

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté de Foresterie et de Géomatique

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

à la demande du
Ministère des Forêts
de Colombie Britannique
Victoria
Canada

**«Les fondements pédogénétiques des écosystèmes
forestiers: une approche
de la métastabilité par la biologie tellurienne»**

par le
Professeur Gilles Lemieux
Département des Sciences du Bois et de la Forêt

avril 1997

Publication n° 71

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

publié par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

UNIVERSITÉ LAVAL
Département des Sciences du Bois et de la Forêt
Québec G1K 7P4
QUÉBEC
Canada

SOMMAIRE

	PAGE
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>1- LE SOL PARMIS LES VALEURS FONDAMENTALES DE L'HOMME</u>	2
1.1 - Une expérience inusitée, d'abord agricole	2
1.2 - L'expérimentation forestière	5
<u>2- LES CRITÈRES D'ÉVALUATION</u>	6
2.1 - Le pH et l'accessibilité aux nutriments	6
2.2 - L'exemple de <i>Picea glauca</i>	7
2.3 - Des remarques sur le comportement de <i>Picea glauca</i> dans les parcelles témoins	8
2.4 - <i>Abies balsamea</i> : l'instabilité de la survie des semis et le peu de réceptivité des parcelles	10
2.5 - Les feuillus engendrent les feuillus	12
2.6 - La permisivité des parcelles	12
<u>3 - LES PREMIÈRES DÉDUCTIONS ET COMMENTAIRES</u>	14
3.1 - Nous sommes des prisonniers intellectuels du productivisme	15
3.2 - La pédogénèse, un ensemble de mécanismes universels d'abord d'origine forestière	15
3.3 - L'universalisme de la pédogénèse nous convie sous les tropiques	16
<u>4 - LA COMPOSITION ORGANIQUE DU BOIS ET SON APPORT À LA MÉTASTABILITÉ PAR LA VOIE DE LA PÉDOGÉNÈSE</u>	17
4.1 - Une première liaison avec la genèse des sols	18
4.2 - Une estimation des volumes de BRF produits: certainement des milliards de tonnes annuellement	19
4.3 - Les dérivés de la lignine: polyphénols, acides aliphatiques, terpènes.. les bases mêmes de la formation des sols et de leur dynamique	20
4.4 - La connaissance de la lignine et de la pédogénèse se manifeste par l'étude des phénomènes de décomposition et de dégradation	22
<u>5- «MATIÈRE ORGANIQUE» UN TERME SANS CONCEPT NI DÉFINITION POSSIBLE</u>	22
5.1 - Les premières références à l'humification	22
5.2 - L'évolution de la compréhension actuelle	23
5.3 - Décomposition et dégradation: une évocation par la négative	23

Les fondements pédogénétiques des écosystèmes forestiers: une approche de la métastabilité par la biologie tellurienne

INTRODUCTION

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.

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*.

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.

J'espère 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- LE SOL PARMIS LES VALEURS FONDAMENTALES DE L'HOMME

Les deux dernières décennies ont apporté subrepticement des données qui, mises en perspective, apportent une vue et une compréhension de la vie des écosystèmes dont les fondements étaient pour le moins anthropocentriques et n'avaient fait l'objet de peu d'études et de peu de contestations jusque là. Devant vivre et, de ce fait manger, les hommes n'ont porté que peu d'attention à la base et le lien avec toutes les formes de vie terrestre: le sol. Il n'y a guère plus d'un siècle que le terme *humus* fit son apparition très certainement d'origine anthropocentrique, mais où la notion de vie n'apparaît qu'en filigrane.

Bien que la forêt recouvre une large proportion des terres immergées, l'homme s'y est attaqué pour pratiquer la domestication et la culture de plantes dont sa vie individuelle et collective dépendaient et dépendent toujours. C'est ainsi qu'au fil des siècles, nous en sommes venus à considérer le sol agricole comme la source de toutes vies dans l'évolution des sociétés humaines. Toutefois, ces notions s'estompent dans la mesure où nous quittons les tropiques pour nous diriger vers les pôles. Il en va de même des populations humaines vivant de la nature et de ses contraintes par opposition à celles qui vivent des fruits de la nature en contrôlant ses contraintes comme les sociétés industrielles.

1.1- Une expérience inusitée, d'abord agricole.

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 chercheurs¹ 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 (*Abies balsamea* et *Thuja occidentalis*) préalablement fragmentés² 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 de vue chimique et biochimique³. 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.

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.

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

¹Egar Guay, sous-ministre adjoint, Ministère des Forêts, Québec
Lionel Lachance, directeur des Productions Végétales, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Québec.
R. Alban Lapointe, ingénieur forestier, Ministère des Forêts, Québec.

²En Europe, on utilise de préférence le verbe broyer le produit qui en résulte est considéré comme étant un «broyat»

³Guay, 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

importante, je proposais le nom de «bois raméal⁴» ou **BRF (Bois Raméal Fragmenté)** dont je fis la description l'année suivante⁵.

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.

Toutefois deux importantes publications nous mirent sur des pistes fertiles dont la première de **Leisola, M.S.A., & Garcia, S. (1989)**⁶ 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.

La seconde publication fut celle de **Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989)**⁷ 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.

⁴Lemieux, G. (1985) «Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté» Université Laval, Faculté de Foresterie, 109 pages.

⁵ 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.

⁶«Lignin degradation mechanism» in «Enzyme systems for lignocellulose degradation» Atelier portant sur la dégradation de la matière organique, p. 89-99 Galway Ireland,

⁷«Bootstrapping in ecosystems» BioScience 39 (4) 230-237

1.2- L'expérimentation forestière

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.

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 semis 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.

L'expérience agricole montrait que plusieurs paramètres telluriens étaient touchés pendant plus d'une année, toujours en montrant des améliorations physiques, chimiques et physico-chimiques. J'en déduisis que nous étions en présence d'une série de phénomènes biologiques influençant profondément tous les facteurs à la fois. L'hypothèse ainsi posée, toutes ces parcelles devaient être soumises aux mêmes conditions et aux mêmes influences, d'où l'obligation d'avoir de petites parcelles, séparées de moins d'un mètre chacune pour mieux évaluer les variations dans leur développement après l'application des traitements.

2-LES CRITÈRES D'ÉVALUATION

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.

Notre travail de 1989⁸ 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

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

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.

⁸ Lemieux, G. & Lapointe R.A. (1989) La régénération forestière et les bois raméaux fragmentés: observations et hypothèses» Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada, Canada 223 pages ISBN 2-550-21342-4.

Les autres paramètres que nous avons choisis 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.

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 hypogé⁹.

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 semis 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 *Picea glauca*

Voici donc les résultats obtenus des semis 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 .

⁹Fogel, R. & Hunt G, [1983]), Meyer, J.R. & Linderman, R.G. [1986], Rambelli, A. [1973]), Reid, C.P.P., & Mexal, J.G. [1977], Vogt, K.A., Grier, C.C., & Meir, C.E. [1982], Whipps, J.M. & Lynch, J.M. [1986]

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
résineux					
<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
feuillus de transition					
<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
feuillus climaciques					
<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)¹⁰

2.3- Des remarques sur le comportement de *Picea glauca* dans les parcelles témoins.

Si on examine attentivement les parcelles témoins, on s'aperçoit qu'aucune parcelle (tableau n° 2, première colonne) ne contient de semis de *Picea glauca* 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 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 semis de *Picea glauca* de 1984 à 1990 sur les parcelles traitées avec 17 essences de BRF sur 19.

	84	85	86	87	88	90
BRF						
résineux (2/4)						
<i>Larix laricina</i>				1	4	8
<i>Pinus resinosa</i>					1	1
feuillus de transition (9/13)						
<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
feuillus climaciques (6/8)						
<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)¹⁰

Sur les 25 essences de BRF, seulement 10 montraient des semis dans leurs parcelles témoins. Un recomptage en 1995 montre que tous les semis sont disparus 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 en permanence et que le succès à la germination n'en est pas un gage de persistance. Nous n'avons pas cru bon introduire les données de 1984 et celles de 1995 parce qu'elles sont nulles, seul le relevé de 1990 montre un succès de germination qui sera complètement annulé en 1995, tout comme en 1984.

