec rétention de la plus grosse molécule sur le mycélium, et empêchant la repolymérisation, en plus donnant des composés aliphatiques.

10 • La seconde publication fut celle de **Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989)** qui apporte beaucoup sur les relations entre le sol (écosystème hypogé) par rapport à la végétation (écosystème épigé). Il faut admettre cependant que ce travail avait pour but de décrire les liens entre les différents niveaux trophiques où les mycorhizes ont un rôle important à jouer.

1.2- L'expérimentation forestière

11 • Si l'expérience acquise en milieux agricoles nous indiqua quelques bonnes pistes de recherche et de réflexion, loin s'en fallut pour que nous comprenions les mécanismes à la base de ces

modifications. Si les rameaux des arbres fragmentés apportent plusieurs modifications sur le sol, les contenus en nutriments, le pH, la qualité et les volumes de récoltes, rien n'est clair ou limpide pour autant. Dès lors, nous avons posé l'hypothèse que les mécanismes en cause pouvaient être d'origine forestière, mais sans que nous puissions les identifier à travers la littérature sous un vocable quelconque. Dès 1983, nous établissions le premier dispositif de recherche qui sera suivi de plusieurs autres en 1984, 1985, 1988 1990 et 1992, sur des sites différents avec des histoires de sites différentes.

12 • Ainsi, nous avons choisi, de concert avec notre collègue, le Dr Marcel Goulet, un site de près d'un hectare, reconnu stérile depuis au moins 50 ans, mais entouré complètement de forêt assurant ainsi une abondance de semences pour la régénération naturelle. De petites parcelles de 2 à 4 m² y furent établies sur lesquelles ont été déposés entre 1,5 et 2 cm d'épaisseur de BRF sous la forme de litière ou en mélange avec les premiers cm. du sol, avec une parcelle témoin en continu au-dessus de chaque rangée.

2- LES CRITÈRES D'ÉVALUATION

13 • Si les critères d'évaluation sont bien connus en agriculture, qu'ils soient basés sur la rentabilité, la productivité, l'état sanitaire des productions, etc. par rapport à la disponibilité *in situ* des nutriments, il en va tout autrement en milieu forestier. Plutôt que de nous perdre en vains efforts, nous avons pris la décision, dès le début, d'étaler nos observations sur une période minimum de 5 ans en mesurant la régénération et l'évolution des flores allochtones et autochtones propres aux peuplements de la région. Cette régénération s'est faite par comptage des plantes apparaissant dans les parcelles durant 5 ans, par opposition aux parcelles témoins qui ne furent mesurées qu'à toutes les deux années. En parallèle, nous avons pris des échantillons de sol en surface les deux dernières années pour tenter une première

évaluation qui montrerait le résultat de la métabolisation des BRF, par rapport au témoin.

14 • Notre travail de 1989 est beaucoup trop long et complexe pour tenter d'en faire la synthèse, mais nous ferons référence le plus souvent possible aux données recueillies alors.

2.1- Le pH et l'accessibilité aux nutriments

15 • A titre d'exemple, (tableau n° 1) regardons l'évolution du pH par rapport aux parcelles témoins de la 4^{ième} à la 7^{ième} année après le traitement aux BRF, pour s'assurer que le tout est bien métabolisé. On note que les valeurs exprimées la 7^{ième} année sont à peu de choses près celles de la première année.

16 • Nous avons choisi de mesurer ce paramètre physico-chimique qui traduit un état d'équilibre entre les ions H^+ et OH^- qui, à leur tour, sont responsables de nombreuses mises en disponibilité de nutriments ou de blocage de ceux-ci comme dans le cas du phosphore.

17 • Les autres paramètres étaient directement liés aux résultats biologiques puisque le but de cette expérience était de trouver un moyen d'évaluer ce que nous estimions être la fin pratique et ultime: la reconstitution de l'écosystème forestier. La mesure de la régénération, dans le temps et dans l'espace à partir d'un site en milieu forestier, nous a semblé l'unique manière d'obvier à la panoplie des mesures de nutriments chimiques sous des formes quantitatives dont la rationalité forestière nous a toujours semblée des plus douteuses.

18 • Ainsi, le bois des tiges chez les arbres est fonction de l'activité de la photosynthèse sise dans la cime. Dans cette perspective, le bois est le résultat d'un excès de production, non pas de la production directe puisque, comme le souligne certains

auteurs, la majorité de la production énergétique des arbres est dirigée vers l'écosystème hypogé.

Évolution du pH après quatre années de métabolisation des BRF dans le sol par rapport à la parcelle témoin

Parcelles BRF	témoins	'87	'88	'89	'90
<i>résineux</i>					
<i>Larix laricina</i>	4,0	5,3	5,1	5,0	4,7
<i>Pinus resinosa</i>	5,1	5,5	5,6	5,2	4,7
<i>Pinus strobus</i>	5,1	5,8	5,7	5,6	5,5
<i>Thuja occidentalis</i>	5,1	6,0	6,5	6,0	5,3
<i>feuillus de transition</i>					
<i>Acer rubrum</i>	5,1	5,3	5,2	5,2	4,9
<i>Acer spicatum</i>	5,0	5,5	5,4	5,1	4,8
<i>Alnus rugosa</i>	5,0	5,5	5,3	5,1	4,6
<i>Amelanchier bartramiana</i>	4,9	5,8	6,1	5,3	5,4
<i>Betula populifolia</i>	5,1	5,8	5,7	5,4	5,1
<i>Cornus rugosa</i>	5,1	5,5	5,4	5,3	5,0
<i>Populus balsamifera</i>	5,3	5,7	5,9	5,6	5,2
<i>Populus grandidentata</i>	4,9	6,1	6,5	5,7	5,6
<i>Populus tremuloides</i>	5,0	5,9	6,2	5,4	5,3
<i>Prunus pensylvanica</i>	4,9	5,5	5,5	5,2	5,1
<i>Salix bebbiana</i>	5,0	5,7	5,6	5,3	5,1
<i>Salix lucida</i>	5,1	5,2	5,5	5,1	4,9
<i>Sambucus pubens</i>	5,0	5,2	5,6	5,0	4,9
<i>feuillus climaciques</i>					
<i>Betula alleghaniensis</i>	5,0	5,1	5,1	5,0	4,8
<i>Carpinus caroliniana</i>	5,0	6,0	5,7	5,3	5,2
<i>Fraxinus americana</i>	4,9	5,5	5,7	5,0	4,9
<i>Juglans cinerea</i>	4,8	5,7	5,7	5,7	5,5
<i>Prunus serotina</i>	5,1	5,6	5,2	5,2	5,1
<i>Quercus rubra</i>	5,0	5,6	5,4	5,1	4,8
<i>Tilia americana</i>	5,0	5,0	5,8	5,4	5,0
<i>Ulmus americana</i>	5,0	5,6	6,1	5,2	5,2

Tableau n° 1 : Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

19 • Nous avons donc posé l'hypothèse que les BRF, en se «métabolisant», devaient nécessairement apporter des caractéristiques telluriennes propres à susciter d'autres niveaux de vie végétale plus caractéristiques de la forêt à venir qu'aux faciès actuels. Nous nous sommes donc astreints à compter et à identifier les plantules qui apparaissent dans les parcelles discriminant positivement ceux des arbres, puis des arbrisseaux, (résineux et

feuillus), des plantes forestières herbacées et finalement les plantes allochtones.

2.2- L'exemple de l'épinette blanche

20 • Voici donc les résultats obtenus de plantules de *Picea glauca* après 6 années, illustrant à la fois le succès de la germination et également celui de la survie et de la croissance éventuelle. Les comptages de 1990 (tableau n° 2) montrent combien l'espèce prolifère .

Répartition des plantules d'épinette blanche de 1984 à 1990 sur les parcelles traitées avec 17 essences de BRF sur 19

	84	85	86	87	88	90
BRF						
<i>résineux (2/4)</i>						
<i>Larix laricina</i>				1	4	8
<i>Pinus resinosa</i>					1	1
<i>feuillus de transition (9/13)</i>						
<i>Acer rubrum</i>					2	2
<i>Acer spicatum</i>				2	3	3
<i>Alnus rugosa</i>				3	10	15
<i>Betula populifolia</i>				4	7	6
<i>Cornus rugosa</i>			1	2	4	5
<i>Populus grandidentata</i>					1	0
<i>Prunus pensylvanica</i>					1	1
<i>Salix lucida</i>					1	2
<i>Sambucus pubens</i>					2	1
<i>feuillus climaciques (6/8)</i>						
<i>Carpinus caroliniana</i>				8	21	28
<i>Fraxinus americana</i>				2	2	3
<i>Juglans cinerea</i>					3	4
<i>Prunus serotina</i>					1	2
<i>Quercus rubra</i>			1	4	4	5
<i>Tilia americana</i>				4	7	13

Tableau n° 2 : Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

2.3- Des remarques sur le comportement de l'épinette blanche dans les parcelles témoins.

21 • Si on examine attentivement les parcelles témoins, on s'aperçoit qu'aucune parcelle (tableau n° 2, première colonne) ne

contient de plantules d'épinette blanche indiquant, de ce fait, que le milieu était tout à fait impropre à la germination, bien que les semences furent abondantes toutes les années avec la proximité de nombreux arbres semenciers. Par contre des recomptages de 1990 montrent la présence de semis de cette espèce alors qu'un autre comptage fit en 1995 montre que tous les semis sont disparus tout comme en 1983.

Répartition des plantules de l'épinette blanche dans les parcelles témoins en 1990.

BRF	
<i>Résineux (2/4)</i>	
<i>Larix laricina</i>	8
<i>Pinus resinosa</i>	1
<i>Feuillus de transition (5/13)</i>	
<i>Acer rubrum</i>	2
<i>Acer spicatum</i>	3
<i>Cornus rugosa</i>	2
<i>Populus grandidentata</i>	2
<i>Salix lucida</i>	2
<i>feuillus climaciques (3/8)</i>	
<i>Fraxinus americana</i>	3
<i>Quercus rubra</i>	4
<i>Tilia americana</i>	1

Tableau n° 3 : Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)¹⁰

22 • Sur les 25 essences de BRF, seulement 10 montraient des plantules dans leurs parcelles témoins. Un recomptage en 1995 montre que tous les semis sont disparus dans les parcelles non traitées alors que ceux des parcelles traitées continuent à se maintenir et à progresser. Ce comportement erratique des semis montre bien que le milieu est biologiquement instable et que la germination n'est pas un gage de persistance. Les données de 1984 et celles de 1995 sont nulles, seul le relevé de 1990 montre de la germination mais ce sera complètement annulé en 1995, tout comme en 1984.

2.4- Le sapin baumier: l'instabilité de la survie des plantules et le peu de réceptivité des parcelles

23 • Par opposition à l'épinette blanche il est intéressant de suivre le comportement du sapin qui montre une impossibilité de s'établir, bien que les semenciers environnants, encore une fois, soient, abondants et bien pourvus de semences.

Répartition des plantules de sapin baumier dans les parcelles de 1984 à 1990

BRF	84	85	86	87	88	90
<i>résineux (0/4)</i>	-	-	-	-	-	-
<i>feuillus de transition (2/13)</i>						
<i>Alnus rugosa</i>				1	1	0
<i>Cornus rugosa</i>			2	1	1	2
<i>feuillus climaciques (4/8)</i>						
<i>Betula alleghaniensis</i>				1	1	1
<i>Carpinus caroliniana</i>			1	1	1	0
<i>Quercus rubra</i>			2	1	1	1
<i>Tilia americana</i>				2	2	4

Tableau 4 : Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

24 • Les parcelles traitées avec des BRF de résineux ne permettent pas, après 7 années, l'apparition du sapin, bien qu'au début de la période de végétation, des semis germent mais les plantules meurent aussitôt. Ce phénomène sera abondamment noté toutes les années puisque la présence de sapins dans la forêt environnante assure tous les ans une quantité importante de nouvelles graines. Le tableau n° 4 montre cette instabilité même pour les plantules qui ont réussi une première année de croissance, les valeurs finales sont inférieures aux premières (*Alnus rugosa*, *Carpinus caroliniana* et *Quercus rubra*) Nous en tirons une première conclusion voulant que: *La biologie et la biochimie des sols ainsi structurés par les BRF ne sont que peu aptes à la croissance du sapin après germination pour des raisons variables qu'il faudra approfondir.*

Fluctuation du nombre de plantules de feuillus, toutes espèces confondues, dans les parcelles de 1984 à 1990

<i>BRF</i>	84	85	86	87	88	90
<i>résineux(1/4)</i>						
<i>Pinus strobus</i>	-	1	1	1	1	1
<i>feuillus de transition (8/13)</i>						
<i>Acer rubrum</i>			1	0	0	0
<i>Acer spicatum</i>				1	1	1
<i>Alnus rugosa</i>		2	2	7	7	6
<i>Amelanchier bartramiana</i>				3	2	1
<i>Betula populifolia</i>	1	1	1	1	2	2
<i>Cornus rugosa</i>			21	22	20	15
<i>Populus tremuloides</i>	1	0	3	1	1	2
<i>Sambucus pubens</i>		1	0	0	0	0
<i>feuillus climaciques (6/8)</i>						
<i>Betula alleghaniensis</i>				1	1	1
<i>Carpinus americana</i>	1	0	4	7	6	3
<i>Fraxinus americana</i>		1	2	2	2	3
<i>Quercus rubra</i>	3	2	21	9	17	9
<i>Tilia americana</i>		1	4	0	1	3
<i>Ulmus americana</i>		1	3	3	3	6

Tableau 5 : Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

2.5- Les feuillus engendrent les feuillus

25 • Si le sapin montre une instabilité caractérisée dans son inaptitude à coloniser les nouveaux sols, voyons ce que sera le comportement des feuillus, toutes espèces confondues, dans les mêmes conditions. Tout comme dans le cas des plantules de sapin, les parcelles de résineux se montrent tout à fait réfractaires à la germination et la croissance des feuillus, même de transition. Par contre, les feuillus de transition montrent une plus grande permissivité à la germination et la croissance des feuillus (tableau n° 5) qui seront toutes des essences de transition sans exception (tableau n° 6); aucun feuillu climacique n'apparaîtra dans les parcelles. Fait intéressant, les parcelles, faites d'essences dominantes provenant de peuplements climaciques riches à tous points de vue, montreront un plus grand nombre de semis et de plusieurs espèces différentes. Nous en tirons donc la conclusion suivante: *Les parcelles ayant reçu des BRF de feuillus sont plus aptes, amendées avec des BRF que celles de résineux mais*

montrent quand même une instabilité dans l'évolution des individus et des populations. D'autre part, les parcelles ayant reçu des BRF de feuillus climaciques dominants montrent une plus grande tolérance à la germination et la croissance des feuillus.

Répartition des plantules en fonction des diverses essences fragmentées de 1984 à 1990

<i>BRF</i>	<i>résineux</i>	<i>feuillus de transition</i>	<i>feuillus</i>
<i>climaciques</i>			
<i>résineux</i>			
<i>Larix laricina</i>	8	-	-
<i>Pinus resinosa</i>	1	-	-
<i>Pinus strobus</i>	-	1	-
<i>Thuja occidentalis</i>	-	-	-
<i>feuillus de transition</i>			
<i>Acer rubrum</i>	2	2	-
<i>Acer spicatum</i>	3	2	-
<i>Alnus rugosa</i>	15	8	-
<i>Amelanchier bartramiana</i>	2	-	-
<i>Betula populifolia</i>	6	3	-
<i>Cornus rugosa</i>	7	18	-
<i>Populus balsamifera</i>	4	1	-
<i>Populus grandidentata</i>	-	-	-
<i>Populus tremuloides</i>	3	2	-
<i>Prunus pensylvanica</i>	1	2	-
<i>Salix bebbiana</i>	1	1	-
<i>Salix lucida</i>	5	-	-
<i>Sambucus pubens</i>	1	2	-
<i>feuillus climaciques</i>			
<i>Betula alleghaniensis</i>	1	1	-
<i>Carpinus caroliniana</i>	28	8	-
<i>Fraxinus americana</i>	3	3	-
<i>Juglans cinerea</i>	4	-	-
<i>Prunus serotina</i>	2	1	-
<i>Quercus rubra</i>	7	15	-
<i>Tilia americana</i>	17	5	-
<i>Ulmus americana</i>	1	6	-

Tableau 6 : Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)

2.6- La permissivité des parcelles

26 • Le tableau n° 6 montre sans trop d'ambiguïté que les sols traités avec des BRF de résineux sont réfractaires à la germination de feuillus après 7 années, sauf *Pinus strobus* souvent intégré aux forêts feuillues climaciques. Les essences de transition seront plus permissives à l'installation, tant des résineux que des feuillus, mais dans des proportions moindres que dans le cas des feuillus climaciques. Nous en tirons les conclusions suivantes: *Larix laricina* donne les parcelles les plus réceptives aux résineux chez ces derniers, alors que les feuillus de transition donneront des parcelles réceptives à la fois aux résineux et aux feuillus, mais montrant toujours une certaine instabilité. Les essences dominantes provenant de peuplements climaciques sont également permissives aux résineux et aux feuillus mais, dans aucun cas, une essence climacique n'est apparue dans les parcelles.

