

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté de Foresterie et de Géomatique

sous la commandite du
Centre de Recherche en Développement
International
Ottawa, Canada

«*Cet univers caché qui nous nourrit: le sol vivant*»

*Seminaires donnés à
l'International Institute for Tropical Agriculture (IITA)
Université d'Ibadan, Nigeria
et à
l'International Centre of Research in Agroforestry (ICRAF)
Nairobi, Kenya
mars 1996*

*ainsi qu'à
l'Académie des Sciences Agricoles d'Ukraine
Kiev, Ukraine
mai 1996*

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

publication n° 59

2^{ième} édition mars 2002

+
édité par le
Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux
Département des Sciences du Bois et de la Forêt
Québec G1K 7P4
QUÉBEC Canada

Cet univers caché qui nous nourrit: le sol vivant

par le
Professeur Gilles Lemieux
Département des Sciences du Bois et de la Forêt
Université Laval
Québec G1K 7P4
QUÉBEC
Canada

Résumé

Les travaux effectués durant les 20 dernières années en utilisant le bois de rameaux fragmentés (BRF), tant en agriculture qu'en foresterie, ont montré des augmentations de rendement et des modifications fondamentales aux sols traités, aussi bien en climat tempéré qu'en climat tropical. Bien qu'il soit impossible d'apporter toutes les preuves nécessaires pour en suggérer l'utilisation immédiate, nous sommes à même de formuler une série d'hypothèses qui demandent à être testés à une plus grande échelle. Une relation nette est faite entre le type de lignine et le comportement des écosystèmes de Gymnospermes et d'Angiospermes. Parmi celles-ci mentionnons le rôle prépondérant de la jeune lignine sous forme d'oligomères ou de monomères dans la structuration du sol et de la constitution des chaînes trophiques, du rôle fondamental des Basidiomycètes dans la pédogénèse, et de l'énergie endogène dans le fonctionnement de l'écosystème hypogé avec une influence majeure sur la conservation et la distribution de l'eau biologiquement active.

Abstract

Research on ramial chipped wood (RCWs) over the last 20 years in both agriculture and forestry have shown significant yield increase and fundamental soil modifications under temperate and tropical climates. Since it is not possible to bring all scientific evidences for an immediate use, it gives the opportunity to put forward some hypothesis for large scale field tests. A close relation is stressed between the lignin type and the behavior of both Gymnosperms and Angiosperms ecosystems. One should recognize the important role played by the young immature lignin as oligomers or monomers over soil structuration, trophic web building, Basidiomycetes on pedogenesis and endogenous energy on hypogeous ecosystem operations with a major influence on biologically active water conservation and distribution.

I- Un peu d'histoire: l'évolution des écosystèmes et notre anthropocentrisme.

1 L'histoire veut que l'Homme soit l'un des derniers grands mammifères apparus sur cette planète et qui possède, en plus d'un cerveau très développé, une très grande aptitude à la communication par la parole et l'invention de l'écriture à travers la symbolique et l'abstraction. Ces caractéristiques sans pareilles dans le monde actuel lui valent d'immenses qualités, mais également des défauts sans nombre.

2 Assistant à sa propre évolution, et en admiration devant ses oeuvres, il oublia être le dernier arrivé et que des millénaires avant lui, l'écologie de cette planète était bien constituée, avec des règles bien établies, et surtout bien rodées. Nous admirant nous-mêmes en tant que chef-d'oeuvre de l'évolution et tout en nous congratulant, nous nous sommes mis à asservir la nature. Profitant du fait que les mécanismes qui ont engendré les équilibres actuels étaient particulièrement généreux, nous nous sommes mis à manger à tous les râteliers, en remerciant la générosité de Dieu, Allah, Yahvé, Shiva ou autre. Nous devenions ainsi les Maîtres du Monde, mais qui devait se montrer rebelle dans la mesure où nous exagérerions.