Répartition des semis de *Picea glauca* dans les parcelles témoins en 1990.

BRF	
Résineux (2/4)	
<i>Larix laricina</i>	8
<i>Pinus resinosa</i>	1

Feuillus de transition (5/13)	
Acer rubrum	2
Acer spicatum	3
Cornus rugosa	2
Populus grandidentata	2
Salix lucida	2
feuillus climaciques (3/8)	
Fraxinus americana	3
Quercus rubra	4
Tilia americana	1

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

2.4- *Abies balsamea*: l'instabilité de la survie des semis et le peu de réceptivité des parcelles

Par opposition à *Picea glauca*, il est intéressant de suivre le comportement du sapin qui montre une impossibilité de s'établir, bien que les semenciers, encore une fois soient, abondants et bien pourvus de semences.

Répartition des

semis d'*Abies balsamea* dans les parcelles
de 1984 à 1990

BRF	84	85	86	87	88	90
résineux (0/4)	-	-	-	-	-	-
feuillus de transition (2/13)						
<i>Alnus rugosa</i>				1	1	0
<i>Cornus rugosa</i>			2	1	1	2
feuillus climaciques (4/8)						
<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 n° 4
 Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)¹⁰

Les parcelles faites de résineux ne permettent pas après 7 années l'installation du sapin, bien qu'au début de la période de végétation des semis germent mais 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 étant inférieures aux premières (*Alnus rugosa*, *Carpinus caroliniana* and *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 semis de feuillus, toutes espèces confondues, dans les parcelles de 1984 à 1990

BRF	84	85	86	87	88	90
résineux(1/4)						
<i>Pinus strobus</i>	-	1	1	1	1	1
feuillus de transition (8/13)						
<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
feuillus climaciques (6/8)						
<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 n° 5

Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)¹⁰

2.5- Les feuillus engendrent les feuillus

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 semis de sapins, 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 recues des BRF de feuillus sont plus aptes 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.**

2.6- La permissivité des parcelles

Le tableau n° 6 montre sans trop d'ambiguïté que les 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.**

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

BRF		résineux	feuillus de transition
feuillus climaciques			
résineux			
<i>Larix laricina</i>	8	-	-
<i>Pinus resinosa</i>	1	-	-
<i>Pinus strobus</i>	-	1	-

12

<i>Thuja occidentalis</i>	-	-	-
feuillus de transition			
<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	-
feuillus climaciques			
<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 n° 6

Extrait de Guay, E., Lachance, L., Lapointe, R.A. & Lemieux, G. (1991)¹⁰

3- LES PREMIÈRES DÉDUCTIONS ET COMMENTAIRES

Comme les premières expériences agricoles³ 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.**

Des revues consécutives de littérature scientifique nous convainquirent davantage que nous entrions dans un champ de la

¹⁰ 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.

science et de la technique qui n'avait fait l'objet que de peu de souci et de curiosité, bien qu'il fût à la base de l'existence de la vie sur terre sous la forme que nous la connaissons actuellement. Nous étions, sans l'ombre d'un doute, en face d'un phénomène naturel qui fait l'objet de recherche depuis plusieurs décennies portant sur l'aggradation¹¹ plutôt que 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.**

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 nous voyons confrontés à devoir expliquer ce que nous mesurons. 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 de pouvoir 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 hypogé⁷.

3.1- Nous sommes des prisonniers intellectuels du productivisme.

Nos réflexions ont porté plus d'une fois sur les raisons pour lesquelles la presque totalité de la littérature forestière et agricole était destinée à comprendre comme il était possible d'augmenter les rendements en évitant les pertes, méthode comptable s'il en est une.

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,

¹¹ Néologisme qui indique à la fois une augmentation de diversité, de productivité et d'activité.

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

Si 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 réalité 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.

Il devient ainsi évident que les techniques développées jusqu'ici tant par l'agriculture que la foresterie qui les copient le plus servilement possible, sont des techniques productivistes qui ne font en rien appel aux mécanismes fondamentaux, mais bien au contraire veulent les court-circuiter pour un plus grand gain immédiat. Ces deux approches font appel à une instabilité croissante plutôt qu'au maintien ou à l'augmentation de la **métastabilité** à laquelle aspire tout écosystème¹² 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 ici tout le débat de la physique actuelle, et en particulier, de la thermodynamique avec

¹² 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.

les travaux de Prigogine¹³. 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.

En raisonnant sur les résultats obtenus sur les différentes parcelles et ceux obtenus quelques années auparavant, nous en sommes venus à la conclusion qu'il nous fallait faire quelques expériences sous les tropiques pour faire la démonstration des mécanismes en cause et de leur efficacité où ni l'eau ou ni la chaleur ne pouvaient être un frein à la manifestation de ce que nous pensions pouvoir obtenir en termes de rendements et de contrôles. C'est au Sénégal, en Afrique, que nous faisons les premiers essais dès 1992¹⁴ et en République Dominicaine en 1994¹⁵. Les premiers résultats qui nous proviennent, montrent au niveau agricole, qu'ils sont les mêmes que ceux que nous avons obtenus. 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.

Une revue de la littérature récente et les résultats que nous obtenons de çà de là nous permettent des raisonnements, des hypothèses voire des conclusions. Ils tissent la trame de fond de la pédogénèse et 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)**³, 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 de**

¹³ Ilya Prigogine, prix Nobel de Chimie et père de la thermodynamique hors équilibre modifiant l'interprétation des lois de Newton et d'Einstein.

¹⁴ 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.

¹⁵ 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.

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

Avant de plonger dans la complexité des problèmes que nous voulons traiter le plus directement et le plus simplement possible, voyons de quoi le « bois », tel que nous l'avons toujours conçu, se présente. Il est notoire et connu depuis fort longtemps 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, avons-nous une différence entre le bois caulinaire¹⁶ et le bois raméal¹⁷, mais nous avons une grande différence entre les sols générés par les résineux et les feuillus.

Tous les travaux que nous avons consultés dans la littérature 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 ici 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.

¹⁶ Néologisme qui désigne le bois de tige ou de tronc, dont la lignine est hautement polymérisée et souvent associé à des écorces contenant des polyphénols, tanins résines avec des taux de manganèse souvent toxiques pour les divers niveaux microbiologiques avec un ratio C/N variant de 400 à 700/1

¹⁷ Néologisme désigné le plus souvent sous trois lettres **BRF** - Bois Raméal Fragmenté à cause de la technique de cyclage biologique utilisée. Il s'agit en partie d'une définition arbitraire voulant que les tiges ayant un diamètre supérieur aient une utilisation comme bois de feu: les rameaux ne doivent pas dépassé 7 cm de diamètre. Ces BRF contiennent la presque totalité des nutriments chimiques et biochimiques de l'arbre avec un rapport C/N variant de 30 à 150/1 en plus d'avoir un taux de lignine supérieur au bois caulinaire et souvent sous forme de monomères.

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 gäiacyle. 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

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 cycliser 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**».

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

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.

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.

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.

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 plutôt une meilleure connaissance de cette molécule pour accélérer 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]¹⁸**, ainsi que **Rayner, & Boddy, [1988]¹⁹**. 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.

Depuis le glucose, il y a formation d'alcool conférylique 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.

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

¹⁸Erikson, K. E. L., Blanchette, R. A. & Ander, P. (1990) «Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components». Spingler-Verlag, Berlin, 407 pp.

¹⁹Rayner, A. D. M & Boddy, Lynne (1988) «Fungal Decomposition of Wood». John Wiley & Sons. 597 p.

métabolisme de la plante et des différents paramètres des chaînes trophiques.