3- LES PREMIÈRES DÉDUCTIONS ET COMMENTAIRES

27 • Comme les premières expériences agricoles avaient démontré hors de tout doute des améliorations de rendements, une modification de la structure du sol, une réduction ou une modification de la flore adventice, une réduction de l'importance des maladies fongiques et des insectes parasites, nous en avons tiré la conclusion que nous étions en face d'un phénomène biologique, non pas chimique ou physique. Les résultats observés dans l'expérience forestière de régénération ne firent que renforcer cette conviction. **Nous en avons déduit que les mécanismes régissant la pédogénèse étaient d'origine biologique et devaient obligatoirement avoir des origines lointaines dans le temps.**

28 • Des revisions continues de la littérature scientifique nous ont convaincus que nous entrions dans un domaine que la science et la technique avaient négligé, bien qu'ils fussent à la base de l'existence de la vie sur terre comme nous la connaissons. Nous

étions, sans l'ombre d'un doute, en face d'un phénomène naturel portant sur l'aggradation du sol plutôt que sur la dégradation, c'est à dire la baisse de productivité, de diversité et d'activité biologique. **Nous en avons déduit que nous étions en présence d'un phénomène d'aggradation, d'origine forestière, permettant éventuellement de réintroduire les mécanismes de contrôle de la fertilité et de les maintenir actifs dans les sols.**

29 • Ceci étant dit, nous étions loin d'en comprendre les tenants et les aboutissants; d'autant plus que la littérature était à toute fin pratique muette à la fois sur le bois raméal et sur les mécanismes biologiques régissant la fertilité. Nous étions confrontés à devoir expliquer ce que nous observions. Le phénomène était d'autant plus troublant que les mécanismes continuaient à se maintenir, voire même prendre de l'ampleur en fonction du temps. Il nous aura fallu plus de 6 ans de recherche avant d'entrevoir les mécanismes à la fois biologiques, biochimiques et chimiques qui sont à la base de la pédogénèse, elle-même le résultat des rétroactions entre les écosystèmes épigé et hypogé.

3.1 Nous sommes des prisonniers intellectuels du productivisme.

30 • Plus d'une fois nous avons constaté que la presque totalité de la littérature forestière et agricole visaient à fournir les moyens d'augmenter les rendements en évitant les pertes, méthode comptable s'il en est une...

31 • En examinant la terminologie utilisée en foresterie, il devient évident que les prémices agricoles y sont, de même que les techniques. Les termes de «matière organique», fertilisants, pesticides, fongicides, «maladies» virales, bactériennes, fongiques, «ennemis des forêts» épidémies d'insectes, récolte de semence, pépinières, plantations, tous ayant une connotation agricole à un niveau ou un autre. Il faut comprendre que cette approche est d'origine anthropocentrique et que peu a été consenti à l'étude des mécanismes régissant les écosystèmes forestiers hormis la chimie,

la physique, la physico-chimie, puis les champs de connaissances ancillaires comme la physiologie, la génétique, la botanique, la mycologie, l'entomologie, etc...

3.2- La pédogénèse, un ensemble de mécanismes universels d'abord d'origine forestière

32 • Comme nous obtenions des résultats permettant d'augmenter la productivité sans apports d'engrais ou fertilisants tout en modifiant la structure et les composantes biochimiques, il nous fallait donc poser la question en terme de mécanismes universels. Nous avons donc posé l'hypothèse que **bien que l'homme considère l'agriculture comme la source économique de la vie, la réalité historique est toute autre, l'agriculture ayant utilisé les mécanismes biologiques de la fertilité pour lui substituer par la suite ses mécanismes uniquement chimiques.** Les réalités ayant été ainsi modifiées au profit du productivisme, l'agriculture s'attaque maintenant à la modification génique des plantes après leur avoir imposé les modifications génétiques contrôlées.

33 • Il devient ainsi évident que les techniques actuelles en agriculture et en foresterie ignorent les mécanismes fondamentaux, et veulent les court-circuiter en faveur d'un gain rapide et immédiat. Ces approches font appel à une instabilité croissante plutôt qu'au maintien ou à l'augmentation de la *métastabilité* à laquelle aspire tout écosystème. Ceci permet donc d'envisager l'introduction des BRF comme agent d'aggradation, non pas par apport uniquement de nutriments chimiques, mais surtout par apport d'une plus grande stabilité de l'écosystème tellurien. Nous touchons tout le débat de la physique actuelle, et en particulier, de la thermodynamique avec les travaux de Prigogine. Ainsi, du monde chimique et productiviste, nous voici plongés dans un des plus importants débats de la physique et de la philosophie de ce millénaire dont les théories du chaos et du "*big bang*" sont issues.

3.3- L'universalisme de la pédogénèse nous convie sous les tropiques.

34 • Compte tenu des différents résultats obtenus au cours des années, nous décidons d'aller sous les tropiques et de faire la démonstration des mécanismes en cause et de leur efficacité, là où l'eau et la chaleur ne pouvaient être un frein à la manifestation de ce que nous pensions obtenir en termes de rendements et de contrôles. C'est au Sénégal, en Afrique, que nous faisons les premiers essais dès 1992 et en République Dominicaine en 1994. Les premiers résultats ont montré au niveau agricole, qu'ils sont les mêmes que ceux que nous avons obtenus au Québec. Quant au côté forestier, nous n'avons pas été en mesure de convaincre des institutions sauf la Falconbridge Dominicana, mais qui a tout raté en ne respectant pas certaines techniques.

35 • Une revue de la littérature récente et nos résultats de recherche renforcent notre conviction profonde sur l'origine forestière tropicale de tous les mécanismes pédogénétiques. Toutefois, dès les débuts de l'expérimentation, **Guay, E., Lachance, L., et Lapointe R.A. (1982)**, notèrent que lorsque que la proportion de 20% de BRF de résineux était dépassée, la fertilité diminuait et que l'utilisation de BRF de résineux uniquement n'engendrait pas d'augmentations de rendement; au contraire on notait une diminution de ces derniers. **C'est ainsi que fut posée la question à savoir ce que pouvait bien être la différence entre les conifères et les feuillus, puisqu'à l'analyse chimique, ces différences étaient difficilement perceptibles.**

4- LA COMPOSITION ORGANIQUE DU BOIS ET SON APPORT À LA MÉTASTABILITÉ PAR LA VOIE DE LA PÉDOGÉNÈSE

36 • Avant d'aborder la complexité des problèmes, voyons de quoi le « bois », tel que nous l'avons toujours conçu, se présente. Il

est notoire que les sciures, écorces et autres «déchets» de bois ont une incidence négative sur le sol, même en milieu forestier où ces résidus ne génèrent aucune fertilité. La tradition industrielle forestière veut que ces résidus n'aient qu'une valeur négative et que plus vite ils disparaissent mieux c'est. Non seulement, il y a une différence entre le bois caulinair et le bois raméal, mais il y a une grande différence entre les sols générés sous les couverts résineux et feuillus.

37 • Tous les travaux consultés montrent que les plantes en général sont composées de celluloses, d'hémicelluloses et de lignine. C'est le résultat de la synthèse du glucose. Chez les arbres, la photosynthèse donnera ces trois produits associés en un *continuum*, sous la forme de stockages énergétiques. L'une des conséquences physiques est la rigidité des tiges avec un accroissement en diamètre au fil des ans. Il faut ajouter que le bois des arbres est pourvu de très peu de nutriments, mis à part ceux du cambium, confinant le bois dans un rôle physique de soutien et de transport, plutôt que biologique et dynamique.

38 • Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, un seul des constituants fondamentaux montre une variation importante dans sa structure: **la lignine**. C'est l'une des macromolécules naturelles des plus complexes et la moins bien connue, parce qu'elle a été perçue jusqu'ici comme un sous-produit inutilisable et responsable d'un grand nombre de pollutions des cours d'eau. Nous reconnaissons cependant que les Gymnospermes (conifères), les Dicotylédones et les Monocotylédones renferment des lignines différentes. Elles se présentent sous la forme de cycles aromatiques symétriques possédant deux groupements méthoxyles (OCH₃) ou lignine syringyle, propre aux Dicotylédones, tandis que chez les Conifères, cette lignine est asymétrique avec un seul groupement méthoxyle ou lignine gaïacyle. Les Monocotylédones représentent un mélange des deux types auquel s'ajoute un troisième avec une absence totale de ces groupements méthoxyles sur les cycles aromatiques.

4.1- Une première liaison avec la genèse des sols

39 • Il va de soi que les feuillus Dicotylédones donnent des sols brunisoliques, avec une structure élaborée et stable, basée sur la présence d'agrégats. Une grande biodiversité apparaît au sein de la microfaune et de la microflore du système hypogé et de la macroflore du système épigé. Inversement, les forêts conifériennes possèdent des sols podzolisés avec la précipitation du fer dans les horizons inférieurs et une accumulation de tissus végétaux en surface. C'est le signe d'une grande difficulté à cycler convenablement les nutriments causée par de nombreux blocages. La biodiversité du sol est moins grande, surtout celle de l'écosystème épigé, toujours très réduite en espèces. Il y a donc deux types fondamentaux de contrôle de l'écosystème: le premier est basé sur la «**mégabiodiversité**» et le second sur l'«**oligobiodiversité**».

40 • Pour ce qui est du troisième type de sol développé par les Monocotylédones, il contient le plus souvent des agrégats de couleur sombre, mais souvent instables à l'eau; il n'apparaît que dans des régions à faible pluviométrie (steppes, pampas, prairies américaines, etc.). L'accumulation des tissus végétaux est plus grande que la combustion biologique à cause d'une raréfaction de l'eau disponible pour la transformation. Ce sont des sols fertiles, mais fragiles, qui se dégradent lors de leur utilisation agricole et qui ne supportent que des concentrations de peuplements humains moins conséquents au point de vue démographique.

4.2- Une estimation des volumes de BRF produits: certainement des milliards de tonnes annuellement

41 • Toutefois, nous avons été dans l'impossibilité de trouver une description et une appellation pour une partie extrêmement importante des arbres et arbustes que représentent les branches. Ces branches sont le siège de la photosynthèse et de l'élaboration des tissus à partir des molécules de glucose. Une vague estimation de la production de ces rameaux montre des milliards de tonnes

annuellement de par toute la planète. Au Québec seulement, il est vraisemblable que la production soit de l'ordre de 100 000 000 de tonnes vertes annuellement, en prenant les chiffres donnés par le programme ENFOR, auxquels on ajoute une estimation de la productivité des arbustes.

42 • Dès 1986, nous avons proposé le terme de **bois raméal** pour ce matériau biologique qui, jusqu'ici, avait été traité comme un déchet industriel ou une nuisance. Ce bois raméal contient en outre des celluloses, hémicelluloses et lignines, de très nombreuses protéines, tous les acides aminés, presque tous les types de sucres et amidons, en plus de polysaccharides intermédiaires. Il faut ajouter un nombre incalculable de systèmes enzymatiques, d'hormones, mais surtout de polyphénols, huiles essentielles, terpènes, tanins et autres..., associés à divers degrés à tous les nutriments nécessaires à la synthèse et à la régulation de la vie.

43 • Parmi tous ces produits, beaucoup sont extrêmement fragiles comme les enzymes, les acides aminés et plusieurs types de protéines. D'autres produits seront des sources énergétiques immédiates comme les sucres, suivis des celluloses et des hémicelluloses. Reste la lignine, molécule tridimensionnelle, l'une des plus compliquées que la nature a édifiée qui sera une source d'énergie importante, mais d'accès difficile, puisque cette énergie est contenue dans des cycles aromatiques que peu d'êtres vivants sont aptes à dégrader pour en tirer bénéfice. Parmi ceux-là, on compte les Protozoaires et les bactéries, mais les plus importants sont des fungus du groupe des Basidiomycètes. Nous en avons déduit que la différence majeure reposait sur la structure de la lignine, conduisant à des différences fondamentales dans le fonctionnement des mécanismes de dépolymérisation.

4.3- Les dérivés de la lignine: polyphénols, acides aliphatiques, terpènes... les bases mêmes de la formation des sols et de leur dynamique.

44 • Il y a près d'un siècle déjà que des hypothèses sont émises concernant le rôle majeur de la lignine dans la pédogénèse. Les travaux des dernières décennies n'ont pas touché cet aspect, mais apporter une meilleure connaissance de cette molécule et de sa dégradation en tant que polluant. Dans cette optique, il y a une dizaine d'années que des travaux se poursuivent et qui ont abouti à plusieurs constatations et conclusions quant à la structure de cette dernière et surtout ses modes d'évolution avec des auteurs comme **Erikson, Blanchette, & Ander, [1990]**, ainsi que **Rayner, & Boddy, [1988]**. Ici le rôle des champignons Basidiomycètes devient primordial dans la dynamique de la transformation; également celui des bactéries mais qui ne conduisent le plus souvent qu'à la décomposition uniquement.

45 • Depuis le glucose, il y a formation d'alcool coniférylique qui donnera d'abord une lignine sous la forme de monomères qui se polymérisera de plus en plus par la suite. Les noyaux benzéniques seront les plus importants au point de vue structure et contenu énergétique: ils deviendront les principaux éléments de la structure stable du sol.

46 • Il va de soi que cette structure moléculaire, même très polymérisée, peut subir de nombreuses transformations en donnant des polyphénols, des acides gras, des huiles essentielles, des terpènes, des tanins, etc. Ils ont tous des effets perceptibles sur le métabolisme de la plante et des différents paramètres des chaînes trophiques.

47 • Ainsi, les tanins, associés aux protéines dans le processus de brunissement des feuilles, préviennent la dégradation de ces dernières et la perte de nutriments précieux. Par contre, seules quelques bactéries, le plus souvent associées à la micro ou mésofaune du sol, possèdent les systèmes enzymatiques propres à

dégrader ces tanins pour libérer les protéines et leurs nutriments chimiques. Nous entrons ainsi dans le cyclage des nutriments par le biais des dérivés de la lignine, alors que nous sommes encore largement convaincus que nous devons comprendre et améliorer la nutrition des plantes: **il nous faut d'abord décoder la nutrition du sol et les répartiteurs de l'énergie et des nutriments.**

4.4- La connaissance de la lignine et de la pédogénèse se manifeste par l'étude des phénomènes de décomposition et de dégradation

48 • La presque totalité de la littérature scientifique jusqu'à ce jour ne traite que de l'évolution de la lignine et de la cellulose à travers les filtres de la dégradation du bois. Bien qu'unanime, cet aspect des choses a grandement entravé notre démarche scientifique dans la compréhension des mécanismes pédogénétiques. Ceci ne nous a pas empêchés de croire que nous étions sur une piste particulièrement féconde pour la compréhension d'une série d'expériences mises en marche entre 1978 et 1986, avec des résultats inexplicables alors. Nous avons été acculés à devoir expliquer ce que nous observions et mesurons. Ceci a été consigné dans de nombreuses publications, en particulier par les auteurs qui suivent: **Guay, Lachance, Lapointe [1982], Lemieux, & Lapointe [1985] Lemieux, & Lapointe, [1989], Lemieux, & Lapointe, [1990, ainsi que Lemieux, & Toutain, [1992].**

5- «MATIÈRE ORGANIQUE» UN TERME SANS CONCEPT NI DÉFINITION POSSIBLE

5.1- Les premières références à l'humification

49 • Après quelques années, comme les modifications apparues sur la structure et le couleur du sol se maintenaient, nous avons conclu que nous intervenions sur les mécanismes pédogénétiques, l'apport des matières traditionnelles ne reposant sur aucun principe scientifique, si ce n'est la **minéralisation**. Nous venions de

toucher la source même des principes d'**humification** qui devait nous propulser dans un monde méconnu, et souvent inconnu, auquel nous aurions désormais accès, portant sur la pédogénèse fondamentale d'origine forestière qui aura des échos importants sur le productivisme agricole.