3 L'Histoire récente nous contraint à revoir l'histoire que nous nous étions inventée à rebours. Pour comprendre un domaine vers lequel la recherche nous a conduits, le sol dans ses aspects dynamiques, nous avons dû conclure que bien avant l'arrivée de l'Homme et de l'agriculture qu'il fut contraint d'inventer, la forêt existait de par toute la planète où il était possible qu'elle s'installa. Spontanément, nous avons conclu que tous les mécanismes qui régissaient la forêt devaient passer par l'évolution et le comportement du sol qui, en retour, est modifiés par la végétation qui constituait cet ensemble.

4 Nous avons donc émis l'hypothèse que, (1) *si durant des centaines de millions d'années la forêt avait dominé en l'absence d'agriculture,*

que lors de l'utilisation du sol après avoir éliminé la forêt, des dégradations importantes apparaissaient et des baisses de fertilité se perpétuaient, c'est que les mécanismes à la base de la fertilité devaient être d'origine forestière. Une telle hypothèse implique que les mécanismes responsables devraient reposer sur une base biologique plutôt que chimique.

5 En posant une telle hypothèse deux réalités se dressent: soit un profond scepticisme des pédologues et autres scientifiques du sol agricole, puisque tous les traités présentent la question à 98 % sous l'angle de la chimie, soit une indifférence de la part des forestiers qui traitent du sol sous l'aspect descriptif, n'ayant aucun moyen d'intervention. Ces deux réalités s'avèrent exactes, non seulement au Québec, mais également dans les autres parties du monde avec lesquelles nous entretenons des relations. Ceci nous a indiqué, dès le début, que tout financement de la recherche serait extrêmement difficile, voire impossible à cause de l'absence de priorités de la part de ceux qui la financent, les gouvernements. En bref, toute l'aventure est à contre-courant ce qui, pour tout chercheur, est un indice de grand intérêt du côté de la recherche de nouvelles connaissances, de l'évolution sociale et économique.

II- L'importance de la forêt en climats tropicaux

6 Il est remarquable de constater que sous les tropiques, il n'existe que des formations végétales arborées ou des formations nettement désertiques, dont la forêt pluvieuse représente le sommet de la diversité et de la productivité. Elle est composée de Dicotylédones avec de nombreuses espèces compagnes parmi les Monocotylédones et Cryptogames vasculaires que sont les Filicinées (fougères). C'est donc la forêt de Dicotylédones à très grande biodiversité qui, la première, a vraisemblablement été le siège des premières destructions pour faire place à une agriculture primitive qui, avec l'expansion de l'Homme, a pris les proportions que nous lui connaissons aujourd'hui.

7 Il faut remarquer que l'agriculture se serait développée dans le domaine de la forêt feuillue tropicale, pour se propager vers les pays à climat tempéré de la même manière. Il nous faut reconnaître l'échec de l'agriculture dans le domaine de la forêt coniférienne aussi bien sous les Tropiques, en Amérique, que sous les latitudes plus nordiques, tout autour du globe.

8 Ceci nous a permis de poser l'hypothèse que (2) *les mécanismes qui régissent la fertilité, la pédogenèse, la biodiversité, les productivités primaire et secondaire devaient reposer sur des bases qui n'apparaissent pas clairement dans la littérature scientifique du siècle qui s'achève. Nous en tirons la conclusion que seul le productivisme était la base de tous les raisonnements.*

9 Les limites que nous observons dans l'utilisation des fertilisants chimiques et les effets secondaires qui se font jour, mettent l'emphase sur d'autres mécanismes peu explorés jusqu'ici, bien que beaucoup d'efforts aient été consentis sur le cyclage chimique des nutriments, avec une abondante littérature dans toutes les langues et sous tous les cieux. Toutefois, les aspects biologiques et biochimiques de la question sont largement ignorés et n'ont fait l'objet à ce jour, que de peu de travaux de synthèse, mais de plusieurs travaux importants sur la dégradation, et la pollution, dans l'optique de se défaire des "rebut" de notre civilisation.