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

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]³, Lemieux, & Lapointe**

[1985]⁴ Lemieux, & Lapointe, [1989]²⁰, Lemieux, & Lapointe, [1990]²¹, ainsi que Lemieux, & Toutain, [1992]²².

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

5.1- Les premières références à l'humification

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**²³. Nous venions de toucher la source même des principes d'**humification**²⁴ 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.

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

²⁰Lemieux, 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. Publication no. ER89-1276.

²¹Lemieux, 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.

²²Lemieux, G. & Toutain, F. (1992) «Quelques observations et hypothèses sur la diversification: l'aggradation des sols par l'apport de bois raméal fragmenté». Université Laval, 13 pages ISBN 2-550-26541-6.

²³Terme largement inspiré par l'agriculture par lequel on qualifie les processus qui visent à transformer en produits chimiques purs les contenus de substances végétales ou animales, qui serviront d'«engrais» pour la culture qui suivra.

²⁴Ensemble de mécanismes par lesquels le sol se structure physiquement et biologiquement donnant ainsi naissance à l'*humus*.

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

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 microbologique, 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

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]**)²⁵. Cet

²⁵Perry, D. A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989) «Bootstrapping in Ecosystems» *BioScience* 39 (4): 230-237.

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

Ces travaux de l'école de Corvallis²⁴, 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

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 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.

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

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]^{26a}** 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

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

²⁶Lemieux, 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.

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. Ici, 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 ici d'une combustion enzymatique mais qui comporte de nombreuses analogies avec la combustion par le feu (Kirk, T.K & Farrell, R.L. [1987])²⁷. 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

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.

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]²⁸, Tien & Kirk, [1983]²⁹, Lewis, Razal, & Yamamoto [1987]³⁰

²⁷Kirk, T. K. & Farrell, R. L. (1987) «Enzymatic combustion: The microbial degradation of lignin». *Ann. Rev. Microbiol.* 41: 465-505.

²⁸Kirk, 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.

²⁹Tien, M., & Kirk, T. K. (1983) «Lignin-degrading enzyme from Hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium*». *Burds. Science* 221: 661-663.

³⁰Lewis, N. G., Razal, R.A. & Yamamoto, E. (1987) «Lignin degradation by peroxidase in organic media: a reassessment». *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 7925-7927.

Leisola, & Waldner [1988]³¹ Leisola & Garcia, [1989]³² et Leatham & Kirk [1982]³³. Toutefois, nous avons été frappés par l'orientation donnée à ces recherches: elles portaient 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 pollueurs importants dans l'industrie des pâtes et papiers. Cette approche "négative" à la compréhension de la lignine n'était pas sans valeur, et tout à fait logique dans l'esprit de notre 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

Le travail qui nous a menés sur la piste de la compréhension a été sans contredit celui du finlandais **Leisola** et du français **Garcia [1989]³¹**. 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.

³¹Leisola, M., & Waldner, R. (1988). «Production, characterization and mechanism of lignin peroxidases». In: Zadrzil, F., Reiniger, P. éditeurs., *Treatment of lignocellulosics with white rot fungi*. Elsevier Appl. Sci. Pub, New York. p. 37-42.

³²Leisola, 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

³³Leatham, G. F. & Kirk, T.K. (1982) «Regulation of lignolytic activity by nutrient nitrogen in white-rot basidiomycetes». *FEMS Microbiol. Lett* 16: 65-67.

Beaucoup de travaux ont porté sur le comportement de nombreux systèmes enzymatiques jouant un rôle fondamental dans la "dégradation" de la lignine. Mentionnons pour mémoire **Dordick, Marletta & Kilbanov [1986]³⁴, Erickson, Blanchette, & Ander [1990]¹⁸ Garcia, Latge, Prévost & Leisola [1987]³⁵ et Jones & O'Carroll, [1989]³⁶.**

Toutes ces publications venaient renforcer les connaissances que nous avons du 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]³⁷, Amaranthus, Li & Perry [1987]³⁸, Hintikka [1982]³⁹, Kirk & Fenn [1982]⁴⁰, Perry, Amaranthus, Borchers, Borchers & Brainerd [1989]²⁴. 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 nous ont apporté des renseignements précieux comme: **Erikson, Blanchette & Ander, [1990]¹⁸, Hintikka [1982]³⁸, Kirk & Fenn [1982]²⁸, Levy, [1979]⁴¹, Rayner & Boddy [1988]⁴², Tate [1987]⁴³, Vaughan & Ord [1985]⁴⁴.****

³⁴Dordick, 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.

³⁵Garcia, 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.

³⁶Jones, A. & O'Carroll L. (1989) «Biotechnological modification of lignin». Alberta Research Council, Technical Report, Edmonton, Canada, 18 pages polycopiées.

³⁷Amaranthus, 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.

³⁸Amaranthus, 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.

³⁹Hintikka, 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.

⁴⁰Kirk, 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.

⁴¹Levy, 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.

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

Tous les auteurs que nous venons de mentionner, nous ont appris beaucoup sur les derniers travaux propres à comprendre la dégradation du bois comme telle ou dans l'écosystème forestier. 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 pour disparaître 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. C'était un mur qu'il fallait franchir, si nous voulions comprendre quelque chose à ce que nous observions.

C'est ainsi que nous sommes intéressés aux relations entre les différentes formes de vie et en particulier celles de la microfaune, et les effets observés par les différents auteurs. Elles nous ont semblé toucher de plus en plus près au cœur de la question qui nous préoccupait. Plus nous progressions, plus 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

⁴²Rayner, A. D. M & Boddy, Lynne (1988) «Fungal Decomposition of Wood». John Wiley & Sons. 597 p.

⁴³Tate, R.L. (1987). «Soil organic matter: biological and ecological effects». 291pp. Wiley-Interscience Pub. New York. USA

⁴⁴Vaughan, 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.

Nous avons appris beaucoup à ce chapitre des auteurs qui suivent: **Anderson [1988]⁴⁵, Anderson, Coleman & Cole [1981]⁴⁶, Bachelier [1978]⁴⁷, Bouché [1981]⁴⁸, Larochelle, [1993]⁴⁹, Larochelle, Pagé, Beauchamp & Lemieux, [1993]⁵⁰, Pagé, [1993]⁵¹, Parkinson, [1988]⁵², Sauvesty, Pagé & Giroux, [1993]⁵³, Seastedt [1984]⁵⁴ Swift, [1976]⁵⁵, Swift, Heal & Anderson [1979]⁵⁶, Toutain, [1993]⁵⁷. Tous ces auteurs abordent 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

-
- ⁴⁵Anderson, J. M. (1988) «Spatio-temporal effects of invertebrates on soil processes» *Biol. Fertil. Soils.* **6** : 216-227.
- ⁴⁶Anderson, 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.
- ⁴⁷Bachelier, 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.
- ⁴⁸Bouché, 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
- ⁴⁹Larochelle, 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.
- ⁵⁰Larochelle, 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.
- ⁵¹Pagé, 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.
- ⁵²Parkinson, D. (1988). «Linkage between resource availability, microorganisms and soil invertebrates». *Agriculture, Ecosystems and Environment.* **24**: 21-32.
- ⁵³Sauvesty, 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 déperissement au Québec» *Can. Jour. For. Res.* **23**: 190-198.
- ⁵⁴Seastedt, T.R. (1984) «The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes» *Ann. Rev. Entomol.* **29**: 25-46
- ⁵⁵Swift, 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.
- ⁵⁶Swift, 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.
- ⁵⁷Toutain, 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.