50 • Petit à petit, nous dûmes réaliser que nous faisons face à la possibilité de pénétrer à l'intérieur de ce monde biologique qui préside à la formation des sols. L'apport du bois raméal nous permettra à long terme de comprendre comment fonctionne l'écosystème hypogé et quelle est la dynamique biologique qui, associée à la géologie, aux lois de la physique, de la chimie minérale et biochimique, régit un monde obscur et méconnu, sauf sous l'angle chimique.

5.2- L'évolution de la compréhension actuelle

51 • Jusqu'ici, dans l'incapacité de comprendre les mécanismes qui régissent le sol, nous nous sommes confinés à interpréter le tout sous l'angle du contrôle chimique avec l'apport des fertilisants, des amendements, etc. Poussant plus avant le raisonnement, nous en sommes venus à considérer le sol comme un simple support physique. Le pas suivant fut de l'éliminer, pour utiliser les fertilisants en solution pour les cultures hydroponiques.

5.3- Décomposition et dégradation: une évocation par la négative

52 • De là à penser que percevoir et mesurer les tissus végétaux dans le sol comme étant une transition vers la libération de substances chimiques pour la croissance des végétaux, il n'y avait qu'un pas qui a été franchi il y a bien longtemps. Ce concept de "*matière organique*" est ainsi associé à un intrant chimique, tout en permettant de maintenir certains paramètres physiques comme le contrôle de l'atmosphère du sol, l'élimination des gaz résultant de l'activité microbiologique, toujours associée aux mécanismes de **décomposition**. Comme quoi, seule la notion de fertilisant et particulièrement l'azote, est reconnue.

5.4- La notion de bois raméal une ouverture vers de nouvelles connaissances sur la pédogénèse

53 • Plus tard nous avons donc posé l'hypothèse que *le bois raméal pouvait être une entrée privilégiée dans l'étude et la compréhension de la formation du sol et de la dynamique qui le caractérise, considérée avant tout comme étant la distribution de nutriments chimiques pour la croissance des plantes*. Ce n'est que dix années plus tard que nous avons commencé à comprendre les tenants et les aboutissants des mécanismes en place, de leur évolution, voire de leur effondrement. Bien que dans la décennie qui précède, il y ait eu plusieurs publications importantes sur les mécanismes biologiques liés à la dynamique des nutriments, un premier essai compréhensif de synthèse apparaissait (**Perry, Amaranthus, Borchers & Borchers, et Brainerd [1989]**). Cet important travail de l'école de Corvallis, aux USA, fut orienté sur le comportement des divers niveaux biologiques, dont les mycorhizes et leurs effets étaient le point central d'expérimentation, de synthèse et de compréhension.

5.5- La régie chimique et biologique des nutriments

54 • Ces travaux de l'école de Corvallis, aussi remarquables furent-ils, portaient avant tout sur une tentative d'explication de l'importance d'un seul niveau, qui est celui de la vie, dans un esprit de compétition et de complémentarité, ce qui était à l'époque l'unique avenue de compréhension de notre monde. L'arrivée du bois raméal nous permit alors de forcer la réflexion sur d'autres plans tant forestiers qu'agricoles, alors que nous étions persuadés de détenir pour une première fois, une entrée magistrale dans ce monde complexe et fondamental de notre économie qu'est le sol. Il préside à la régie des nutriments, mais également à un nombre effarant de formes de vie avec ses innombrables niches, en permettant la vie sous toutes ses formes depuis les virus jusqu'aux

mammifères les plus évolués. C'est également la "banque", le "régisseur" et le "moteur" de la vie terrestre. Il en va de même de tous les nutriments chimiques et biochimiques issus de la synthèse ou la rétrosynthèse de composés polyphénoliques, le plus souvent dérivés de la lignine, principaux composants de ce que nous connaissons actuellement de l'humus, et des fractions humiques et fulviques.

5.6- Les raisonnements que nous suggère la logique

55 • Les observations et mesures précitées doivent trouver des explications sur des angles multiples et à divers niveaux. Les résultats et implications sont trop nombreux pour qu'il n'y ait de concordance que sur les points fondamentaux, tant physiques, chimiques que biologiques. Paradoxalement, si nous avons un ensemble cohérent, il devrait y avoir une face incohérente, faute de quoi nous serions en face d'un système rigide donnant toujours les mêmes résultats. Pour poser les bonnes hypothèses de travail, il faut les deux côtés de la médaille.

56 • Les nombreuses rencontres et discussions dans plusieurs pays, tout comme les lectures de travaux sur la question à travers le monde, nous ont convaincus que nous nous attaquions à un domaine inexploré sous l'angle de la pédogénèse à partir d'apriorismes forestiers. Plus encore, l'utilisation et les effets notés en milieu forestier nous indiquent que l'application de **BRF** a une influence importante sur le comportement de l'écosystème, avec une emphase particulière sur la germination et la compétition des plantes.

5.7- La logique de la fragmentation

57 • Depuis fort longtemps, tous étaient convaincus que le fait de retourner au sol les rameaux et les feuilles des arbres était bénéfique au sol, mais sans avoir eu la possibilité d'en mesurer les effets. En réalité, peu se soucient de la chose et n'espèrent que la disparition de cette "nuisance" que représentent les branches et

autres déchets d'exploitation. J'en veux pour preuve l'exportation de ces branches hors de la forêt abattue pour cause de rentabilité accrue, sujet sur lequel **Freedman B, [1990] in Lemieux G. [1991]** a travaillé. La fragmentation des rameaux nous apparaît au début comme une simple nécessité technique permettant la manipulation, l'épandage et le travail du sol. Elle s'est avérée toute autre par la suite, lorsqu'on a commencé à comprendre les mécanismes en cause. Nous l'avons assimilée plutôt à la mastication chez les animaux permettant une attaque enzymatique bien plus efficace.

6- L'ASSOCIATION NUTRIMENTS ET ÉNERGIE = NOURRITURE.

6.1- Les différences entre compostage et pédogénèse

58 • La notion de nourriture implique l'association de deux aspects que sont l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le système et celle des composantes chimiques (fertilisants) et leurs intermédiaires biochimiques (protéines, acides aminés, sucres, cellulose etc.) Très tôt, il nous a fallu dériver des concepts traditionnels menant directement à la minéralisation, c'est-à-dire la dissociation entre l'énergie et les nutriments. Ainsi, le traitement des matières organiques d'origine animale ou végétale a trouvé une technique de traitement privilégiée avec les systèmes de compostage. La dissociation énergie-nutriments se fait par fermentations bactériennes et fongiques thermophiles, avec une dissipation de l'énergie thermique et la récupération des nutriments et des résidus organiques, dominés par des lignines dégradées et des sous-produits polyphénoliques. Il s'agit d'une combustion enzymatique mais qui comporte de nombreuses analogies avec la combustion par le feu (**Kirk, T.K & Farrell, R.L. [1987]**). La pédogénèse est aux antipodes du compost et donne une structure organique ou organo-minérale au sol en stimulant la biodiversité des chaînes trophiques.

6.2- Les principes qui sous-tendent la nécessité de la fragmentation

59 • Même si l'évidence de l'efficacité de la transformation des BRF devenait de plus en plus indiscutable, les principes de base nous échappaient toujours. Ce n'est qu'en 1989 que nous saisîmes pour la première fois les mécanismes présidant à la libération d'énergie, tout en conservant des parties importantes de la lignine, c'est-à-dire les noyaux benzéniques hautement énergétiques.

60 • Au début de la décennie 80, plusieurs auteurs, tant en Amérique qu'en Asie et en Europe, publièrent d'importants travaux portant sur la lignine, sa structure et sa dégradation par voie enzymatique. Les principaux travaux sont ceux de **Kirk & Fenn [1982]**, **Tien & Kirk, [1983]**, **Lewis, Razal, & Yamamoto [1987]** **Leisola, & Waldner [1988]** **Leisola & Garcia, [1989]** et **Leatham & Kirk [1982]**. Toutefois, l'orientation donnée à ces recherches portait uniquement sur la compréhension des mécanismes de dégradation, dont les buts non avoués étaient l'utilisation et l'élimination de la lignine, l'un des polluants importants dans l'industrie des pâtes et papiers. Cette approche "négative" à la compréhension de la lignine n'était pas sans valeur, mais tout à fait logique dans une société industrielle qui utilise les capitaux générés à sa propre croissance, laissant de côté tout ce qui peut entraver la possibilité de réaliser des profits.

6.3- La production des fractions fulviques et humiques

61 • Le travail qui a fourni la piste de la compréhension a été sans contredit celui du finlandais Leisola et du français Garcia [1989]. Ils expliquèrent la mécanique enzymatique responsable de la dépolymérisation de la lignine. C'est la production de deux macromolécules, l'une de faible poids moléculaire que nous avons assimilée à l'acide fulvique et l'autre de poids bien plus élevé que nous avons reconnue comme étant l'acide humique. Plus intéressant encore, ils précisent que, sous l'action d'une enzyme spécifique, la lignoperoxydase dépendante du manganèse, la plus

grosse molécule se fixait sur le mycélium des Basidiomycètes (*Chrysosporium phanerochaete*), empêchant des recombinaisons avec la fraction fulvique. Ceci aboutit à des composés souvent stables, avec des propriétés antibiotiques ou autres du groupe des polyphénols. Cette fixation de la macromolécule sur le mycélium confère au milieu une couleur brune, caractéristique des brunisols. Ce changement de coloration des sols a été observé à plus d'une reprise après l'application des BRF en agriculture.

62 • Beaucoup de travaux ont porté sur le comportement de nombreux systèmes enzymatiques jouant un rôle fondamental dans la "dégradation" de la lignine. Mentionnons: **Dordick, Marletta & Kilbanov [1986], Erickson, Blanchette, & Ander [1990] Garcia, Latge, Prévost & Leisola [1987] et Jones & O'Carroll, [1989].**

63 • Toutes ces publications venaient confirmer le rôle des Basidiomycètes dans les sols forestiers, alors que les sols agricoles en sont singulièrement dépourvus. Un très grand nombre d'auteurs font référence aux Basidiomycètes sous le nom de "*white rots*" traduit en français par "pourritures blanches", terme qui encore une fois fait allusion au côté "dégradant" du rôle de ces derniers. Ce rôle des Basidiomycètes est également vu sous l'angle de la mycorhization comme chez **Amaranthus & Perry [1987], Amaranthus, Li & Perry [1987], Hintikka [1982], Kirk & Fenn [1982], Perry, Amaranthus, Borchers, Borchers & Brainerd [1989].** Pour ce qui est du rôle des Basidiomycètes dans la structuration du sol, considéré encore une fois sous l'angle de la dégradation, un bon nombre d'auteurs ont apporté des renseignements précieux comme: **Erikson, Blanchette & Ander, [1990], Hintikka [1982], Kirk & Fenn [1982], Levy, [1979], Rayner & Boddy [1988], Tate [1987], Vaughan & Ord [1985].**

6.4- La «matière organique» dans l'optique d'une fertilité agricole annuelle sans signification forestière

64 • Dans la mesure où nous entrons dans la logique de la "matière organique" et de son rôle bénéfique en agriculture, les relations entre la lignine et la fertilité s'estompent au profit d'une fertilité annuelle que l'on mesure en rendements, les autres paramètres étant ancillaires. Il est évident que la notion de "matière organique", tirait son origine de l'agriculture et fut transférée en foresterie sans autre forme de procès. Il fallait aller au delà pour comprendre ce que nous observions.

65 • Il fallait aussi s'intéresser aux relations entre les différentes formes de vie, en particulier celles de la microfaune et aux effets observés par les différents auteurs. Il devenait évident que le rôle des fungus, si important fut-il, n'expliquait pas la dynamique tant de la formation du sol que du cyclage des nutriments. Il fallait que d'autres niveaux de vie soient impliqués pour former ce qu'il est maintenant convenu d'appeler *chaînes trophiques*, où tous les niveaux de vie interviendront dans le processus vital qui préside à la mise en disponibilité des nutriments d'origines chimique, minérale, biochimique, nécessitant l'acquisition et l'émission d'énergie.

6.5- Une approche univoque: la translocation des nutriments

66 • Les auteurs qui suivent: Anderson [1988], Anderson, Coleman & Cole [1981], Bachelier [1978], Bouché [1981], Larochelle, [1993], Larochelle, Pagé, Beauchamp & Lemieux, [1993], Pagé, [1993], Parkinson, [1988], Sauvesty, Pagé & Giroux, [1993], Seastedt [1984] Swift, [1976], Swift, Heal & Anderson [1979], Toutain, [1993] ont abordé la question sous l'angle de la dynamique, de la prédation et du transfert d'énergie d'un niveau à l'autre, avec les implications inévitables sur le déplacement des nutriments. Toutefois, aucun auteur n'a abordé la question des mécanismes énergétiques et leur remise en question, hormis ceux qui sont connus à tous les niveaux comme la transformation de

l'adénosine triphosphate en adénosine diphosphate avec émission d'une grande calorie, dont le glucose est la source énergétique primaire.

6.6- Les lignines et les polyphénols

67 • Comme les rameaux n'ont jamais fait l'objet d'une description et n'ont jamais été considérés comme un matériau utile, la présence de lignine sous forme de monomère, n'avait jamais fait l'objet de discussions dans une fonction énergétique particulière. Toutefois, plusieurs auteurs font allusion à la complexité de cette macromolécule qu'ils soupçonnent de jouer un rôle important dans la formation de l'humus plus, et la production de polyphénols jugés indésirables. Citons les auteurs suivants: **Dordick, Marletta, & Kilbanov [1986], Erikson, Blanchette & Ander [1990], Garcia, Latge, Prévost, & Leisola [1987], Glenn & Gold [1985], Jones, & O'Carroll [1989], Kirk & Farrell, [1987], Leatham & Kirk [1982], Kirk, & Fenn, [1982], Leisola, & Waldner [1988], Leisola & Garcia [1989], Lewis, Razal & Yamamoto [1987], Rayner & Boddy [1988], Stott, D.E., Kassim, Jarrell, J.P., Martin, M. & Haider, K. [1993], Tate [1987], Vaughan & Ord [1985] et Vicuna [1988]**

68 • Sous différents aspects, ces auteurs mettent en relief la structure de la lignine et l'importance des groupements méthoxyles selon l'origine de la lignine, la "fragilité" et la "digestibilité" de cette dernière peu polymérisée et la facilité avec laquelle elle peut être dépolymérisée. Pour la première fois, nous avons saisi l'importance de cette jeune lignine en tant que source d'énergie, non seulement après la transformation de la cellulose, mais également en utilisant ou non l'énergie considérable contenue dans les noyaux benzéniques, certains étant réservés pour la constitution de l'humus. La lignine jouerait un double rôle énergétique et constructeur du milieu que devient le sol, siège de la régulation et de la régie, à la fois de la vie et des nutriments par voie de cyclage.

6.7- Les blocages polyphénoliques et la biologie de la régulation

69 • Ce serait donc à ce niveau que se situeraient les blocages aboutissant à des niveaux de fertilité de plus en plus bas, même en présence de tous les nutriments nécessaires pour une bonne croissance des plantes de l'écosystème hypogé. Il n'est pas question ici de discuter les différents parcours que doivent emprunter les nutriments pour arriver dans le "bon ordre" à la disposition de la plante. Citons, à titre d'exemple, les lombrics qui s'associent aux bactéries en colonies dans leur système digestif pour attaquer les pigments bruns de feuilles. Ces pigments bruns sont l'association d'un polyphénol (tanins) avec les protéines empêchant la dégradation des nutriments (**Toutain, F. [1993]**). Il en va de même de la relation entre les Basidiomycètes et de nombreuses espèces d'acariens et de collemboles dans le cyclage des nutriments, en pratiquant des fragmentations de plus en plus poussées par voie de mastication ou autres, ouvrant le chemin aux attaques enzymatiques ou bactériennes (**Swift [1977], Larochelle, Pagé, Beauchamp & Lemieux [1993]**).