Comme nous l'avons déjà souligné, les rameaux n'ayant jamais fait l'objet d'une description et n'ayant jamais été considérés comme un matériau utile, il va de soi que la présence de lignine sous forme de monomère, n'ait jamais fait l'objet de discussions dans une fonction énergétique particulière. Toutefois, plusieurs auteurs font allusion à la complexité de cette macromolécule et soupçonnent un rôle important dans la formation de l'humus sans plus, et la base de la production de polyphénols jugés indésirables. Citons ici pour mémoire les auteurs suivants: Dordick, Marletta, & Kilbanov [1986]³³, Erikson, Blanchette & Ander [1990]¹⁸, Garcia, Latge, Prévost, & Leisola [1987]³⁴, Glenn & Gold [1985]⁵⁸, Jones, & O'Carroll [1989]³⁵, (Kirk & Farrell, [1987]²⁶, Leatham & Kirk [1982]³², Kirk, & Fenn, [1982]²⁷, (Leisola, & Waldner [1988]³⁰, Leisola & Garcia [1989]³¹, Lewis, Razal & Yamamoto [1987]²⁹, Rayner & Boddy [1988]⁴¹, Stott, D.E., Kassim, Jarrell, J.P., Martin, M. & Haider, K. [1993]⁵⁹, Tate [1987]⁴², (Vaughan & Ord [1985]⁶⁰ et (Vicuna [1988]⁶¹.

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. C'est ici que, 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 ici 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.

⁵⁸Glenn, 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

⁵⁹Stott, 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.

⁶⁰Vaughan, 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.

⁶¹Vicuna, R. (1988) «Bacterial degradation of lignin». Enzyme Microb. Technol. 10: 646-655.

6.7- Les blocages polyphénoliques et la biologie de la régulation

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]⁵⁶). 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]⁶², Laroche, Pagé, Beauchamp & Lemieux [1993]⁴⁹).

6.8- La définition des nutriments

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" que nous avons de la productivité agricole et qui, au fil des décennies, s'est propagée dans la dialectique forestière.

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 maintenant remarquable de

⁶²Swift, 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.

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 nos sociétés consentent au contrôle de ces épidémies sont colossales et dépassent l'imagination.

Comme l'ont démontré plusieurs auteurs et principalement **Amaranthus & Perry [1987]⁶³, Amaranthus & Perry [1988]⁶³, Bormann & Likens [1979]⁶⁴, Flaig [1972]⁶⁵ Gosz & Fischer [1984]⁶⁶, (Gosz, Holmes, Likens, & Bormann, [1978]⁶⁷, Martin, W.C., Pierce, R.S., Likens, G.E. & Bormann, F.H. [1986]⁶⁸**, 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.

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

7- UNE INVERSION DE LA VIE MICROBIOLOGIQUE DANS LES FORÊTS PLUVIEUSES TROPICALES DEPUIS LE SOL VERS LA CIME DES ARBRES.

Mes réflexions sur les milieux tropicaux à la lumière des découvertes impressionnantes dans la canopée des arbres de la forêt pluvieuse toujours associés à des sols relativement pauvres ouvre la porte à de nouvelles connaissances fondamentales. Ces découvertes suggèrent

⁶³Amaranthus, 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.

⁶⁴Borman, F. H. & Likens, G. E. (1979) «Pattern and Process in a Forested Ecosystem». Springer Verlag, New York,

⁶⁵Flaig, 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.

⁶⁶Gosz, 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.

⁶⁷Gosz, 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.

⁶⁸Martin, 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.

de plus en plus que la structuration de la vie des écosystèmes repose uniquement sur des mécanismes dépendant de la forêt et accessoirement des arbres comme il serait plausible de le penser. Ce serait ainsi la cause de la précarité africaine, où il est difficile de produire la nourriture nécessaire à un niveau de vie décent et stable.

7.1- L'eau

Comme nous le verrons plus loin, l'eau est un élément essentiel de la vie sous toutes ses formes. Sous les tropiques, sa disponibilité 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 de 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.***

Toutefois, dans les milieux forestiers des régions tempérés, 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]³³) pas plus que les champignons qui y président.

7.2- L'azote

7.2.1- La fixation non symbiotique: N₂

Dès l'abord, nous avons pris pour acquis que l'azote que nous observions 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]⁶⁹, Thomas-Bauzon, Kiffer, Pizelle, & Petitdemange [1990]⁷⁰ Thomas-Bauzon, Kiffer, Janin, & Toutain [1995]⁷¹, Parkinson [1988]⁵⁰, Stott, Kassim, Jarrell, Martin & Haider, [1993]⁷², Swift [1976]⁵⁴, Tate [1987]⁴², (Vaughan & Ord [1985]⁴³.**

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

Dans l'ensemble, il nous 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.**

7.3 - Le phosphore et les phosphatases

⁶⁹Rouquerol, T., Bauzon, D, & Dommergues, Y. (1975) «Les ectomycorhizes et la nutrition azotée et phosphatée des arbres» Congrès DGRST, mai 1975.

⁷⁰Thomas-Bauzon, Kiffer, E., Pizelle, G. & Petitdemange, 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.

⁷¹Thomas-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.

⁷²Stott, 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.

Cet élément a toujours été la source de difficultés dans la nutrition des plantes, à cause des aspects fugaces de sa disponibilité. 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]⁶⁸**).

A ce jour, des études (**Seck, & Lemieux [1996]⁷³**) nous montrent une 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]⁷⁴**) 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. À l'inverse de l'azote, je n'ai que peu poussé la recherche bibliographique, les principaux auteurs consultés étant: **Flaig [1972]⁶⁴**, **Ratnayake, Leonard & Menge, [1978]⁷⁵**, **Swift, Heal & Anderson [1979]⁵⁵**, **Vaughan, & Ord, [1985]⁴³**. 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 faut mentionner, avant de clore ce chapitre,

⁷³Seck, M.A. & Lemieux G. (1996) «Fertilisation organique par l'utilisation des Bois Raméaux Fragmentés (BRF) de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraichères 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

⁷⁴Toutain, F (1996) «Les entretiens de Nancy» in Rapport des missions internationales de 1996 Lemieux, G. éd. Université Laval, Québec, Canada p186-191 ISBN 2-921728-22-2, 284 pages.

⁷⁵Ratnayake, 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.

les travaux de **Lalande, Furlan & Angers (1997)**⁷⁶ ainsi que ceux de **Seck & Lemieux [1996]**⁷².

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

Les résultats obtenus lors des expérimentations, tant forestières qu'agricoles, nous ont amenés à explorer leur impact 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]**⁷⁷, **Guay, Lachance & Lapointe [1982]**³, **Larochelle, Beauchamp, Pagé & Lemieux [1993]**⁴⁹, **Lemieux & Lapointe, [1985]**⁵, **Lemieux & Lapointe, [1989]**⁸, **Lemieux & Toutain [1992]**⁷⁸, **Michaud [1993]**⁷⁹, **Pagé [1993]**⁵⁰, **Seck [1993]**⁸⁰, **Seck [1994]**⁸¹, **Toutain [1993]**⁵⁶, **Tremblay [1985]**⁸². La publication de ces travaux, sur plus de 10 ans, n'a suscité que de la curiosité et encore, de bien peu de personnes, mais dans l'optique traditionnelle de la perception des techniques

⁷⁶Lalande, 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.

⁷⁷Beauchamp, 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

⁷⁸Lemieux, 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.

⁷⁹Michaud, 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

⁸⁰Seck, M.A. (1993) «Essais de fertilisation organique avec le bois raméal fragmenté de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraichères 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 page 36 à 41.

⁸¹Seck, 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.

⁸²Tremblay, 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.

agricoles basées sur des techniques empiriques, s'il en est, dont l'unique but est de retirer les nutriments des résidus de cultures.

8.1- Quelques lumières sur la dynamique de la biologie tellurienne

Nous avons donc été forcés par les circonstances de faire un tour d'horizon très vaste pour comprendre l'absence d'attrait scientifique de nos 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 nous avons misé sur les données chimiques et physiques pour comprendre le sol, nous en proposons ici une série d'explications plutôt biologiques qui apportent quelques lumières sur notre univers forestier.

Il n'est pas inutile de souligner, avant de passer au chapitre suivant, que nos réflexions nous portent maintenant à regarder de près les nouvelles perceptions de notre univers, en particulier celles du temps telle que nous le proposent les physiciens et philosophes modernes (**Prigogine & Stenger [1988]⁸³, Prigogine [1996]⁸⁴**). Les pages qui suivent seront empreintes de la recherche des équilibres générés par les différents écosystèmes forestiers, et dont est BRF sont également l'initiateur. Ainsi, nous passons d'un monde en quête de production et de déséquilibre à un monde avec une tendance marquée à 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 cherchions tous, à en croire les cris d'alarme qui nous viennent de tous azimuts depuis près d'un demi siècle.

⁸³Prigogine, I. & Stenger, I. (1988) «Entre le temps et l'éternité» édit Fayard, Paris.

⁸⁴Prigogine I. (1996) «La fin des certitudes» 223 pages édit. Odile Jacob, Paris ISBN2-7381-0330-8

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

À mesure que nous proposons dans la compréhension des mécanismes responsables de la vie et de la fertilité, il nous est possible de distinguer les différents rôles avec de plus en plus de netteté. Il devient évident que le sol, sa biologie et son équilibre chimique et biochimique sont la clé de tout l'édifice forestier, dans le temps comme dans l'espace. L'allusion que j'ai faite au début du présent document concernant l'origine de la forêt dans le temps, renforce l'idée que tous les mécanismes en cause ont une origine qui remonte à des centaines de millions d'années. Nous avons maintenant de bonnes raisons pour séparer distinctement les systèmes feuillus des systèmes résineux, non pas par des différences de climat, mais des différences d'origines de constitutions et d'évolutions.

Il est intéressant de noter, à travers les millénaires, la progression de deux systèmes forestiers, dont le premier, celui des conifères, a choisi de persister à travers les âges par 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.

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, tout 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. Ici, c'est par le sol que ces stratégies ont été les plus efficaces en éliminant la possibilité de croissance rapide ou tout simplement la possibilité de germer. Comme nous le verrons plus loin, 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]⁸⁵, Duchaufour [1974]⁸⁶, [1980]⁸⁷, [1991]⁸⁸, Duchaufour & Jacquin [1975]⁸⁹, Duchaufour & Toutain [1985]⁹⁰, Toutain [1981]⁹¹, Ranger & Bonneau (1984)⁹², Frontier & Pichot-Viale [1993]⁹³**

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

La description que nous ferons 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

⁸⁵Dommergue, S. Y. & Mangenot, F. (1970) «Écologie microbienne du sol» Masson édit. Paris, 796.

⁸⁶Duchaufour, P. (1974) «Le climax du sol forestier» in Écologie Forestière P. Pesson édit, Gauthier-Villars, Paris, p. 129-134.

⁸⁷Duchaufour, 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.

⁸⁸Duchaufour, P. (1991) «Pédologie: sol, végétation, environnement» Masson édit, Paris 3^{ème} édition 189 pages.

⁸⁹Duchaufour, P. & Jacquin, F. (1975) «Comparaison des processus d'humification dans les principaux types d'humus forestiers» Science du Sol 1:: 29-36.

⁹⁰Duchaufour, P. & Toutain, F. (1985) «Apport de la pédologie à l'étude des écosystèmes» Bull. Écol. 17:(1) p 1 à 9.

⁹¹Toutain, F. (1981) «Les humus forestiers, structures et modes de fonctionnement» Rev. For. Fr. 6: 449-464.

⁹²Ranger, 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.

⁹³Frontier, S. & Pichot-Viale, D. (1993) «Écosystèmes: structure fonctionnement, évolution» Masson, édit. Paris 2^{ème} édition, 447 p.

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.

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

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]⁹⁴, Meyer & Linderman [1986]⁹⁵, Rambelli, [1973]⁹⁶, Reid & Mexal [1977]⁹⁷, Vogt, Grier & Meir [1982]⁹⁸, Whipps & Lynch [1986]⁹⁹**. 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.

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

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]¹⁰⁰, Amaranthus, Li & Perry [1987]³⁷, Amaranthus & Perry [1987]³⁶, Anderson, Huish, Ineson, Leonard**

⁹⁴Fogel, 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.

⁹⁵Meyer, 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.

⁹⁶Rambelli, 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.

⁹⁷Reid, C. P. P. and J. G. Mexal (1977) «Water stress effects on root exudation by lodgepole pine». *Soil Biol. Biochem.* 9: 417-422.

⁹⁸Vogt, 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.

⁹⁹Whipps, J. M. and J.M. Lynch (1986) «The influence of the rhizosphere on crop productivity». *Adv. Microb. Ecol.* 9:187-244.

¹⁰⁰Allen, T. F. H. and Starr, T.B. (1982) «Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity», University of Chicago Press, Chicago.

& Splatt [1985]¹⁰¹, Borchers & Perry [1987]¹⁰², Clarholm, [1985]¹⁰³, Coleman [1985]¹⁰⁴, Fogel & Hunt [1983]⁹³, Ingham, Troffymow, Ingham & Coleman [1985]¹⁰⁵, Janos [1988]¹⁰⁶, Lynch & Bragg [1985]¹⁰⁷, Malloch, Pirozynski & Raven [1980]¹⁰⁸ Olsen, Clark & Bennet [1981]¹⁰⁹, Perry, Molina & Amaranthus [1987]¹¹⁰, Trappe, J.M. [1962]¹¹¹, Vogt, Grier, & Meier [1982]⁹⁷.

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

Nous avons fait allusion, à maintes reprises de l'importance de la lignine dans la constitution du sol et 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 est représentée par la chute de tissus riches en lignine peu polymérisée à partir 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

¹⁰¹Anderson, 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.

¹⁰²Borchers, 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.

¹⁰³Clarholm, 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.

¹⁰⁴Coleman, 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.

¹⁰⁵Ingham, R. E., J.A. Troffymow, 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.

¹⁰⁶Janos, 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.

¹⁰⁷Lynch, J. M. & Bragg, E (1985) «Microorganisms and soil aggregate stability». *Adv. Soil. Sci.* **2**: 133-171.

¹⁰⁸Malloch, 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.

¹⁰⁹Olsen, R. A., R. B. Clark and J. H. Bennet (1981) «The enhancement of soil fertility by plant roots». *Am. Sci.* **69**: 378-384.

¹¹⁰Perry, D.A., Molina, R., & Amaranthus M.P. (1987) «Mycorrhizae, mycorrhizosphere, and reforestation: current knowledge and research needs». *Can. Journ. For. Res.* **17**: 929-940.

¹¹¹Trappe, J. M. (1962) «Fungus associates of ectotrophic mycorrhizae». *Bot. Rev.* **28**: 538-602.

l'érablière, une biomasse variant de 2 et 3 tonnes à l'hectare annuellement; Pagé, F. [1993]⁵⁰. Notons que ce phénomène est plus important dans les forêts de Dicotylédones décidues mais l'est moins dans celles des forêts sempervirentes de Gymnospermes ou d'Angiospermes.

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

Les résultats obtenus en milieux agricoles et forestiers, ont montré, dès le début, des résultats qui furent vérifiés par la suite: Aman, Despatie, Furlan & Lemieux [1996]¹¹², Beauchamp [1993]⁷⁶, Guay, Lachance, & Lapointe [1982]³, Lemieux, [1985]⁴, Lemieux & Lapointe [1986]¹¹³, Lemieux & Lapointe [1988]¹¹⁴, Lemieux, & Lapointe [1989]¹¹⁵, Lemieux, & Lapointe [1990]¹¹⁶, Lemieux & Tétréault [1993]¹¹⁷ Lemieux & Toutain [1992]²¹, Lemieux [1995]¹¹⁸, Seck [1993]⁷⁹. Tous les résultats, reproductibles avec une fidélité variable selon les fluctuations annuelles des conditions du milieu, nous ont montré des résultats 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

¹¹²Aman, 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.