6.8- La définition des nutriments

70 • Cette question fut traditionnellement présentée sous des angles plutôt simplistes, en classant surtout les éléments du tableau périodique de Mendéléïeff selon leur rôle dans la production de récoltes au plus bas coût possible. Trois éléments apparaissent en tête: l'azote, le phosphore et le potassium auxquels s'associent une kyrielle d'autres éléments depuis le fer, le silicium, et tous ceux connus sous le nom d'oligoéléments. Cette classification en *macroéléments* et *oligoéléments*, est tout à fait caractéristique de la vision "industrielle" de la productivité agricole et qui, au fil des décennies, s'est propagée dans la dialectique forestière.

71 • À vrai dire, cette perception est bien insolite en qualifiant jusqu'ici la croissance des plantes à partir des sels minéraux qui président à leur croissance. Il est remarquable de constater que

cette vision productiviste montre ses limites de multiples façons: l'érosion des sols et l'afflux constant de nouveaux parasites, des maladies fongiques, bactériennes ou virales sans cesse en évolution. Les sommes que LA société consent au contrôle de ces épidémies sont colossales et dépassent l'imagination.

72 • Comme l'ont démontré plusieurs auteurs dont **Amaranthus & Perry [1987], Amaranthus & Perry [1988], Bormann & Likens [1979], Flaig [1972] Gosz & Fischer [1984], (Gosz, Holmes, Likens, & Bormann, [1978], Martin, W.C., Pierce, R.S., Likens, G.E. & Bormann, F.H. [1986]**, il est possible d'apporter des changements très importants dans le comportement des écosystèmes, en faisant varier les facteurs biologiques qui auront un impact significatif sur les nutriments: soit la forme de ces derniers dont les répercussions physico-chimiques sont incommensurables.

73 • Nous en tirons la conclusion qu'il y a une relation directe entre les paramètres biologiques et la disposition des nutriments. Les relations chimiques et physiques sont connues; mais celles des niveaux chimiques et biochimiques sont plus obscures et la connaissance spécifique des transferts énergétiques l'est autant.

6.9- L'eau

74 • L'eau est un élément essentiel de la vie sous toutes ses formes. Sous les tropiques, la disponibilité de l'eau régit toutes formes de vie et se manifeste dans la structure et la résistance des écosystèmes forestiers. Il en va autrement en climat tempéré où, le plus souvent, ce sont les surplus d'eau qui interfèrent avec la fertilité en imposant un blocage complet dans l'évolution du sol, provoquant des accumulations sous des formes plus ou moins incomplètes des résidus végétaux dont les tourbes sont l'expression ultime. Nous posons l'hypothèse que *l'écosystème hypogé, c'est-à-dire le sol vivant, a réussi à contourner toutes les difficultés dues au climat, en créant un réseau de vies multiples, dans lequel les nutriments peuvent être récupérés par les plantes à*

l'abri des cycles chimiques que l'agriculture privilégie et développe en climat tempéré. Ceci serait particulièrement important dans la gestion de l'eau, où cette dernière se comporterait comme un nutriment, insensible à la pression osmotique du sol causée par les grandes concentrations de sels.

75 • Toutefois, dans les milieux forestiers des régions tempérées, particulièrement dans les forêts feuillus climaciques, il nous semble de plus en plus probable que le «turnover» chimique et biologique soit à la remorque des mécanismes de dépolymérisation de la lignine, cette dernière ne pouvant se produire en présence d'eau (**Dordick, Marletta & Kilbanov [1986]**) pas plus que les champignons qui y président.

6.10- L'azote

6.10.1- La fixation non symbiotique: N₂

76 • Nous avons pris pour acquis que l'azote observé dans le sol, était la conséquence directe de la dégradation des protéines et de la biomasse microbienne. Toutefois, comme les plantes ne montraient aucun signe de carence après trois ans, il nous a fallu en rechercher la cause. À la suite de nombreux auteurs, nous en sommes venus à la conclusion que les mécanismes en cause étaient d'origine forestière principalement liés à une fixation d'azote sous forme non symbiotique par un ensemble de bactéries de la rhizosphère. Citons à titre de référence les auteurs suivants: **Rouquerol, Bauzon, & Dommergues [1975], Thomas-Bauzon, Kiffer, Pizelle, & Petidemange [1990] Thomas-Bauzon, Kiffer, Janin, & Toutain [1995], Parkinson [1988], Stott, Kassim, Jarrell, Martin & Haider, [1993], Swift [1976], Tate [1987], Vaughan & Ord [1985].**

6.10.2- L'azote disponible: à repenser pour en faire un bilan dynamique

77 • Il est apparu que, règle générale, la fixation de l'azote reposait sur un groupe de bactéries dont l'enzyme actif contenait le fer comme élément central, tout comme l'hémoglobine. Bien loin des Légumineuses avec ses *Rhizobium*, ceci expliquerait l'abondance d'azote dans les sols forestiers tout comme dans ceux traités aux BRF. Ainsi pensons nous, pour le moment, que *le cycle de l'azote est principalement alimenté par la fixation de N₂ par voie microbienne et, accessoirement par la voie des fungus et des mycorhizes dans les sols traités aux BRF.*

6.10.3- Le phosphore et les phosphatases

78 • Cet élément a toujours été la source de difficultés dans la nutrition des plantes. Son immobilisation par le fer en milieu acide, et par le calcium en milieu alcalin, rend son déplacement dans la solution du sol presque impossible. Toutefois, c'est un élément vital et erratique en milieux agricoles. Les milieux forestiers ne présentent aucune carence en **phosphore**. Il est reconnu qu'une enzyme particulière, la phosphatase alcaline, est apte à "débusquer" cet élément essentiel dans les transferts d'énergie au profit de la croissance des plantes. Il est également reconnu qu'une bonne mycorhization augmente la disponibilité du phosphore (**Rouquerol Bauzon & Dommergues [1975]**).

79 • A ce jour, des études (**Seck, & Lemieux [1996]**) montrent l'augmentation de la phosphatase alcaline à partir de la biomasse microbienne en milieux agricoles traités aux BRF. Une seconde étude portant sur la recherche des enzymes disponibles dans les BRF, révèle la présence remarquable de la phosphatase alcaline et de la phosphatase acide (**Toutain, [1996]**) dans les rameaux de *Quercus rubra*, l'une des essences les plus intéressantes sous nos conditions climatiques. Il est trop tôt pour tirer des conclusions sur ces présences auxquelles s'associent d'autres enzymes, comme une lipase. Nous espérons pouvoir publier ces résultats

prochainement, ce qui apporterait une nouvelle avenue de réflexion sur les multiples processus de la pédogénèse. Contrairement à l'azote, nous n'avons que peu poussé la recherche bibliographique sur le phosphore. Les principaux auteurs consultés étant: Flaig [1972], Ratnayake, Leonard & Menge, [1978], Swift, Heal & Anderson [1979], Vaughan, & Ord, [1985]. Nous posons donc l'hypothèse que *non seulement les BRF apportent des nutriments au sol, mais également un grand nombre de mécanismes capables de structurer le sol tout en permettant aux enzymes d'alimenter en phosphore la flore de l'écosystème épigé*. Il convient de mentionner les travaux de Lalande, Furlan & Angers (1997) ainsi que ceux de Seck & Lemieux [1996].

7- LA BIOLOGIE TELLURIENNE S'IMPOSE PAR LES VOIES HISTORIQUES DE L'ADAPTATION.

80 • Les résultats obtenus lors des expérimentations, tant forestières qu'agricoles, nous ont amenés à explorer la biologie tellurienne sur la nutrition, tout en étant conscients que la réponse ne pouvait être globale, et que leur connaissance qualitative et quantitative n'apportait rien de concluant. L'ensemble des résultats préliminaires expérimentaux n'ont fait que nous mettre sur des pistes le plus souvent inconnues et insolites en regard de la littérature actuelle. Il faut citer les principaux travaux dans le domaine expérimental des BRF qui sont: **Beauchamp, C. [1993], Guay, Lachance & Lapointe [1982], Larochelle, Beauchamp, Pagé & Lemieux [1993], Lemieux & Lapointe, [1985], Lemieux & Lapointe, [1989], Lemieux & Toutain [1992], Michaud [1993], Pagé [1993], Seck [1993], Seck [1993], Toutain [1993], Tremblay [1985]**. La publication de ces travaux n'a suscité que de la curiosité dans l'optique traditionnelle des techniques agricoles souvent empiriques, dont l'unique but est de retirer les nutriments des résidus de cultures.

7.1- Quelques lumières sur la dynamique de la biologie tellurienne

81 • Nous devons constater l'absence d'intérêt scientifique pour ces découvertes logiques, mais déroutantes à plus d'un point de vue, en regard de la réalité technique et économique de l'époque. L'interrelation de tous ces mécanismes biologiques dont l'influence se transmet en partie par des mécanismes enzymatiques, n'exclue en rien l'importance des nutriments chimiques et biochimiques. Alors que seules les données chimiques et physiques étaient retenues pour comprendre le sol, nous proposons une série d'explications plutôt biologiques qui apportent quelques lumières sur l'univers forestier.

82 • Il faut regarder de près les nouvelles perceptions de l'univers, en particulier celles du temps telle comme le proposent les physiciens et philosophes modernes (**Prigogine & Stenger [1988], Prigogine [1996]**). Ce qui suit vise la recherche des équilibres générés par les différents écosystèmes forestiers, et dont les BRF sont également les initiateurs. Ainsi, nous passons d'un monde en quête de production et de déséquilibre à un monde marqué par la diversification et l'équilibre. Le temps nous mène à la quête de la métastabilité, ce monde où les écosystèmes sont stables et en même temps fragiles. C'est l'essence même de ce qu'est un écosystème hypogé avec ses molécules complexes du sol, issues de la dégradation de la lignine et des divers niveaux trophiques qui régulent toute la vie et tous les échanges. Ces échanges sont aussi bien chimiques, physiques que temporels. Il semble bien que c'est ce monde que nous cherchons tous, à en croire les cris d'alarme qui viennent de tous azimuts depuis près d'un demi siècle.

7.2- Le comportement des écosystèmes forestiers et la génération différentielle des sols

83 • La compréhension des mécanismes responsables de la vie et de la fertilité, permet de mieux distinguer les différents rôles. Il devient évident que le sol, sa biologie et son équilibre chimique et

biochimique sont les clés de tout l'édifice forestier, dans le temps comme dans l'espace. L'allusion au début concernant l'origine de la forêt dans le temps, renforce la conviction que tous les mécanismes en cause ont une origine qui remonte à des centaines de millions d'années. On peut maintenant séparer les systèmes feuillus des systèmes résineux, non pas par des différences de climat, mais par des différences d'origines, de constitutions et d'évolutions.

84 • Il est intéressant de noter, à travers les millénaires, la progression de deux systèmes forestiers, dont le premier, celui des conifères, a persisté à travers les âges grâce à sa résistance et sa robustesse. Il a tellement bien réussi qu'il occupe encore une bonne partie des territoires qui possèdent un climat avoisinant celui des origines. Il est toutefois remarquable de constater que le nombre d'espèces archaïques qui le composent est très élevé (Gymnospermes, Équisétacées, Filicinées, Bryophytes, lichens et que les dominants sont toujours des Gymnospermes.

85 • Ces dominants ont des formes et des comportements liés à d'autres temps qui ont un parallèle d'autarcie avec les espèces inférieures qui ne dépendent que peu de la biologie de leur environnement. En revanche, comme les Sauriens, les Amphibiens reptiles et autres ont développé une panoplie d'armes «chimiques» pour prendre leur place au soleil. Tout comme les animaux les moins évolués, les conifères ont développé des stratégies dont l'élimination des concurrents est la plus fréquente. C'est par le sol que ces stratégies ont été les plus efficaces en éliminant la possibilité de croissance ou tout simplement la possibilité de germer. La production en excès de dérivés polyphénoliques comme les terpènes et un fonctionnement particulier de la lignine guaïcyle par rapport à la dépolymérisation sont très certainement des moyens archaïques de persister, non pas en s'adaptant, mais en imposant son propre comportement à la vie de tout l'écosystème. Ce comportement est à la base même des difficultés de comprendre correctement la gestion et la croissance de ces écosystèmes. Bien que n'utilisant que la méthode descriptive et

comparative de la dynamique sans avoir recours à la méthode expérimentale, les auteurs suivants apportent beaucoup d'information: ce sont **Dommergue et Mangenot [1970], Duchaufour [1974], [1980], [1991], Duchaufour & Jacquin [1975], Duchaufour & Toutain [1985], Toutain [1981], Ranger & Bonneau (1984), Frontier & Pichot-Viale [1993].**

7.3- L'énergie au centre de nos théories plutôt que les nutriments.

86 • La description qui suit s'applique à tous les écosystèmes forestiers, mais ce sont ceux des tropiques qui en sont les plus dépendants et les plus sophistiqués, à cause des hautes températures ou l'absence prolongée de variations thermiques ou hydriques. Ils ont une histoire plus cohérente que les écosystèmes plus boréaux et plus de «pistes de succès» ont été prospectées avec des bonheurs variables, induisant des équilibres nombreux et interdépendants. Il nous semble que l'énergie est au centre de la question. Elle l'est sous une forme nutritionnelle, c'est-à-dire où l'énergie exogène peut être introduite dans les cycles vitaux et associée aux nutriments biochimiques (sucres, cires, huiles...). Ils sont eux-mêmes porteurs d'énergie endogène. Toutefois il semble bien que la dynamique de tous les systèmes telluriens fertiles et productifs passe par un apport régulier en énergie directement depuis l'écosystème épigé vers l'hypogé.

7.4- Les arbres dirigent les quatre cinquièmes de leur production énergétique vers le sol

87 • Ainsi, de 70% à 80% de l'énergie endogène produite par un arbre est dirigée directement dans le sol, ne laissant que de 20 à 30% de l'énergie totale pour la production de tissus **Fogel & Hunt [1983], Meyer & Linderman [1986], Rambelli, [1973], Reid & Mexal [1977], Vogt, Grier & Meir [1982], Whipps & Lynch [1986].** Chez les graminées, il n'y a que de 10% à 40% qui soient dirigés vers l'écosystème hypogé, ce qui ne devrait pas être étranger à l'instabilité des sols qui en sont dérivés.

7.5- L'apport énergétique de l'écosystème épigé: la base de la vie tellurienne.

88 • C'est ainsi que l'énergie endogène est dirigée vers l'écosystème hypogé (le sol) par la voie racinaire, où les mycorhizes jouent un rôle majeur en assurant le transport des nutriments du sol vers la plante et en retournant vers le sol l'énergie nécessaire, tout en étant des consommatrices privilégiées. C'est en relation avec les champignons, le plus souvent les Basidiomycètes, que se noue principalement la nutrition de la plante et les échanges avec le sol. Allen & Starr [1982], Amaranthus, Li & Perry [1987], Amaranthus & Perry [1987], Anderson, Huish, Ineson, Leonard & Splatt [1985], Borchers & Perry [1987], Clarholm, [1985], Coleman [1985], Fogel & Hunt [1983], Ingham, Troffymow, Ingham & Coleman [1985], Janos [1988], Lynch & Bragg [1985], Malloch, Pirozynski & Raven [1980] Olsen, Clark & Bennet [1981], Perry, Molina & Amaranthus [1987], Trappe, J.M. [1962], Vogt, Grier, & Meier [1982].

7.6- Les sources de lignine peu polymérisée: les racines et les rameaux.

89 • On doit souligner l'importance de la lignine dans la constitution du sol et dans la régie des nutriments par les différents niveaux trophiques. Dans les forêts de Gymnospermes et de Dicotylédones, se trouvent deux sources de lignine peu polymérisée dont l'approvisionnement est régulier: la première ce sont la chute de tissus riches en lignine peu polymérisée de la canopée que représentent les feuilles, les fruits, les petits rameaux de toutes sortes, etc. La seconde source plus importante encore, mais non visible, réside dans les toutes petites racines qui sont constamment métabolisées. Elle sont très riches en lignine peu polymérisée et sapides pour la microfaune. Elles représentent, dans l'érablière, une biomasse variant de 2 et 3 tonnes à l'hectare annuellement; Pagé, F. [1993]. Notons que ce phénomène est plus important dans les forêts de Dicotylédones décidues mais l'est

moins dans les forêts sempervirentes de Gymnospermes ou d'Angiospermes.