¹¹³Lemieux, 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.

¹¹⁴Lemieux, 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.

¹¹⁵Lemieux, 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. ISBN 2-550-21342-4.

¹¹⁶Lemieux, 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.

¹¹⁷Lemieux, G. & Tétréault, 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,

¹¹⁸Lemieux, 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..

que les Basidiomycètes ne soient pas présents pour des raisons qui tiennent au type de BRF ou à une simple absence.

Nous sommes maintenant en mesure de suggérer l'hypothèse suivante, voulant que **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.**

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

De nombreuses observations et réflexions, portant sur les aspects énergétiques de la vie du sol, n'ont pas trouvé de parallèle ni de source nouvelle de compréhension dans la littérature et une de nos publications sur le sujet n'a soulevé ni intérêt ni commentaires (Lemieux [1995]¹¹⁹). Nous avons toujours été frappés par l'inhibition de la productivité sous les tropiques, où les sols sont dégradés, (Lemieux [1995]¹²⁰) et dans les climats subarctiques où, au contraire, il y a une surcharge de tissus végétaux peu évolués et peu productifs quant à la biomasse annuelle.

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]¹², 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, nous ne pouvons que souscrire à un tel énoncé. Toutefois, nous sommes fort intrigués dans cette optique de considérer que les arbres les plus anciens que sont les conifères, ne répondent que très peu à ce qui semble une vérité chez les Dicotylédones.

¹¹⁹Lemieux, G. (1995) «Passer de l'enthalpie à l'entropie». *Écodécision*, hiver 1995, pp. 72-73, Royal Society of Canada Université Laval, Québec

¹²⁰Lemieux, G. (1995) «Rapport de mission en Afrique (Sénégal)». ACIDI et Université Laval, décembre 1994, 48 pages, ISBN 2-921728-08-7.

Les Dicotylédones arborées possédant un tronc et une cime large seraient donc en mesure de filtrer la lumière et capter les photons les plus «performants», devenant ainsi les plus productifs tout en étant les dominants absolus. Ce faisant, ils sont en mesure de produire plus d'énergie donc plus en mesure de stocker les surplus sous forme de bois dans le bois de tronc, tout en accélérant le processus de cyclage des tissus végétaux et en inscrivant des quantités de plus en plus grandes dans l'écosystème hypogé. Ainsi, les feuillus sont en position d'accepter «tous» les concurrents à presque tous les niveaux et de les mettre au service de l'écosystème tout entier. C'est ici que la biodiversité est au maximum avec une **métastabilité**. Ici, tout converge vers la stabilité avec un maximum de complexité en fonction du temps; tous les éléments vivants pouvant se remplacer à tour de rôle. La sélection des espèces et des individus se fera par élimination des individus, quelquefois des espèces, mais sans effets notoires sur la répartition des rôles dans la stabilité de l'écosystème.

Voyons maintenant le comportement des Gymnospermes que nous connaissons mieux sous le nom de conifères. Dans l'ensemble la forme de ces derniers est inverse de celle des feuillus Dicotylédones. Qu'il nous soit permis ici de poser l'hypothèse de savoir que 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 indiquerait que le besoin absolu de 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.

9.2-La pédogénèse en forêt de Gymnospermes

Les populations de Gymnospermes auraient vraisemblablement établi un système restrictif par élimination de la concurrence, largement basée sur les effets inhibiteurs des polyphénols. Ici, 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 lorsqu'elles sont 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 l'exclusion de la concurrence, phénomène dévastateur dans la culture de ces essences par rapport à l'agriculture.

Ces deux modes de gestion de la concurrence, l'un archaïque et l'autre plus "moderne", nous permettent de poser 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.***

10- QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LE BOIS RAMÉAL

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, nous en tirons la conclusion qu'ils peuvent être à la base d'un nouveau champ de connaissance qui n'a jamais été approché sous cet angle, comme nous le confirme la littérature scientifique du siècle qui s'achève.

Cette capacité de remettre en route la vie et les échanges intrinsèques qu'ont les BRF nous indique bien que la métastabilité passe par un ensemble de processus vitaux dont l'importance nous est démontrée tous les jours par les nouvelles découvertes de la physique depuis que nous avons accès au monde qui nous entoure.

Nous sommes actuellement à regarder d'un peu plus près les aspects biologiques du sol, souvent bien malgré nous, mais nous y arrivons petit à petit.

10.1- Une définition de la fertilité

En résumé, il faut rechercher à tous 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 que nous connaissons 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, 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.**

10.2- Quelques nuances sur l'impact des biotechnologies

Ici 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 nous semble infinie dans ses possibilités et ses résultats, nous profitons de l'occasion qui nous est offerte d'attirer l'attention sur l'édifice génétique actuel qui est le résultat d'équilibres de millions d'années d'expérience dans la construction de notre monde métastable. Il ne 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.

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.

11- LES PRATIQUES DE LA FORESTERIE MODERNE

11.1-Logique forestière contre logique agricole

Comme nous l'avons vu plus tôt, 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 d'ordre monétaire. Dans cette optique, il me semble parfaitement logique que nous ayons astreint la forêt à se comporter comme l'agriculture à laquelle nous imposons des traitements analogues. Nous allons donc dans les lignes qui suivent proposer une **logique forestière**, plutôt que d'utiliser la logique agricole que nous suivons scrupuleusement depuis le fond des âges.

Tout comme en agriculture traditionnelle, alors que les exigences de rendements étaient modestes à cause de la capacité des techniques réduites, 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 vont bien autrement.

Cette tendance s'accélère encore 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.

Je viens d'exposer l'ensemble des conclusions auxquelles je suis arrivé à travers la littérature scientifique, notre expérimentation forestière et agricole, tant au Québec que sous les tropiques, en pointant du doigt notre «perception agricole» de la forêt alors que la logique aurait voulu que ce fut l'inverse. Comme nous ne pouvons changer le cours de l'histoire humaine, nous ne pouvons que constater ce fait, mais, du même souffle, il faut nous attaquer à la compréhension pour changer notre perception qui sera «sylvo-forestière» cette fois; la forêt perçue pour ce qu'elle est fondamentalement et depuis toujours.

11.2- De retour aux techniques d'exploitation

À l'inverse de l'agriculture, la productivité forestière est fonction de la stabilité de son milieu, faute de quoi «ses ennemis» rappellent et n'en font qu'une bouchée ou tout au moins la réduisent en lambeau et parfois pour des millénaires comme dans le bassin méditerranéen. Traditionnellement et jusqu'aujourd'hui, ce ne sont que les tiges des arbres qui nous intéressent, mais ce faisant, bien que nous ne touchions pas au capital des nutriments, nous jetons complètement l'édifice biologique par terre. Ici 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 uniquement? Très 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]²⁵**.

Plus l'édifice mégabiologique est important, plus il dépend des liens qui tiennent les diverses composantes ensemble. La logique agricole n'a que faire de telles contraintes et elle impose les siennes propres, pourvu que 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; la foresterie étant devenue une industrie

qui veut assurer sa pérennité en se soustrayant aux contraintes agricoles tout en adoptant les techniques.

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

Dans son travail, **Freedman [1990] in Lemieux [1991]²⁶**, 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 agricole en supposant que les nutriments évalués en termes chimiques représentent l'unique base de raisonnement.

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

Comme nous l'avons déjà démontré, il n'existe pas de différences dans la perception des biosurplus qui sont reconnus comme un «matériau homogène» ou, tout au mieux, de valeur négative. Toutefois les analyses de **Guay, Lachance et Lapointe [1982]³**, 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.