8- UN DÉBUT DE COMPRÉHENSION DES RÉSULTATS OBSERVÉS PAR LA VOIE EXPÉRIMENTALE

90 • Les milieux agricoles et forestiers ont montré, dès le début, des résultats qui furent vérifiés par la suite: **Aman, Despatie, Furlan & Lemieux [1996], Beauchamp [1993], Guay, Lachance, & Lapointe [1982], Lemieux, [1985], Lemieux & Lapointe [1986], Lemieux & Lapointe [1988], Lemieux, & Lapointe [1989], Lemieux, & Lapointe [1990], Lemieux & Tétréault [1993] Lemieux & Toutain [1992], Lemieux [1994], Seck [1993].** Tous les résultats, reproductibles avec une fidélité variable selon les fluctuations annuelles des conditions du milieu, ont été positifs dans la grande majorité des cas. Lorsqu'il y a eu échec, nous avons pu retracer les erreurs commises et en trouver une explication provisoire suffisante, confirmant ainsi plusieurs principes de base. Ainsi, une trop grande abondance d'eau empêche la dépolymérisation de la lignine et élimine les Basidiomycètes responsables. D'autre part, il est possible que les Basidiomycètes ne soient pas présents pour des raisons qui tiennent au type de BRF ou à une simple absence.

91 • Nous sommes en mesure de suggérer l'hypothèse suivante; *le bois raméal fragmenté livré à l'attaque des Basidiomycètes est en mesure de remplacer toutes les fonctions biologiques, nécessitant l'apport de nutriments chimiques et biochimiques. Toutefois, la présence prépondérante de bactéries capables de dépolymériser la lignine n'aura pas les mêmes effets positifs.*

8.1- La forme des arbres : une brève histoire de l'évolution

92 • Les observations et les réflexions, sur les aspects énergétiques de la vie du sol, n'ont pas trouvé de parallèle ni de source nouvelle de compréhension dans la littérature. Une de nos publications sur le sujet n'a soulevé ni intérêt ni commentaires

(Lemieux [1995]). Nous avons constaté l'inhibition de la productivité sous les tropiques, où les sols sont dégradés, (Lemieux [1995]) et les climats subarctiques, une surcharge de tissus végétaux peu évolués et peu productifs quant à la biomasse annuelle.

93 • L'évolution rapide des BRF en climat tropical et la stagnation en milieu arctique provient directement d'une inversion dans la distribution de l'énergie exogène, c'est-à-dire provenant du soleil. Avec **Godron & Lemieux [1996]**, qui mettent en relief l'importance stratégique du développement des branches dans l'évolution des arbres pour une meilleure captation des photons à courtes longueurs d'ondes, on doit souscrire à un tel énoncé. Toutefois, nous sommes fort intrigués de considérer que les arbres les plus anciens, les conifères, ne répondent que très peu comparativement aux Dicotylédones.

94 • Les Dicotylédones arborées avec un tronc et une cime large sont en mesure de filtrer la lumière et de capter les photons les plus «performants», devenant ainsi plus productives tout en étant les dominantes absolues. Ce faisant, elles sont en mesure de produire plus d'énergie de stocker des surplus sous forme de bois dans le tronc, tout en accélérant le processus de cyclage des tissus végétaux et en fournissant des quantités de plus en plus grandes dans l'écosystème hypogé. Ainsi, les feuillus peuvent accepter «tous» les concurrents à presque tous les niveaux et de les mettre au service de l'écosystème tout entier. La biodiversité est au maximum comme la **métastabilité**. Tout converge vers la stabilité avec un maximum de complexité en fonction du temps et tous les éléments vivants peuvent se remplacer à tour de rôle. La sélection des espèces et des individus se fait par élimination des individus, quelquefois des espèces, mais sans effets notoires sur la répartition des rôles dans la stabilité de l'écosystème.

95 • La forme des Gymnospermes mieux connus sous le nom de conifères est inverse de celle des feuillus Dicotylédones. Ces arbres sont apparus et se sont développés génétiquement pour répondre à

des conditions physiques qui n'existent plus. La qualité de l'atmosphère faisant office de filtre, la lumière atteignant la cime des arbres voyait également sa qualité altérée. La non prépondérance des rameaux de la cime chez les Conifères indiquerait que dominance n'était pas nécessaire pour occuper le terrain comme c'est le cas chez les feuillus. Ainsi les conifères, dans leur ensemble, sont adaptés à des conditions physiques qui n'existent plus, sauf dans des milieux particuliers comme les forêts d'altitude, la forêt boréale etc... Ils sont en relation directe avec des paléoclimats qui se prolongent jusqu'à nous, mais d'une façon imparfaite. Il est possible que, pour une même latitude, la qualité de la lumière ne soit plus la même dans sa composition et que la proportion de photons à courte longueur d'onde soit modifiée sensiblement.

8.2- La pédogénèse en forêt de Gymnospermes

96 • Les populations de Gymnospermes auraient vraisemblablement établi un système restrictif par élimination de la concurrence, largement basée sur les effets inhibiteurs des polyphénols. La lignine montre une structure asymétrique avec la présence d'un seul groupement méthoxyle. Elle donne naissance à de nombreux polyphénols, acides gras, résines, terpènes..., rendant inefficace le rôle de certaines lipases présentes. Beaucoup d'espèces de la famille des Ombellifères ainsi que des Labiées ont conservé ce caractère propre aux Gymnospermes chez les Angiospermes. Il en va de même des Eucalyptus en Australie qui pratiquent, phénomène dévastateur dans la culture de ces essences par rapport à l'agriculture.

97 • Ces deux modes de gestion de la concurrence, l'un archaïque et l'autre plus "moderne", permettent l'hypothèse suivante: *la structure de la lignine et son évolution dans l'ensemble des mécanismes pédogénétiques sont directement responsables du mode de concurrence des écosystèmes, par l'évolution de cette dernière dans le sol et ses effets sur le contrôle des nutriments chimiques et biochimiques.*

9- QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LE BOIS RAMÉAL

98 • Les augmentations de la productivité par des mécanismes harmonieux nous ont amenés à considérer les BRF comme un facteur "nutritiel" de base en agriculture, à l'intérieur de l'ensemble des causes et facteurs de la pédogénèse. Si les BRF ont une influence à la fois sur les sols forestiers et agricoles, ils peuvent être à la base d'un nouveau champ de connaissance jamais approché sous cet angle, comme le confirme la littérature scientifique du siècle qui s'achève.

99 • Cette capacité de remettre en route la vie et les échanges intrinsèques qu'ont les BRF indique que la métastabilité passe par un ensemble de processus vitaux dont l'importance est démontrée tous les jours par les nouvelles découvertes de la physique. Nous sommes actuellement à considérer d'un peu plus près les aspects biologiques du sol, souvent malgré nous, mais nous y arrivons petit à petit.

9.1- Une définition de la fertilité

100 • En résumé, il faut rechercher à tout prix la diversité pour permettre à la «machine qu'est la vie» de mettre en relation le monde géologique avec celui de la vie à travers les mécanismes chimiques et biochimiques mais dont l'interdépendance n'est nulle part aussi intime que dans le sol. Toutefois, ceci devrait nous contraindre à définir ce qu'est un sol de ce point de vue, alors qu'actuellement il n'est défini que par des critères chimiques dans des buts de classification uniquement, et par lesquels nous essayons de définir et provoquer la fertilité. **Cette dernière ne peut qu'être caractérisée par les flux ordonnés et équilibrés à la fois des nutriments chimiques et biochimiques, mais également de l'eau avec les transferts énergétiques appropriés en fonction de la demande, elle-même régie par les variations climatiques.**

9.2- Quelques nuances sur l'impact des biotechnologies

101 • La tendance a été, depuis fort longtemps, d'intervenir sur le capital génétique pour obvier à telle ou telle carence et susciter des augmentations de productivité. Bien que l'ouverture créée par les nouvelles biotechnologies semble illimitée dans ses possibilités et ses résultats, nous profitons de l'occasion pour attirer l'attention sur l'édifice génétique actuel qui est le résultat d'équilibres de millions d'années dans la construction de notre monde métastable. Il faudrait songer à ne corriger que les erreurs de parcours sans mettre en cause la logique de ces équilibres. Ces erreurs de parcours sont presque toujours inscrites dans le patrimoine génétique des individus et par association dans le patrimoine environnemental des populations. Il faudra distinguer et agir par la suite.

102 • Produire plus avec moins et produire mieux, dans des milieux de plus en plus dégradés, semble attirer bien des capitaux et bien des cupidités contre lesquels il faudra se prémunir par de véritables connaissances, non pas par des techniques uniquement, si éclatantes soient-elles.

10- LES PRATIQUES DE LA FORESTERIE MODERNE

10.1- Logique forestière contre logique agricole

103 • Toute la foresterie est empreinte à la fois du vocabulaire, des techniques et des concepts de base issus de l'agriculture dans une logique tout à fait industrielle de production et de rentabilité économique. Il semble parfaitement logique de croire que la forêt doive se comporter comme l'agriculture et se voir imposer des traitements analogues. Nous allons plutôt proposer une **logique forestière**, différente de la logique agricole.

104 • La forêt, dans l'est de l'Amérique, n'a pas été trop perturbée puisque l'exploitation se faisait largement en hiver pour des volumes plutôt modestes. À la suite d'une exploitation plus poussée lors de la

guerre de 39-45 et de l'arrivée de la mécanisation qui s'accélère depuis les années 60, les choses ont bien changé.

105 • Cette tendance s'est accéléré avec l'ouverture des marchés à l'échelle mondiale, mais cette fois sans pouvoir entrevoir un quelconque assouplissement des tensions commerciales puisque désormais la concurrence régira les marchés et l'innovation perpétuelle sera la règle. Comment imposer une telle logique à un système métastable qui est la base de la vie terrestre depuis l'aube des temps et qui est soumise aux lois de la physique régissant notre univers? La question n'est pas simple et nous y avons consacré plusieurs années de travail et de réflexion.

106 • Nous venons d'exposer certaines des conclusions se dégageant de la littérature scientifique. L'expérimentation forestière et agricole, tant au Québec que sous les tropiques, se faisait selon la «perception agricole» de la forêt, alors que la logique aurait voulu que ce fut l'inverse. Comme on ne peut changer le cours de l'histoire humaine, il faut une perception qui soit «sylvo-forestière» cette fois; la forêt perçue pour ce qu'elle est fondamentalement et depuis toujours.

10.2- De retour aux techniques d'exploitation

107 • Contrairement à l'agriculture, la productivité forestière est fonction de la stabilité de son milieu, faute de quoi «ses ennemis» rappiquent et n'en font qu'une bouchée ou tout au moins la réduise en lambeau et parfois pour des millénaires comme dans le bassin méditerranéen. Traditionnellement aujourd'hui encore, ce ne sont que les tiges des arbres qui intéressent, sans toucher aux nutriments, nous brisons l'édifice biologique. Il n'y a pas d'exportation de nutriments, si ce n'est que par lessivage. Alors d'où vient ce désarroi qui rend impossible la reconstitution de l'écosystème comme il était avant l'exportation des grumes? Ironiquement, ce n'est que par la rupture des liens responsables de la métastabilité de l'écosystème comme le soulignent **Perry, Amaranthus, Brainerd, Brainerd & Borchers [1990]**.

108• Plus l'édifice mégabiologique est important, plus il dépend des liens qui maintiennent les diverses composantes. La logique agricole n'a que faire de telles contraintes car l'homme y consacre capitaux et travail dans le maintien d'équilibres et de rotations à courtes échéances. C'est ici que le bât blesse car la foresterie devenue une industrie veut assurer sa pérennité en se soustrayant aux contraintes agricoles tout en adoptant ses techniques.

109 • Ce point est éloquent car l'industrie, admet la croyance qui veut que les «déchets de coupe» soient bénéfiques au sol et que leur disparition soit une «contribution à l'enrichissement de la station» comme le serait éventuellement l'apport de fumier sur un champ. Rien n'est plus éloigné de la réalité car, la même industrie exploite les arbres entiers avec exportation de tous les biosurplus vers l'extérieur du chantier d'abattage pour des raisons de rentabilité. Comme ils deviennent embarrassants, des programmes d'élimination par brûlage contrôlé, sont mis de l'avant dans le but de faciliter la plantation de nouvelles forêts artificielles.

110 • Dans son travail, **Freedman [1990] in Lemieux [1991]**, montre combien l'exportation des biosurplus hors du parterre de coupe est dommageable sur le bilan total des nutriments. Encore une fois, c'est une perspective et une logique agricoles en supposent que les nutriments en termes chimiques, représentent l'unique base de raisonnement.

10.3- La distinction nécessaire entre bois de tronc et bois de rameaux.

111 • Il n'existe pas de différences dans la perception des biosurplus reconnus comme un «matériau homogène» ou, tout au mieux, de valeur négative. Toutefois les analyses de **Guay, Lachance et Lapointe [1982]**, indiquent bien la richesse des rameaux à tous points de vue avec des ratio C/N qui n'ont rien de commun avec les bois de tronc ou les écorces.

112 • Pour reprendre la dialectique traditionnelle relative à la conception de l'exploitation forestière dans une mentalité agricole, aucune nuance n'est faite entre les troncs et les branches, les deux étant des déchets de coupe. Nous proposons donc une nouvelle conception de l'aménagement forestier pour que les traitements soient différents afin que les rameaux, riches en énergie disponible, en nutriments biochimiques et chimiques, puissent entrer dans le cycle de la vie en passant par le processus vital de la pédogénèse.

113 • Ainsi, les branches et les feuilles perçues comme nuisances et comme risques d'incendie devraient, dès l'abattage, être fragmentées et triturées pour que ce broyat soit immédiatement mis en contact avec le sol. Cette mise en contact susciterait une attaque massive des Basidiomycètes pour «s'approprier» immédiatement les nutriments les plus efficaces et les plus subtils comme le sont de nombreuses protéines et enzymes de même constitution. La boucle étant bouclée entre l'arbre et le sol, tous les autres mécanismes se mettraient en place illico.

10.4- La place des Basidiomycètes

114 • Il est très important que les Basidiomycètes soient les premiers à prendre place à la «table»; sinon les autres niveaux biologiques peuvent consommer une bonne partie de ce «festin» sans mettre en place les chaînes trophiques de façon efficace. Si l'eau se manifeste de manière excessive, il y a risque d'une évolution vers la formation de tourbe.

10.5 - Le cycle du carbone

115 • Toutes les discussions sur le carbone et ses diverses formes ne permettent pas de prévoir ce que sera la fertilité car la perception strictement biochimique, ce qui exclut toute compréhension des mécanismes. Le bilan carboné de la planète est une pure fantaisie à mon avis, puisque c'est dans une optique de compréhension de la métastabilité des écosystèmes qu'il faut raisonner. Le «carbone» aura la forme de son évolution biologique où les cycles benzéniques jouent

un rôle dont on ne soupçonne que très peu l'importance à ce jour. C'est dans cette direction qu'il faut nous pencher pour comprendre l'évolution de la vie sur terre. Le carbone sera l'élément structurant et le responsable de la conservation de l'énergie, mais il peut être attribué à d'autres tâches sous l'action de systèmes enzymatiques performants.

10.6- La perception des biosurplus

116 • La perception actuelle des biosurplus forestiers est négative et les essais de valorisation par réintroduction dans les massifs forestiers existants en Europe a toujours été un échec. La perception est donc celle d'un déchet nuisible dont l'utilisation a été reconnue comme nulle et dont le principal effet est de se prêter comme combustible pour susciter des incendies forestiers fort couteux et nuisibles. Tout concourt donc à chercher des moyens de s'en débarrasser. C'est l'action de nombreux champignons qui sont responsables de la disparition de ces résidus, sinon le feu, mais sans laisser de traces d'une aggradation du milieu, bien au contraire.

117 • Plusieurs croient que la transformation des résidus de coupe peut agir comme un «engrais» et apporter tous ses bienfaits au sol et à la régénération forestière. Rien n'est plus faux, puisque la tranformation de ces biosurplus, par la flore fongique et microbienne, remet en circuit dans l'atmosphère azote et gaz carbonique, en libérant inutilement l'énergie précieuse des noyaux benzéniques. Quant aux éléments chimiques qui s'y trouvent, ils coulent sur le sol lors des pluies par ruissellement vers les ruisseaux, lacs et rivières. En climats désertiques ou semi-désertiques, ils sont tout simplement balayés par les vents. Ainsi, ce qui a pris des décennies sinon des siècles, à faire corps avec l'écosystème, sera dilapidé en moins de quelques saisons pour ne plus revenir.

10.7- Sauvegarder un «héritage» durement acquis.

118 • La fragmentation et la mise en contact ave le sol permettent non seulement de sauvegarder l'«héritage chimique» ainsi que les précieux noyaux benzéniques riches en énergie mais ils permettent la

structuration du sol. Plutôt que de susciter l'appauvrissement et la désertification, nous suscitons ainsi l'aggradation, la régénération et la remise en circuit d'un héritage qui est perdu par l'utilisation des techniques actuelles qui sont le reflet de l'ignorance transmise par des techniques issues du fond des âges et que nous n'avons jamais interrogées, sinon en termes agricoles.

10.8- Le rôle des mycorhizes

119 • L'engouement pour les mycorhizes depuis quelques décennies et l'effet positif de ces dernières sur les productions agricoles avaient souvent pour but d'augmenter la rentabilité du productivisme en faisant état, en particulier, de l'augmentation du phosphore utilisable. Nous pensons que le rôle des mycorhizes est encore plus important pour le stockage du phosphore dans les tissus mêmes du mycélium grâce à l'augmentation des phosphatases. L'autre rôle, plus important encore, est celui du système de transport des nutriments à l'abri des contraintes chimiques du sol, particulièrement en milieux pauvres. mais également et surtout en milieux forestiers. Cet aspect de la fertilité est possible parce que les mycéliums des Basidiomycètes ne sont pas cloisonnés et agissent comme un système de pipeline, assurant non seulement la protection aux nutriments, mais leur translocation d'un point à un autre ainsi que de la plante vers le sol et inversement.

120 • Ce mode de transport par les Basidiomycètes, dont un grand nombre sont des mycorhizes, représente le premier instrument vivant à la base de l'écosystème forestier. De ce fait, il faut de l'énergie pour que ce système complexe existe et soit actif. D'où provient cette énergie, sinon de la transformation de substances présentes dans le milieu d'origine organique dont les sucres sont les premiers attaqués et finalement les noyaux benzéniques. Ce premier cycle veut que les agrégats du sol soient en constante évolution dans les sols fertiles, servant à la fois de nourriture et de niche pour plusieurs autres microorganismes comme les bactéries ou les spores de champignons.

10.9- Que faire des bois de tronc.

121• Si on examine les biosurplus forestiers on retrouve une autre catégorie de bois que sont les troncs et les grosses branches qui ne peuvent être traitées comme les rameaux et qui n'ont pas les mêmes qualités. Naturellement, les bois de tronc laissés sur place sont déjà attaqués par des pourritures et des bactéries. Toutefois, la haute polymérisation de la lignine et la présence de nombreux polyphénols et également de fortes concentrations de manganèse sont peu susceptibles d'apporter des éléments positifs à la pédogénèse. Dans cette conjoncture, la dépolymérisation de la lignine se fait par d'autres enzymes comme la laccase souvent d'origine bactérienne. Ce type de dépolymérisation produit des fractions qui se repolymérisent en divers polyphénols, acides gras et autres, plutôt qu'uniquement et principalement en acides fulviques et humiques. Ces substances noires et peu structurées sont relativement pauvres en nutriments et peu mobiles avec une tendance à produire des tourbes si la conjoncture hydrique y est favorable.

10.10- Lignine et manganèse

122• Ce processus explique peut-être la compétition chez les Gymnospermes où le manganèse jouerait un rôle important. Plusieurs analyses, non publiées à ce jour, montrent que les feuillus qui réussissent à concurrencer les conifères directement ou lors des stades de transition, ont un métabolisme qui n'est pas affecté par de fortes concentrations de manganèse.

123 • Des échanges récents avec des ingénieurs des pâtes et papiers nous indiquent que des traces de manganèse perturbent toute la transformation de la lignine dans les nouveaux procédés de blanchiment des papiers. Nous constatons la chose dans le sol, et cela nécessiterait des travaux de recherche au point de vue conceptuel. Nous croyons que c'est l'un des principaux facteurs de contrôle de l'écosystème et de la pédogénèse, ce qui reste à prouver de toute évidence.

10.11- Les modes et temps de la fragmentation

124 • Il est évident que les bois de tronc et les rameaux aient des traitements différents. S'il est primordial de fragmenter les rameaux dès l'abattage et de les mettre en contact avec le sol, il est inutile de procéder de même avec les bois de tronc. Toutefois, il est important qu'ils soient en contact avec le sol pour permettre les échanges microbiologiques et assurer une niche privilégiée pour toute la petite faune.

10.12- Ce qu'il faut attendre des conifères et des feuillus fragmentés

125 • Presque tous les scientifiques sont d'accord sur la capacité des conifères à cycler leurs nutriments à l'interne avec un recours au sol minimum, voire presque nul parfois. C'est pourquoi les conifères et en particulier les pins sont partout plantés sur la planète. Il faut reconnaître cependant que les conifères améliorent peu la station sur laquelle ils sont introduits. Leur impact n'est pas positif à long terme mais, par leur robustesse, ils réussissent à se maintenir en éliminant la concurrence ou en tolérant les espèces adaptées à leurs conditions.

126 • Les remarques qui précèdent expliquent le peu de succès des plantations de feuillus, malgré qu'ils soient beaucoup plus productifs. Les feuillus climaciques de l'est de l'Amérique doivent cycler leurs nutriments par le sol, condition première dans le cas du calcium qui est isolé et concentré par les Basidiomycètes à partir des feuilles mortes (**Toutain [1993]**). Ce rôle fondamental que joue maintenant l'écosystème hypogé serait un apport majeur à la fertilité et à la biodiversité car le sol est en mesure de transformer des intrants biologiques divers et de les rendre disponibles aux individus qui forment l'écosystème épigé.

10.13- L'énergie concentrée dans les sols des forêts feuillues

127 • Ceci expliquerait en bonne partie pourquoi les sols étudiés par **Gosz, Holmes, Likens & Bormann [1984]**, montrent une si grande

concentration d'énergie sous la canopée et une si grande perte après abattage de la forêt. Il y aurait donc une série de mécanismes qui permettent de maintenir énergie et biodiversité, ce qui ne serait pas le cas chez les conifères. C'est ainsi que nous en sommes venus à considérer les peuplements de résineux comme étant très **résistants**, malgré les mésadaptations aux conditions actuelles. À l'opposé, les écosystèmes de feuillus sont capables de s'adapter et d'accepter la biodiversité et la concurrence, en utilisant l'écosystème hypogé à la fois comme «estomac» et comme banque alimentaire permettant des performances de production bien supérieure aux conifères.

128 • Dans cette perspective, nous suggérons, tout au moins au point de vue expérimental, que non seulement les rameaux soient fragmentés, mais qu'une deuxième fragmentation de la régénération le soit également, dans le but de refaire, le plus possible, le stock énergétique, mais dans le cas uniquement où l'on procéderait à la sélection des tiges par la suite, assurant ainsi une structuration «naturelle» et fertile en respectant ou provoquant le meilleur équilibre possible des tiges. La fragmentation devrait, dans tous les cas, être un outil privilégié pour maintenir et refaire la structure du peuplement. Nous avons la possibilité d'éviter tous les traitements par sylvicides et tout ce qui est abattu pour le dégagement devrait immédiatement être fragmenté et retourné au sol.

10.14- Les objections économiques et logistiques en perte de vitesse.

129 • Quelles que soient les objections économiques ou logistiques, il nous semble que ce soit la seule attitude raisonnable à prendre. Il faut permettre au temps de faire son oeuvre, si on veut éviter la catastrophe écologique. Il a fallu plus d'un siècle pour mener au bord du gouffre de très grandes superficies forestières. Nous devons tout remettre en ordre, faute de quoi les forêts seront toujours improductives.

130 • Dans une récente étude, le Département américain de l'Agriculture (**Smith, Faulkner & Powell [1994]**) montre la progression de l'exploitation de la forêt américaine. Il y a près d'un demi-siècle que l'équilibre est rompu entre la production et la récolte. La dernière

décennie a doublé le déficit. Notre propos n'est pas de traiter de ce type de problème social aussi bien qu'économique, mais nous ne pouvons nous soustraire à de tels exemples parce que la compréhension et la restauration de la forêt demandera de grands efforts. Nous sommes tous conscients d'avoir atteint et même dépassé un point d'équilibre crucial.

131 • Pour le cycle du carbone, terme très utilisé mais sans résonance au niveau forestier, il va de soi que sans l'intégration dans les chaînes trophiques, les protéines, les sucres, les celluloses que les lignines et, de ce fait, dans les cycles benzéniques, montre combien la fragmentation a un impact considérable. La métastabilité exige des échanges constants pour que l'équilibre des différents facteurs soit maintenu et retrouvé. Tout système de ce type est basé avant tout sur les équilibres carbonés. À l'inverse, tout système en déséquilibre, par sa destructuration même, émet des quantités de carbone libres dont on commence à comprendre les effets. Il va de soi que le carbone peut être emprisonné dans des impasses que sont les tourbes, charbons, et pétroles. C'est dans un contexte de métastabilité optimum que devrait se trouver le maximum de carbone dans les chaînes vivantes. Il est peut-être téméraire de croire que la forêt puisse apporter seule des corrections positives, mais on devrait penser au Carbonifère où c'était certainement le cas. Les forêts de feuillus actuelles contiennent bien plus de carbone dans l'écosystème hypogé que dans l'épigé, ce qui n'est pas négligeable soit de 3 à 5 fois plus. Dans ce cas, ce serait la dégradation des sols qui serait le principal facteur de réémission du CO₂ dans l'atmosphère.

11- QUELQUES RECOMMANDATIONS

132 • Voici quelques recommandations pour faire avancer la compréhension, la technique et les connaissances scientifiques de base. Elles auront un impact à la fois sur la forêt, l'agriculture et les sciences fondamentales dont la physique pourrait être la principale bénéficiaire.

11.1- L'expérimentation technique sur le milieu forestier

133 • Les expériences relatées montrent qu'à moyen terme, on peut mesurer des changements dans le sol qui auraient un impact considérable dans l'avenir. Ces changements reposent sur la restructuration biologique et biochimique du sol, permettant l'apparition de nouveaux écosystèmes qui tendent vers la métastabilité. Nous proposons donc les points suivants:

a) À l'abattage, que tous les bois raméaux de la cime des arbres n'excédant pas 10 à 15 cm soient **fragmentés et épanchés immédiatement sur le sol** ou au plus une semaine après l'opération.

b) Dépendant de la fertilité de la station, la régénération qui suivra pourra éventuellement être fragmentée une seconde fois pour en augmenter le capital énergétique et la diversité microbiologique.

c) Les premiers essais devraient avoir des témoins de superficie égale et de position topographique équivalente. L'utilisation de deux petits bassins-versants semblables serait utile pour comparer les pertes en nutriments après exploitation. Il serait ainsi possible d'évaluer avec plus de précision les entorses faites à la métastabilité.

d) Des études portant sur au moins 5 ans devraient être faites sur la flore, la régénération, les insectes, les maladies fongiques. L'installation d'exclos est à prévoir pour que la faune ne soit pas en mesure de brouter cette nouvelle structure de végétation et en modifier la réalité.

e) L'interprétation des résultats devrait faire l'objet de publications et surtout de séminaires internationaux pour apporter l'expérience tropicale sur les mécanismes observés et mesurés. L'apport d'institutions comme l'ICRAF (International Center of Research on Agroforestry) devrait être hautement sollicité et privilégié dans l'interprétation des résultats.

11.2- L'expérimentation scientifique: Le monde fongique

134 • De nombreuses zones d'ombre restent à explorer pour en arriver à comprendre les succès et comment on peut les maintenir et les interpréter. Comme la première intervention biologique est d'ordre fongique et peu expérimenté, nous allons privilégier cette piste.

a) Un vaste travail d'identification et de mise en culture des principaux champignons du sol dans les jeunes forêts comme dans les forêts matures. En parallèle, faire des efforts considérables pour des mises en culture au laboratoire et inventer des techniques plus efficaces.

b) Bien identifier les rôles et les comportements des diverses familles de champignons pour en comprendre leur impact sur la compréhension des résultats en aménagement.

c) Pour les principales espèces de Basidiomycètes, identifier les enzymes produites et les circonstances dans lesquelles elles sont produites et les conditions de croissance. Il y a là une condition de base du fonctionnement de l'écosystème hypogé et de la fertilité générée.

11.3- La mésofaune et la microfaune

135 • Des études sont nécessaires sur les différents niveaux de microfaune et de mésofaune qui apparaissent lors de stades précis de développement et qui jouent souvent des rôles essentiels et fondamentaux dans les dilemmes proposés par les polyphénols et les tanins en particulier. Ces organismes sont aussi capables en outre de transporter les champignons et les bactéries, responsables de la production de plusieurs enzymes liées à la mise en disponibilité des nutriments, même en présence de contraintes chimiques importantes. C'est un des paramètres dynamiques des plus importants dans la pédogénèse.

11.4- Les bilans phosphorés et azotés

136 • Les systèmes enzymatiques sont à la base du fonctionnement de l'écosystème hypogé, ce qui est l'essence même du concept de sol

vivant. Dans cette optique, des efforts considérables devraient être faits pour comprendre le fonctionnement des transferts et des transports du phosphore à travers les mycorhizes et les enzymes responsables. Il y a certainement des transferts énergétiques très particuliers qui méritent qu'on s'y arrête.

137 • Des travaux substantiels devraient être consentis pour explorer le rôle des bactéries fixatrices d'azote mais **non symbiotiques**. Elles ont certainement un impact considérable sur le bilan azoté de l'écosystème, mais il se pourrait également que leur rôle, dans certaines circonstances, fut inversé en maintenant un équilibre entre l'offre et la demande de la plante et du sol. Nous pensons que la capacité des Légumineuses de fixer l'azote par des Rhizobiums est un moyen de suppléer aux carences de l'écosystème hypogé, dans ce domaine.

11.5- Lignines et polyphénols.

138 • Plus notre compréhension des phénomènes de base évolue et plus elle renforce l'idée que la chimie des polyphénols est la base de toute la pédogénèse au point de vue biochimique. Le fait que la dépolymérisation de la lignine soit faite par des champignons, apparus, il y a des centaines de millions d'années, n'est pas étrangère à cette perception. Nous soupçonnons grandement que la dépolymérisation de la lignine soit la base biochimique du sol et du contrôle à la fois de la biologie et de la chimie de la relaxation des nutriments pour l'alimentation minérale des plantes. Plutôt que de voir des millions de polyphénols comme autant d'ennemis ou de dangers, une revue de la chimie des phénols, à la lumière de ce que nous venons de décrire, devrait être faite et d'une manière très critique. Ces polyphénols agissent de manière différente en présence de feuillus ou de conifères et aussi en fonction de l'âge de ces peuplements. Ce sont des éléments fondamentaux de la fertilité et de son contrôle. Par leurs cycles benzéniques, ils accumulent l'énergie nécessaire au maintien d'une structure dynamique dans laquelle se développent un grand nombre de chaînes trophiques, permettant ou empêchant la relaxation d'éléments nutritiels.

12- UN RAPPROCHEMENT NECESSAIRE AVEC L'INDUSTRIE DES PATES ET PAPIERS.

139 • Nous proposons donc un rapprochement avec l'industrie des pâtes et papiers qui, par ses nouvelles techniques, est sensible aux systèmes enzymatiques, probablement les mêmes ou, tout au moins, semblables à ceux qui gèrent la fertilité des milieux forestiers.

12.1- La science fondamentale

140 • Reste donc cette immense macromolécule qu'est la lignine dont on ne connaît que des techniques pour la démolir, mais dont nous soupçonnons maintenant son rôle fondamental dans tous les mécanismes pédogénétiques. Non seulement elle donne des polyphénols, mais elle est l'ossature même des sols, l'origine des acides humiques et fulviques, la base de l'association organo-minérale ou des condensats polyphénoliques dans les sols dépourvus de substances minérales fines.

13- UNE IMPLICATION DE NOS INSTITUTIONS DE HAUT- SAVOIR A L'ECHELLE INTERNATIONALE

141 • En réponse à l'universalité des mécanismes auxquels nous nous référons, il faut modifier nos institutions à l'échelle nationale ou mieux encore à l'échelle internationale, pour prendre en main l'évolution de cet ensemble de sciences touchant la pédogénèse. Un institut international de pédogénèse apporterait des réponses aux problèmes actuels de désertification, d'érosion des sols, de disparition irrémédiable de la forêt sous tous les cieux.