Pour reprendre la dialectique traditionnelle qui préside à la conception qu'on se fait de l'exploitation forestière dans une mentalité agricole, il n'y a aucune nuance faite entre les troncs et les branches, les deux étant des déchets de coupe. Nous proposons donc que cette distinction soit la base d'une nouvelle conception de

l'aménagement forestier et que les deux subissent des traitements très différents pour que les rameaux, qui sont 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.

Ainsi, les branches et les feuilles qui sont perçues comme les plus embarrassantes et les plus dangereuses 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 subtiles 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.

11.4- La place des Basidiomycètes

Il sera très important que les Basidiomycètes soient les premiers à prendre place à la «table»; sinon les autres niveaux biologiques seront capables de consommer une bonne partie de ce «festin» sans pour autant mettre en place les chaînes trophiques de façon efficace. Si en plus, l'eau se manifeste de manière excessive dans cette optique, les chances augmentent en faveur d'une évolution vers les tourbes.

11.5- Le cycle du carbone

Je profite de l'occasion pour souligner que toutes discussions sur le carbone et ses diverses formes ne permettent pas de pressentir ce que sera la fertilité puisqu'il y a là une perception strictement biochimique dont les diverses logiques vont du CO₂ au diamant ou des sucres vers les charbons, ce qui exclut toute compréhension des mécanismes. Cette avenue du bilan carboné de notre 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. Ici le «carbone» aura la forme de son évolution biologique et où les cycles benzéniques jouent un rôle dont on ne

soupçonne que très peu l'importance à ce jour. C'est pourtant dans la direction que je viens de décrire 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.

11.6- La perception des biosurplus

La perception actuelle des biosurplus forestiers en est une 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 sera responsable de la disparition de ces résidus, sinon le feu, mais sans laisser de traces d'une aggradation du milieu, bien au contraire,

Plusieurs apportent l'argument (jamais vérifié) que la transformation des résidus de coupe agit comme un «engrais» et apporter tous ses bienfaits au sol et à la régénération forestière. Rien n'est plus faux, puisque la transformation 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.

11.7- Sauvegarder un «héritage» durement acquis.

À l'inverse, la fragmentation et la mise en contact avec le sol permet non seulement de sauvegarder l'«héritage chimique» mais aussi les précieux noyaux benzéniques riches en énergie et permettant 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.

11.8- Le rôle des mycorhizes

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 en pouvant stocker le phosphore dans les tissus mêmes du mycélium obtenus 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.

Ce mode de transport que représentent les Basidiomycètes, dont un grand nombre sont des mycorhizes, représente le premier instrument vivant de 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. Ici s'installe un premier cycle qui 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.

11.9- Que faire des bois de tronc.

Si on regarde ce qui compose les biosurplus forestiers on trouve 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 sont laissés sur place le sont parce qu'ils 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 que 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.

11.10- Lignine et manganèse

Nous soupçonnons ce processus d'être à la base du moyen de combattre la compétition des Gymnospermes où le manganèse joue un rôle important. Plusieurs de nos analyses, non publiées à ce jour, montrent que les feuillus qui réussissent à compétitionner directement ou dans des stades de transition avec les conifères ne voient pas leur métabolisme affecté par de fortes concentrations de manganèse.

Des discussions récentes avec des ingénieurs des pâtes et papiers nous indiquent que des traces de manganèse perturbent toute la transformation de la lignine dans les nouveaux processus de blanchiment des papiers. Nous sommes enclins à voir la chose d'un même oeil dans le sol, ce qui nécessiterait des travaux importants de recherche au point de vue conceptuel. Nous y voyons ici l'un des

principaux facteurs de contrôle de l'écosystème et de la pédogénèse, ce qui reste à prouver.

11.11- Les modes et temps de la fragmentation

Il devient donc évident qu'il faut que les bois de tronc et de rameaux aient un traitement différent. 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 .

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

Tous les scientifiques sont à peu près d'accord sur la capacité des conifères à cycliser leurs nutriments à l'interne avec un recours minimum, voire presque nul parfois au sol. C'est la principale raison pour laquelle nous plantons des conifères et en particulier des pins de par toute la planète. Il faut reconnaître cependant que les conifères sont très peu enclins à améliorer la station sur laquelle ils sont introduits. Ils n'ont pas un impact positif à long terme mais par leur robustesse, ils réussissent à se maintenir toujours en éliminant la concurrence ou en tolérant les espèces adaptées à leurs conditions.

Les remarques qui précèdent permettent de mettre en lumière, par comparaison, 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 cycliser 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]⁵⁷). 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.

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

Ceci expliquerait en bonne partie pourquoi les sols étudiés par Gosz, Holmes, Likens & Bormann [1984]⁶⁷, 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 à nos 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.

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. Ici, 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.

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

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, faute de quoi nous sommes sur une pente qui nous mène vers la catastrophe écologique que plusieurs présentent, mais très certainement sur l'économie à moyen terme. Nous avons mis plus d'un siècle à mener au bord du gouffre de très grandes superficies forestières. Espérons qu'il en prendra un peu moins pour tout remettre en

ordre, faute de quoi nous aurons toujours des forêts, mais improductives.

Dans une récente étude, (**Smith, Faulkner & Powell, [1994]¹²¹**), le Département américain de l'Agriculture 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 atteints et même dépassé un point d'équilibre crucial

Pour le cycle du carbone, un terme très utilisé mais qui n'a que peu de sens au niveau forestier, il va de soi que l'intégration dans les chaînes trophiques, tant dans les protéines, les sucres, la cellulose 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 destruction même, émet des quantités de carbone libres dont on commence à comprendre les effets qui se font sentir en chaîne. 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, à elle seule, apporter des corrections positives à ce chapitre; 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.

11.15- Les cycles de l'eau

¹²¹Smith, B.W., Faulkner, G.L. & Powell, D.S. (1994) « Forest Statistics of the United States, 1992 » General Technical Report NC-168, 145 pages

Concernant les cycles de l'eau, il va de soi qu'un système tellurien en équilibre doit montrer une concentration régulière c'est-à-dire entre surplus et pénurie, bien que des excès puissent se produire selon le saison. Nos climats tempérés se prêtent mal à une évaluation précise des cycles biologiques de l'eau si ce n'est que par les effets sporadiques bien connus. En revanche, nous avons noté des augmentations considérables de productivité, ce qui nous laisse à penser qu'il y a bien un cycle interne de l'eau du sol à travers les différents niveaux trophiques où de larges quantités peuvent être stockées à l'abri des membranes hémi-perméables de tout ce qui vit. Par contre, le rôle de la canopée, dans le cycle de l'eau par rapport à un sol à température inférieure, est bien connu dans le cycle journalier des forêts tropicales pluvieuses

L'augmentation de la porosité du sol qui traduit, à la fois la structuration du sol l'intensité de la vie tellurienne et l'existence d'une atmosphère, permet d'absorber les eaux de ruissellement et ainsi économiser bien des pertes. Il semblerait que, dans cette perspective, la dépolymérisation de la lignine se fasse régulièrement, la vie tellurienne demeurant en aérobiose. Ainsi, la régulation des transferts à partir des mycéliums par des bactéries qui modifient la perméabilité des membranes aux points de rencontre, serait également un système d'échange non négligeable. En présence d'excès d'eau, ces bactéries sont entraînées.

12 - QUELQUES RECOMMANDATIONS

Voici que nous en sommes maintenant aux 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.

12.1- L'expérimentation technique sur le milieu forestier

Les expériences que nous relations plus haut nous montrent qu'à moyen terme, nous pouvons mesurer des changements sur 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 épandus immédiatement sur le sol** 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 fait à la métastabilité.

d) Des études portant sur au moins 5 ans seront 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 obtenus devra 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'ICRAF¹²² devait être hautement sollicité et privilégié dans l'interprétation des résultats.