13.1- De la philosophie à la physique

142 • La physique de Newton, ayant défini le temps comme étant égal en aval comme en amont, apporta une confiance sans égale dans les sciences et particulièrement celles de l'ingénieur. C'est la source du développement de l'industrie du capitalisme et de la science sous tous

ses angles. La pérennité des oeuvres. tirant l'Homme de sa condition précaire, ouvrait des portes sur l'avenir telles que nous ne l'avions jamais connu. Toutefois, Einstein, Bohr, Plank et autres modifièrent cet optimisme béat en donnant naissance avec Curie à la physique des particules qui devait bouleverser nos connaissances de l'univers en montrant que l'espace est courbe et que le temps peut être contracté dans certaines conditions.

143 • Nous désirons attirer l'attention sur le fait que la foresterie a des temps qui ne sont pas du même ordre que l'agriculture. Si l'agriculture fait abstraction du temps, la foresterie y est astreinte quelquefois à l'échelle de millénaires. C'est ici que le bât blesse puisque nous en sommes venus à traiter la forêt comme l'agriculture alors que tous les mécanismes présidant à sa métastabilité sont astreints à des temps et des cycles divers, dont le résultat est la pérennité, non pas l'éternité.

144 • L'objet principal de ce travail est d'attirer l'attention sur l'importance de la connaissance de la physique et des tendances actuelles qui vacillent souvent entre physique et philosophie. Si nous avons pû démontrer avec assez de clarté cet avancé, tout n'est pas perdu et nous pouvons faire beaucoup encore. Il nous faut admettre que, depuis un demi-siècle, nous nous sommes plongés dans la récolte de données, oubliant de discuter et de renouveler nos idées sur le monde, dans la mesure du développement auquel nous sommes soumis.

145 • Le temps nous semble venu de revoir nos idées sur l'univers dont la flèche du temps nous indique, comme le souligne Prigogine, que ce dernier est irréversible. Nous sommes condamnés à évoluer et à nous redéfinir; la forêt n'échappe pas à cette règle alors qu'il est possible à l'agriculture de s'y soustraire en disparaissant tout simplement. Il n'est pas inutile de revoir nos concepts fondamentaux à la lumière d'une réflexion collective et profonde. Cet exercice n'est pas étranger à cette manière de voir le millénaire qui s'achève et celui qui se profile à l'horizon.

Glossaire

- aggradation:** néologisme indiquant l'évolution d'un processus par enrichissement, l'inverse de la dégradation.
- agrégats:** ensemble de particules reliées les unes aux autres par un ciment d'origine biologique, la base de la structure du sol . C'est la base de la dynamique servant également de nourriture à la vie microbienne.
- agroforesterie:** techniques de production agricoles sous couvert forestier mais également sur des sols agricoles modifiés par les BRF.
- allochtone:** qui vient d'ailleurs. Se dit des arbres d'origine étrangère remplaçant les arbres indigènes.
- argilo-humique:** complexe comprenant un mélange d'humus et d'argile, la base des agrégats, eux-mêmes responsables de la fertilité des sols.
- Basidiomycètes:** familles de champignons à chapeaux dont un grand nombre sont comestibles et qui se développent en forêt. Ils sont les principaux agents de l'utilisation de la lignine en la dépolymérisant sans briser les noyaux benzéniques.
- benzéniques (noyaux):** se dit également *cycle*. Molécule de base hautement énergétique se rapportant au benzène. Se dit également aromatique.
- biosurplus:** néologisme couvrant l'ensemble des résidus ligneux après l'exploitation de la forêt. Il s'agit d'un matériel biologique de base et qui n'a rien à faire d'être comparé aux déchets ou aux «*debris*» come le veut la langue anglaise.
- biodiversité:** caractérisation d'un état où les formes de vie sont diverses et en harmonie entre elles. Exemple: la forêt feuillue est la plus diversifiée dans sa faune et sa flore.
- biomasse microbienne:** ensemble des êtres microscopiques vivant dans le sol.
- BRF:** Bois Raméal Fragmenté. Bois de rameaux riche en nutriments dont le diamètre est inférieur à 7 cm et caractérisés par une lignine jeune, peu polymérisée, associée directement à des systèmes biochimiques d'une grande complexité, une transition vers le bois caulinair (tronc).
- broyage:** techniques qui permettent, à l'aide de machines spécialisées, de réduire le bois en particules; on dit également fragmentation.
- climacique:** adjectif permettant de caractériser tous les phénomènes dérivant du climax.
- climax:** se dit des populations végétales en équilibre avec tous les facteurs du milieu et se perpétuant de la sorte.
- compost:** provient de matières organiques diverses soumises à l'attaque microbienne qui en détruit la structure avec émission de chaleur, rendant les nutriments disponibles aux plantes.
- coniférienne (forêt):** forêt composée principalement de conifères ou résineux. Exemple: la sapinière, la pinède, la cédraie, etc.
- déchetaire:** adjectif désignant tout ce qui a trait aux déchets.
- dégradation:** ensemble de phénomènes caractérisant la perte d'intégrité d'une substance ou d'une situation avec une réduction des valeurs énergétiques.
- dépolymérisation:** phénomène propre à la chimie organique par lequel des molécules complexes se scindent en leurs éléments de base.
- désertification:** ensemble des actions de l'homme et de la nature aboutissant à la formation d'ensembles biologiques figés par certains facteurs limites, dont l'eau est le plus important.

- écosystème:** système biologique permettant à des êtres vivant de différents niveaux de vivre en harmonie selon des cycles plus ou moins rapprochés.
- écoviabilité:** néologisme illustrant la nécessité de l'harmonie et des cycles bouclés avec ou sans référence à la productivité dans tous les domaines de la vie
- enthalpie:** terme tiré de la thermodynamique désignant la somme de l'énergie interne sans référence à sa dispersion.
- entropie:** terme de la thermodynamique qualifiant l'état de désordre d'un système évoluant vers un autre.
- enzymes:** molécules à structures complexes d'origine protéique qui aide, accroît ou permet des réactions très difficiles ou impossibles autrement.
- fertilisants:** produits d'origine chimique ou organique dont l'utilisation en agriculture a pour but d'augmenter la fertilité du sol et la productivité des cultures.
- fertilité:** elle est caractérisée par les flux ordonnés et équilibrés à la fois des nutriments chimiques et biochimiques, mais également de l'eau avec les transferts énergétiques appropriés en fonction de la demande, elle-même régie par les variations climatiques.
- feuillue (forêt):** ensemble d'arbres Phanérogames Dicotylédones à feuilles décidues ou persistantes formant une forêt.
- flore:** ensemble de plantes autotrophes caractérisant une séquence topographique, une région, ou un pays. Exemple: la flore du Québec, la flore riparienne du Saint Laurent. la flores des Praires canadiennes. Le terme s'applique également aux individus hétérotrophes possédant un système digestif. Exemple, la flore du rumen chez les Bovidés.
- fragmentation:** action par laquelle les rameaux sont réduit en fragments ou en copeaux en menuiserie.
- fulvique (acide):** l'un des deux acides à faible poids moléculaire produits par la dépolymérisation de la lignine sous l'action de la lignoperoxydase dépendante du manganèse ou de la laccase produites par les Basidiomycètes. C'est l'un des éléments fondamentaux de la pédogénèse.
- gaiacyle:** se dit de la lignine propre aux conifères ne possédant qu'un groupement méthoxyle sur les cycles benzéniques.
- humification:** processus naturel par lequel les débris végétaux sont transformés en humus.
- humique (acide):** composé chimique à haut poids moléculaire issu de la dépolymérisation de la lignine, principal agent de la pédogénèse.
- humus:** une substance noire ou brune riche en dérivés de la lignine, polyphénols, tanins, et nutriments à la base de la formation des sols, des tourbes, etc...
- hypogé:** qui signifie en dessous par opposition à épigé qui signifie en dessus.
- matière organique:** terme générique d'une grande ambiguïté qui fait référence aux débris organiques dans le sol sans référence précise à l'humus et à l'humification.
- métastabilité:** phénomène physique par lequel la stabilité est acquise par la complexité qui en même temps rend les phénomènes fragiles, comme la vie à titre d'exemple.
- minéralisation:** processus de dégradation permettant de concentrer les nutriments chimiques sous l'action de microorganismes dans le sol.
- monocotylédones:** groupe de plantes vasculaires caractérisées par la présence d'un seul cotylédon à la germination de la graine formant le groupe des plus importantes plantes cultivées d'importance alimentaire. Exemple; le blé, le maïs, le riz, l'avoine, le seigle, l'orge, le sorgho, la canne à sucre, etc...

- monomères:** molécule organique simple pouvant donner naissance à des complexes par polymérisation, c'est-à-dire par des liens nouveaux contribuant à former un ensemble où cette molécule est répétée de très nombreuses fois..
- morphologie (sol):** forme que prend le sol à cause de sa texture et de sa structure et lui conférant ainsi des propriétés physiques et biologiques particulières.
- nutriments:** ensemble des minéraux et des produits organiques servant à la croissance des plantes.
- pédogénèse:** ensemble de processus d'origine naturelle permettant la constitution d'un sol et d'en maintenir les caractéristiques à l'intérieur d'une certaine dynamique. Ceci permet la régulation des nutriments nécessaires à la croissance des plantes et au maintien des équilibres biologiques hypogés et épigés.
- podzols:** terme d'origine russe caractérisant les sols possédant un horizon cendré éluvial associé à une litière fibreuse, propre aux forêts résineuses. De nombreux phénomènes chimiques, biochimiques et biologiques en sont responsables.
- polyphénols:** ensemble de composés dérivés du phénol et formés de noyaux benzéniques.
- régénération:** processus naturel par lequel la forêt se régénère tant par voie de semis que de rejets en association avec la végétation et la faune caractéristique.
- rhizosphère:** la partie du sol prospectée par les divers systèmes racinaires des plantes formant l'écosystème épigé.
- septa:** membrane qui sépare deux cellules ou deux cavités
- syringyle:** se dit de la lignine propre aux feuillus possédant deux groupements méthoxyles sur un cycle benzénique offrant une symétrie.
- tellurien (ne):** qui caractérise le sol vivant
- trophiques (chaînes):** terme par lequel on désigne l'ensemble des plantes et des animaux qui participent à la transformation des tissus végétaux et au transfert des nutriments et de l'énergie du sol vers les plantes.

Bibliographie

- Allen, T. F. H. and Starr, T.B. (1982) «Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity», University of Chicago Press, Chicago.
- Aman, S., Depatie, S. Furlan, V. & Lemieux, G. (1997) «Effects of chopped twig wood (CTW) on maize growth and yields in the forest-savanna transition zone of Côte d'Ivoire» Sous presse.
- Amaranthus, M. P. & D. A. Perry. (1988) «Interaction between vegetation type and madrone soil inocula in the growth, survival and mycorrhizal formation of Douglas-fir». *Can. J. For. Res.*
- Amaranthus, M. P. and D. A. Perry (1987) «The effect of soil transfers on ectomycorrhizal formation and the survival and growth of conifer seedlings on old, none reforested clear-cuts». *Can. Jour. For. Res.* **17**: 944-950.
- Amaranthus, M. P., Li, C.Y. and Perry D. A. (1987) «Nitrogen fixation within mycorrhizae of Douglas-fir seedlings». Page 79 in D.M. Sylvia, L.L.

- Hung and J.H. Graham eds. *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical Applications and Research Priorities*. University of Florida, Gainesville.
- Anderson, J. M. (1988)** «Spatio-temporal effects of invertebrates on soil processes» *Biol. Fertil. Soils*. 6 : 216-227.
- Anderson, J. M., S. A. Huish, P. Ineson, M. A. Leonard and P. R. Splatt (1985)** «Interactions of invertebrates, microorganisms and tree roots in nitrogen and mineral element fluxes in deciduous woodland soils» Pages 377-392 in A.H. Fitter, D. Atkinson, D.J. Read and M.B. Ushers eds. *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford UK.
- Anderson, R. V., Coleman, D. C. & Cole, C.V. (1981)** «Effects of saprotrophic grazing on net mineralization» In Clark F.E. & Rosswall T. edit. *Terrestrial nitrogen cycles*. *Ecol. Bull.* 33 : 210-216.
- Bachelier, G. (1978)** «La faune des sols, son écologie et son action». Document technique n° 38. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outremer (ORSTOM), route d'Aulnay, 93140 Bondy, France, 391 pages.
- Beauchamp, C. (1993)** «La caractérisation et la valorisation agricole des BRF et leurs impacts sur le sol et les cultures» In *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec. (Canada) 187 pages, ISBN 2-550-28792-4, page 42-49
- Borchers, S. and D. A. Perry (1987)** «Early successional hardwoods as refugia for ectomycorrhizal fungi in clearcut Douglas-fir forests of southwest Oregon». Page 84 in D.M. Sylvia, L.L. Hung and J.H. Graham eds, *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical applications and Research Priorities*. University of Florida Gainesville.
- Borman, F. H. & Likens, G. E. (1979)** «Pattern and Process in a Forested Ecosystem». Springer Verlag, New York,
- Bouché, M.B. (1981)** «Contribution des Lombriciens aux migrations d'éléments dans les sols tempérés» In *Migrations organo-minérales dans les sols tempérés, Colloques Internationaux du CNRS n° 303* Nancy 24-28 septembre 1979 Éditions CNRS Paris pp. 145-154
- Clarholm, M. (1985)** «Possible roles for roots, bacteria, protozoa and fungi in supplying nitrogen to plants». Pages 355-365 in A.H. Fitter, D. Atkinson, D.J. Read and M.B. Usher eds, *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford UK.
- Coleman, D. C. (1985)** «Through a ped darkly: an ecological assessment of root-soil-microbial-faunal interactions». Page 1-21 in A.H. Fitter, D. Atkinson, D.J. Read and M.B. Usher eds, *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford UK.

- Dommergue, S. Y. & Mangenot, F. (1970)** «Écologie microbienne du sol» Masson édit. Paris, 796.
- Dordick, J. S., Marletta, M. A. et Kilbanov, A. M. (1986)** «Peroxidases depolymerise lignin in organic media but not water». Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **83**: 6255-6257.
- Duchaufour, P. & Jacquin, F. (1975)** «Comparaison des processus d'humification dans les principaux types d'humus forestiers» Science du Sol **1**:: 29-36.
- Duchaufour, P. & Toutain, F. (1985)** «Apport de la pédologie à l'étude des écosystèmes» Bull. Écol. **17**:(1) p 1 à 9.
- Duchaufour, P. (1974)** «Le climax du sol forestier» in Écologie Forestière P. Pesson édit, Gauthier-Villars, Paris, p. 129-134.
- Duchaufour, P. (1980)** «Écologie de l'humification et pédogénèse des sols forestiers» L'Actualité d'Écologie Forestière, P. Pesson édit. Gauthier-Villars, Paris p.177-201.
- Duchaufour, P. (1991)** «Pédologie: sol, végétation, environnement» Masson édit, Paris 3^{ième} édition 189 pages.
- Erikson, K. E. L., Blanchette, R. A. & Ander, P. (1990)** «Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components». Spingler-Verlag, Berlin, 407 pp.
- Flaig, W. (1972)** «Contribution of soil organic matter in the system soil-plant». In: Krumbein, W.E. éditeur. "Environmental Biogeochemistry" , vol 2, Ann Arbor Science Pub., USA.
- Fogel, R. and G. Hunt (1983)** «Contribution of mycorrhizae and soil fungi to nutrient cycling in a Douglas-fir ecosystem». Can. Journ. For. Res. **13**: 219-232.
- Frontier, S. & Pichot-Viale, D. (1993)** «Écosystèmes: structure fonctionnement, évolution» Masson, édit. Paris 2^{ième} édition, 447 p.
- Garcia, S., Latge, J. P., Prévost, M. C. & Leisola, M. S. A. (1987)** «Wood degradation by white-rot fungi: cytochemical studies using lignin peroxidase-immunoglobulin-gold-complex», Appl. Environ. Microbiol. **53** : 2384-2387.
- Glenn, J. K. & Gold, M. H. (1985)** «Purification and characterization of an extracellular Mn (II) -dependent peroxidase from the lignin-degrading by the Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium* ». Arch. Biochem Biophys. **242**: 329-341
- Godron, M. & Lemieux G. (1996)** «Les cycles de la "matière organique forestière"» in Lemieux «Rapport des missions internationales de 1996...» pp 166 à 185. ISBN 2-921728-22-2.
- Gosz, J. R. & Fisher, F. M. (1984)** «Influence of clear-cutting on selected microbial processes in forest soils» in *Current Perspectives in Microbial Ecology*, Proceedings of the Third International Symposium on Microbial Ecology (Klug, M.J. & Reddy, C.A. éditeurs), pp. 523-530.