12.2- L'expérimentation scientifique: Le monde fongique

De nombreuses zones d'ombre sont à explorer pour arriver à saisir les raisons pour lesquelles nous avons quelques succès et comment pouvons-nous les maintenir et les interpréter. Comme la première intervention biologique est d'ordre fongique et que ceci n'est que peu expérimenté nous allons privilégier cette piste.

¹²²International Center of Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya

- 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, il faudra faire des efforts considérables pour des mises en culture au laboratoire et inventer des protocoles nouveaux.
- b) Bien identifier les rôles des diverses familles de champignons pour en comprendre les comportements. Bien que très difficile, il ne faudrait pas négliger une telle piste qui aura, sans l'ombre d'un doute, un impact considérable sur la compréhension des résultats en aménagement.
- c) Il faudra que, pour les principales espèces de Basidiomycètes, nous soyons en mesure d'identifier les enzymes produites et les circonstances dans lesquelles elles sont produites. Il y a là une série de réponses de base au fonctionnement de l'écosystème hypogé et de la fertilité générée.

12.3- La mésofaune et la microfaune

Des études importantes devraient être faites sur les différents niveaux de la microfaune et de la mésofaune qui apparaissent dans des 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. Ils sont 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.

12.4- Les bilans phosphorés et azotés

Il va de soi que 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 ici des transferts énergétiques très particuliers qui méritent qu'on s'y arrête.

Des travaux substantiels devraient être consentis à 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 sommes de plus en plus enclins à penser 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.

12.5- Lignines et polyphénols.

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 qui sont apparus, il y a des centaines de millions d'années, n'est pas étrangère à notre 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 selon que nous soyons en présence de feuillus ou de conifères et aussi en fonction de l'âge de ces peuplements. Nous devrions les voir comme 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.

13- UN RAPPROCHEMENT NÉCESSAIRE AVEC L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS.

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

13.1-La science fondamentale

Reste donc cette immense macromolécule qu'est la lignine dont on ne connaît que des techniques pour la démolir, mais dont nous soupçonnons maintenant le rôle fondamental qu'elle joue 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.

14- UNE IMPLICATION DE NOS INSTITUTIONS DE HAUT- SAVOIR À L'ÉCHELLE INTERNATIONALE

Un de mes buts ici est de proposer, en réponse à l'universalité des mécanismes auxquels nous nous référons ici, une modification de nos institutions, soit 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 un ensemble d'études et de réponses aux problèmes actuels de désertification, d'érosion des sols de disparition irrémédiable de la forêt sous tous les cieux.

14.1- De la philosophie à la physique

La physique de Newton, ayant défini le temps comme étant égal en aval comme en amont, apporta une confiance dans les sciences et particulièrement celles de l'ingénieur sans égale. 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.

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.

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 j'ai pu 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.

Le temps me 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.

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 Gaineville.
- 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,
- 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. (1989)** La régénération forestière et les bois raméaux fragmentés: observations et hypothèses» Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada, Canada 223 pages ISBN 2-550-21342-4.
- Lemieux, G. & Lapointe, R. A. (1986)** «Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol». Département des Sciences Forestières Université Laval, Québec17 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. & 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. & Marcano, 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, p. 129-134.
- 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 Environnement.* **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 déperissement 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, B.W., Faulkner, G.L. & Powell, D.S. (1994)** «Forest Statistics of the United States, 1992» 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 *Sphaerotermes sphaerotorax*. *Science de la Vie/Life Science* **318**:699-707.
- Thomas-Bauzon, Kiffer, E., Pizelle, G. & Petitdemange, 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 pédogonotiques pour caractériser le rôle du bois raméal fragmenté (BRF) dans le processus d'humification» Université Laval, Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, 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 p186-191 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 2-921728-25-7

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, avril 1997.

5.4 - La notion de bois raméal une ouverture vers de nouvelles connaissances sur la pédogénèse	24
5.5 - La régie chimique et biologique des nutriments	24
5.6 - Les raisonnements que nous suggère la logique	25
5.7 - La logique de la fragmentation	25
6 - <u>L'ASSOCIATION NUTRIMENTS ET ÉNERGIE= NOURRITURE</u>	26
6.1 - Les différences entre compostage et pédogénèse	26
6.2 - Les principes qui sous-tendent la nécessité de la fragmentation	27
6.3 - La production des fractions fulviques et humiques	28
6.4 - La «matière organique» dans l'optique d'une fertilité agricole annuelle sans signification forestière	29
6.5 - Une approche univoque: la translocation des nutriments	30
6.6 - Les lignines et les polyphénols	31
6.7 - Les blocages polyphénoliques et la biologie de la régulation	32
6.8 - La définition des nutriments	33
7 - <u>UNE INVERSION DE LA VIE MICROBIOLOGIQUE DANS LES FORÊTS PLUVIEUSES TROPICALES DEPUIS LE SOL VERS LA CIME DES ARBRES</u>	34
7.1 - L'eau	34
7.2 - L'azote	35
7.2.1 - La fixation non symbiotique: N ₂	35
7.2.2 - L'azote disponible: à repenser pour en faire un bilan dynamique	36
7.3 - Le phosphore et les phosphatases	36
8 - <u>LA BIOLOGIE TELLURIENNE S'IMPOSE PAR LES VOIES HISTORIQUES DE L'ADAPTATION</u>	37
8.1 - Quelques lumières sur la dynamique de la biologie tellurienne	38
8.2 - Le comportement des écosystèmes forestiers et la génération différentielle des sols	39
8.3 - L'énergie au centre de nos théories plutôt que les nutriments	41
8.4 - Les arbres dirigent les quatre cinquièmes de leur production énergétique vers le sol	41
8.5 - L'apport énergétique de l'écosystème épigé: la base de la vie tellurienne	42
8.6 - Les sources de lignine peu polymérisée: les racines et les rameaux	43

9 - <u>UN DÉBUT DE COMPRÉHENSION DES RÉSULTATS OBSERVÉS PAR LA VOIE EXPÉRIMENTALE</u>	44
9.1 - La forme des arbres: une brève histoire de l'évolution	45
9.2 - La pédogénèse en forêt de Gymnospermes	46
10 - <u>QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LE BOIS RAMÉAL</u>	47
10.1 - Une définition de la fertilité	47
10.2 - Quelques nuances sur l'impact des biotechnologies	48
11 - <u>LES PRATIQUES DE LA FORESTERIE MODERNE</u>	49
11.1 - Logique forestière contre logique agricole	49
11.2 - De retour aux techniques d'exploitation	50
11.3 - La distinction nécessaire entre bois de tronc et bois de rameaux	51
11.4 - La place des Basidiomycètes	52
11.5 - Le cycle du carbone	52
11.6 - La perception des biosurplus	53
11.7 - Sauvegarder un «héritage» durement acquis	53
11.8 - Le rôle des mycorhizes	54
11.9 - Que faire des bois de tronc	54
11.10 - Lignine et manganèse	55
11.11 - Les modes et temps de la fragmentation	55
11.12 - Ce qu'il faut attendre des conifères et des feuillus fragmentés	56
11.13 - L'énergie concentrée dans les sols des forêts feuillues	56
11.14 - Les objections économiques et logistiques en perte de vitesse	57
11.15 - Les cycles de l'eau	58
12 - <u>QUELQUES RECOMMANDATIONS</u>	59
12.1 - L'expérimentation technique sur le milieu forestier	59
12.2 - L'expérimentation scientifique: Le monde fongique	60
12.3 - La mésofaune et la microfaune	61
12.4 - Les bilans phosphorés et azotés	61
12.5 - Lignines et polyphénols	62
13 - <u>UN RAPPROCHEMENT NÉCESSAIRE AVEC L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS</u>	62
13.1 - La science fondamentale	63
14 - <u>UNE IMPLICATION DE NOS INSTITUTIONS DE HAUT-SAVOIR À L'ÉCHELLE INTERNATIONALE</u>	63
14.1 - De la philosophie à la physique	63
Bibliographie	64