- Gosz, J. R., Holmes, R. T., Likens, G.E. & Bormann F. H. (1978)** «Le flux d'énergie dans un écosystème forestier». in *Pour la Science*, juin 1987 pp. 101-110.
- Guay, E., Lachance, L. & Lapointe R.A. (1982)** « Emploi des bois raméaux fragmentés et des lisiers en agriculture» Ministères de l'Énergie et des Ressources, 74 pages, Québec
- Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)** «Ensemble des données sur le dispositif "Moulin" de 1984 à 1991. Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux. Département des Sciences Forestières, Université Laval, 212 pages.
- Hintikka, V., (1982)** «The colonisation of litter and wood by basidiomycetes in Finnish forest». In: (Frankland, J.C., Hedger, J.N. & Swift, M.J. éditeurs), *Decomposer basidiomycetes, their biology and ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 227-239.
- Ingham, R. E., J.A. Trofymow, E. R. Ingham and D. C. Coleman (1985)** «Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers; effects on nutrient cycling and plant growth». *Ecol. Monogr.* **55**: 119-140.
- Janos, D. P. (1988)** «Mycorrhiza applications in tropical forestry: are temperate-zone approaches appropriate?» Pages 133-188 in S.P. Ng ed. *Tress and Mycorrhiza*. Forest Research Institute, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Jones, A. & O'Carroll L. (1989)** «Biotechnological modification of lignin». Alberta Research Council, Technical Report, Edmonton, Canada, 18 pages photocopiées.
- Kirk, T. K. & Farrell, R. L. (1987)** «Enzymatic combustion: The microbial degradation of lignin». *Ann. Rev. Microbiol.* **41**: 465-505.
- Kirk, T. K. & Fenn, P. (1982)** «Formation and action of ligninolytic system in Basidiomycetes). in: *Decomposer Basidiomycetes: their Biology and Ecology* (Franklin, J.C., Hegger, J.N. & Swift, M.J. éditeurs) p. 67-90, Cambridge Univ. Press.
- Lalande, R.L., Furlan, V. & Angers, D.A. (1997)** «Changes in microbial population and biological activity following addition of Ramial Chipped Wood on a sandy loam soil» sous presse dans l'*American Journal of Alternative Agriculture*.
- Larochelle, L. (1993)** «L'influence de la qualité des bois raméaux fragmentés (BRF) appliqués au sol: effets sur la dynamique de leur transformation». In "Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés" édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec.(Canada) 187 pages, ISBN 2-550-28792-4 FQ94-3014, p. page 77-84.

- Larochelle, L., Pagé, F., Beauchamp, C., & Lemieux, G. (1993)** «La mésofaune comme indicateur de la dynamique de la transformation de la matière ligneuse appliquée au sol». *AGROSOL* 6 (2): 36-43.
- Leatham, G. F. & Kirk, T.K. (1982)** «Regulation of lignolytic activity by nutrient nitrogen in white-rot basidiomycetes». *FEMS Microbiol. Lett* 16: 65-67.
- Leisola, M. S. A & Garcia, S. (1989)** «The mechanism of lignin degradation» in *Enzyme systems for lignocellulose degradation*.- Atelier tenu à Galway, Irlande dans le cadres de la Communauté économique européenne
Publié par Elsevier Applied Science pp.89-99
- Leisola, M., & Waldner, R. (1988).** «Production, characterization and mechanism of lignin peroxidases». In: Zadrazil, F., Reiniger, P. éditeurs., *Treatment of lignocellulosics with white rot fungi*. Elsevier Appl. Sci. Pub, New York. p. 37-42.
- Lemieux, G (1993)** «Rapport de mission au Sénégal du 5 au 15 décembre 1992 pour le compte de l'Agence Canadienne de Développement International» Université Laval, 25 pages.
- Lemieux, G. & Lapointe, R. A. (1986)** «Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol». Département des Sciences Forestières Université Laval, Québec, 17 pages. ©ISBN 2-550-21338-1.
- Lemieux, G. & Lapointe, R. A. (1988)** «L'importance du bois raméal dans la "synthèse" de l'humus». Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, 29 pages. ISBN 2-550-21341-6.
- Lemieux, G. & Lapointe, R. A. (1989)** «La régénération forestière et les bois raméaux fragmentés: observations et hypothèses». Département des Sciences Forestières de l'Université Laval, Québec, 223 pages. ISBN2-550-21342-4.
- Lemieux, G. & Lapointe, R. A. (1990)** «Le bois raméal et la pédogénèse: une influence agricole et forestière directe». Département des Sciences Forestières, Université Laval et Ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts) Québec. 35 pages. ISBN 2-550-21267-3.
- Lemieux, G. & Marciano, J. (1994)** «Informe sobre la mision realizada en la República Dominicana del 24 abril al 8 mayo 1994» Université Laval ISBN 2-921728-06-0 -1994.
- Lemieux, G. & Tétreault, J.-P. (1993)** «Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés». Édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université Laval, Québec, Canada, 187 pages. ISBN 2-550-28792-4,
- Lemieux, G. & Toutain, F. (1992)** «Quelques observations et hypothèses sur la diversification:l'aggradation des sols par l'apport de bois raméal fragmenté» Université Laval, Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux publication no. 23 ,ISBN 2-550-26540-8 13. pages.

- Lemieux, G. (1985)** «Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté» Université Laval, Faculté de Foresterie, 109 pages.
- Lemieux, G. (1986)** «Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol» Université Laval, Faculté de Foresterie 17 pages, ISBN 2-550-21338-1.
- Lemieux, G. (1991)** «La perte de nutriments par la récolte des grumes: une absurdité» *traduction et commentaires de B. Freedman: «Nutrient Removals during Forest Harvesting: Implications for Site Fertility» traduction en langue française et commentaires publication n° 20* ISBN 2-550--22280-6.
- Lemieux, G. (1995)** «La dynamique de l'humus et la méthode expérimentale: l'apport de la forêt à l'agriculture par le bois raméal fragmenté». Texte présenté à la conférence constitutive du Réseau Africain du Compost, Dakar, 26 avril. Université Laval, Québec, 13 pages, ISBN 2-921728-12-5..
- Lemieux, G. (1995)** «Passer de l'enthalpie à l'entropie». *Écodécision*, hiver 1995, pp. 72-73, Royal Society of Canada Université Laval, Québec
- Lemieux, G. (1995)** «Rapport de mission en Afrique (Sénégal)». ACIDI et Université Laval, décembre 1994, 48 pages, ISBN 2-921728-08-7.
- Levy, J. F. (1979)** «The place of Basidiomycetes in the decay of wood in contact with the ground». In (Frankland, J.C., J.N., Hedger & Swift.M.J. éditeurs.) *“Decomposer Basidiomycetes: Their biology and ecology”*. 346 pp., Cambridge University Press. Cambridge.
- Lewis, N. G., Razal, R.A. & Yamamoto, E. (1987)** «Lignin degradation by peroxidase in organic media: a reassessment». *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 7925-7927.
- Lynch, J. M. & Bragg, E (1985)** «Microorganisms and soil aggregate stability». *Adv. Soil. Sci.* 2: 133-171.
- Malloch, D. W., K. A. Pirozynski and P. H. Raven (1980)** «Ecological and evolutionary significance of mycorrhizal symbioses in vascular plants». *Proc. Natl. Acad. Sci.* 77: 2112-2118.
- Martin, W. C., Pierce, R. S., Likens, G. E. & Bormann F. H. (1986)** «Clearcutting Affects Stream Chemistry in the White Mountains of New Hampshire». USDA Northeastern Forest Experiment Station Research Paper NE-579.
- Meyer, J. R. and R. G. Linderman (1986)** «Selective influence on population of rhizosphere or rhizoplane bacteria and actinomycetes by mycorrhizas formed by *Glomus fasciculatum*». *Soil Biol. Biochem.* 18: 191-196.
- Michaud, M. (1993)** «Les bois raméaux fragmentés: un amendement organique pour les sols en production horticole» In *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des

- Sciences forestières, Université Laval, Québec. (Canada) 187 pages, ISBN 2-550-28792-4, page 49 à 55
- Olsen, R. A., R. B. Clark and J. H. Bennet (1981)** «The enhancement of soil fertility by plant roots». *Am. Sci.* **69**: 378-384.
- Pagé, F. (1993)** «L'apport des bois raméaux en sols cultivés: le rôle de la pédofaune sur la transformation de la matière ligneuse». In *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec. (Canada) 187 pages, ISBN 2-550-28792-4, p. 68-76.
- Parkinson, D. (1988).** «Linkage between resource availability, microorganisms and soil invertebrates». *Agriculture, Ecosystems and Environment.* **24**: 21-32.
- Perry, D. A., Amaranthus. M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989)** «Bootstrapping in Ecosystems» *BioScience* **39 (4)**: 230-237.
- Perry, D.A., Molina, R., & Amaranthus M.P. (1987)** «Mycorrhizae, mycorrhizosphere, and reforestation: current knowledge and research needs». *Can. Journ. For. Res.***17**: 929-940.
- Prigogine I. (1996)** «La fin des certitudes» 223 pages édit. Odile Jacob, Paris ISBN2-7381-0330-8
- Prigogine, I. & Stenger, I. (1988)** «Entre le temps et l'éternité» édit Fayard, Paris.
- Rambelli, A. (1973)** «The rhizosphere of mycorrhizae». Pages 229-249 in A.C. Marks and T.T. Kozlowski, eds. *Ectomycorrhizae: Their Ecology and Physiology.* Academic Press London.
- Ranger, J. & Bonneau, M. (1984)** « Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de la forêt. I- Le cycle biologique en forêt» *Rev. For. Fr.* **2** : 93-112.
- Ratnayake, M. Leonard, R.T. & Menge, J. A. (1978)** «Root exudation in relation to supply of phosphorus and its possible relevance to mycorrhizal formation». *New Phytol.* **81**: 543-552.
- Rayner, A. D. M & Boddy, Lynne (1988)** «Fungal Decomposition of Wood». John Wiley & Sons. 597 p.
- Reid, C. P. P. and J. G. Mexal (1977)** «Water stress effects on root exudation by lodgepole pine». *Soil Biol. Biochem.* **9**: 417-422.
- Rouquerol, T., Bauzon, D, & Dommergues, Y. (1975)** «Les ectomycorhizes et la nutrition azotée et phosphatée des arbres» Congrès DGRST, mai 1975.
- Sauvesty, A., Pagé, F. & Giroux, M. (1993)** «Impact des milieux pédologiques en bosses et creux sur les teneurs en composés phénoliques et en éléments minéraux dans les feuilles d'érable à sucre en dépérissement au Québec» *Can. Jour. For. Res.* **23**: 190-198.

- Seastedt, T.R. (1984)** «The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes» *Ann. Rev. Entomol.* **29**: 25-46
- Seck, M.A. & Lemieux G. (1996)** «Fertilisation organique par l'utilisation des Bois Raméaux Fragmentés (BRF) de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraîchères des Niayes (Sénégal)» Conférence de l'IFOAM, Copenhague, Danemark août 1996 Université Cheikh Anta Diop Dakar, 19 pages. Publication n° 69 GCBR Université Laval, Québec, Canada
- Seck, M.A. (1993)**«Essais de fertilisation organique avec le bois raméal fragmenté de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraîchères des Niayes (Sénégal)» In *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec. (Canada) 187 pages, ISBN 2-550-28792-4 age 36 à 41.
- Seck, M.A. (1994)** «Appui au développement pour les maraîchers des Niayes (Sénégal) in Lemieux, G, «*Rapport de mission africaine au Sénégal du 2 au 13 décembre 1994*» page 1 à 12, Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, éditeur, et Agence Canadienne de Développement International ISBN 2-921728-08-7, 48 pages.
- Smith, W.B., Faulkner, J.L. & Powell D.S. (1994)** «Forest Statistics of the United States, 1992 metric units» General Technical Report NC-168 145 pages.
- Stott, D. E., G. Kassim, M. Jarrell, J. P. Martin & Haider, K. (1993)** «Stabilisation and incorporation into biomass of specific plant carbons during biodegradation in soil». *Plant and Soil* **70**:15-26.
- Swift, M. J. (1976)** «Species diversity and structure of microbial communities» in (J.M. Anderson & A. MacFaden, éditeurs) -*Decomposition processes*- Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 185-222.
- Swift, M. J. (1977)** «The role of fungi and animals in the immobilisation and release of nutrient elements from decomposing branch-wood». In *Soil Organisms as Components of Ecosystems* (Lohm, U. & Persson, T. éditeurs) p. 193-203. *Ecol. Bull.* **25** Swedish Natural Science Research Council, Stockholm.
- Swift, M. J., Heal, O. W., & Anderson, J.M. (1979)** «The influence of resource quality on processes». in *Studies in Ecology, vol.5. •Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Univ. of California Press Berkeley, p 118-167.
- Tate, R.L. (1987).** «Soil organic matter: biological and ecological effects». 291pp. Wiley-Interscience Pub. New York. USA
- Thomas-Bauzon, Kiffer, E., Janin G. & Toutain, F. (1995)** «Méthodologie de recherche des bactéries cellulolytiques diastrophes appliquée à *Sphaerothermes sphaerotorax*. *Science de la Vie/Life Science* **318**:699-707.

- Thomas-Bauzon, Kiffer, E., Pizelle, G. & Petitemange, E. (1990)** «Fixation d'azote et cellulolyse: activités de la nitrogénase et/ou de la cellulase d'organismes fixateurs d'azote et/ou cellulolytiques. Presses de l'Université de Nancy, 89 pages.
- Tien, M., & Kirk, T. K. (1983)** «Lignin-degrading enzyme from Hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium*» *Burds. Science* **221**: 661-663.
- Tissaux, J.-C. (1996)** «Une revue bibliographique des principaux mécanismes pédogénétiques pour caractériser le rôle du bois raméal fragmenté (BRF) dans le processus d'humification» Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université Laval, Québec publication no. 60, 34 pages ISBN 2-921728-18-4.
- Toutain, F. (1996)** «Les entretiens de Nancy» in Rapport des missions internationales de 1996 Lemieux, G. éd. Université Laval, Québec, Canada p. 186-191 ISBN 2-921728-22-2, 284 pages.
- Toutain, F. (1981)** «Les humus forestiers, structures et modes de fonctionnement» *Rev. For. Fr.* **6**: 449-464.
- Toutain, F. (1993)** «Biodégradation et humification des résidus végétaux dans le sol: évolution des bois raméaux (étude préliminaire)» In "Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés" édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec.(Canada) ISBN 2-550-28792-4 p. 103-110.
- Trappe, J. M. (1962)** «Fungus associates of ectotrophic mycorrhizae». *Bot. Rev.* **28**: 538-602.
- Tremblay, Y. (1985)** «Essais comparatifs de l'utilisation de la biomasse forestière et du lisier de porc dans la culture des pommes de terre par le compostage de surface avec apports variables d'engrais de synthèse» Rapport interne, Ministère de l'Agriculture du Québec 8 pages.
- Vaughan, D. & Ord, B. G. (1985).** «Soil organic matter : a perspective on its nature, extraction, turnover and role in soil fertility». In: (Vaughan, D & Malcolm R.E., éditeurs) "*Soil Organic Matter and Biological Activity*". pp. 469. Martinus Nijhoff & W. De Junk Pub., Dordrecht, Hollande.
- Vicuna, R. (1988)** «Bacterial degradation of lignin». *Enzyme Microb. Technol.* **10** : 646-655.
- Vogt, K. A., C.C. Grier and C.E. Meier (1982)** «Mycorrhizal role in net primary products and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington». *Ecology* **63**:370-380.
- Whipps, J. M. and J.M. Lynch (1986)** «The influence of the rhizosphere on crop productivity». *Adv. Microb. Ecol.* **9**:187-244.

ISBN 2-921728-23-0

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 1997

novembre 1997

publication n° 70

édité par le

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

UNIVERSITÉ LAVAL

Québec G1K 7P4

QUÉBEC

Canada

courriel: gilles.lemieux@sbf.ulaval.ca

<http://forestgeomat.ffg.ulaval.ca./brf/>

FAX (418) 656-5262

tel. (418) 656-2131 poste 2837

ISBN 2-921728-23-0