10 Ces réflexions et hypothèses nous ont amenés à regarder la question strictement sous l'angle biologique, non par la description des différents stades, mais bien dans tous les aspects de sa dynamique. Nous avons donc envisagé la question sous les angles suivants:

- a) la composition fondamentale du bois, production distinctive de la forêt,
- b) les dérivés biochimiques dans la formation du sol,
- c) les mécanismes biologiques exogènes qui interviennent dans la dynamique du sol,
- d) le cyclage et la régie des nutriments, y compris l'eau dans le sol,
- e) la question énergétique endogène et exogène régissant la fertilité.

III- La composition fondamentale du bois

11 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.

12 Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, un seul des constituants fondamentaux montrent une variation importante dans sa structure: la lignine. C'est l'une des macromolécules naturelles les 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, qui se présentent sous la forme de cycles aromatiques symétriques possédant deux groupements méthoxyles (OCH_3) ou lignine syringuil, propre aux Dicotylédones, alors que chez les Conifères, cette lignine est asymétrique avec un seul groupement méthoxyle ou lignine guayacil. 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.

13 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».

14 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.

15 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. C'est que les 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.

16 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.

17 Parmi tous ces produits, un très grand nombre 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 édifié 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.

1- La lignine, ses dérivés et leur évolution dans la dynamique du sol.

18 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 (**Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P. [1990]**), (**Rayner, A.D.M & Boddy, L. [1988]**).

19 Depuis le glucose, il y a formation d'alcool coniférylique qui donnera d'abord une lignine sous la forme de monomères qui se polymérisera de plus en plus par la suite. Les noyaux benzéniques seront les plus importants au point de vue structure et contenu

énergétique: ils deviendront les principaux éléments de la structure stable du sol.

20 Il va de soi que cette structure moléculaire, même très polymérisée, peut subir de nombreuses transformations donnant des polyphénols, des acides gras, des huiles essentielles, des terpènes, des tanins, etc.(**Kristeva L.A. [1953]**). Ils ont tous des effets perceptibles, sur le métabolisme de la plante et des différents paramètres des chaînes trophiques.

21 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.**

22 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.(**Guay, E. Lachance, L. & Lapointe R.A. [1982]**), (**Lemieux, G. & Lapointe R.A. [1985]**), (**Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1989]**), (**Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1990]**), (**Lemieux, G. & Toutain, F. [1992]**).

IV- Bois caulinaire et bois raméal

1- Le bois caulinaire et sa lignine

23 Pour bien comprendre les mécanismes en cause dans la formation d'un sol fertile, il nous a fallu comprendre la différence qu'il pouvait y avoir entre le bois de la tige des arbres et celui des rameaux. Nous en avons conclu que le bois caulinaire pauvre en nutriments était constitué de telle sorte qu'il ne se dégrade que très difficilement et que tout concourait à sa protection pour en assurer la vie, celle-ci pouvant parfois s'étendre sur des millénaires comme chez les genres *Sequoia* et *Sequoiadendron*. D'autre part, il faut être conscient que la formation de tourbes à partir d'arbres, d'arbustes et de monocotylédones pouvait se produire par un blocage *post mortem* de la dégradation et provoquer ainsi des accumulations très importantes de tissus végétaux non humifiés et parfaitement conservés. Dans les deux cas, c'est la présence de lignine hautement polymérisée, donnant des produits capables de stopper ou empêcher la dépolymérisation et la dégradation structurelle du bois ou des tissus ligneux qui en est reponsable.

24 Ce haut degré de polymérisation de la lignine, qu'elle soit du type syringylee ou guaïacyle peut donner naissance aux tanins, catéchine et acide catéchique qui serait responsable de nombreux échecs dans l'utilisation des sciures ou copeaux de rabotage pour améliorer les sols agricoles dont la structure était déficiente ou effondrée. Dans ces cas, la relation polysaccharide - protéines (rapport C/N) se situe entre 400 et 700/1. Dans la grande majorité des cas, ces matériaux ont été utilisés pour en faire des composts qui ont presque toujours été des échecs, à cause des grandes quantités d'azote qu'il fallait introduire dans le mélange pour obtenir une humification avec l'émission considérable d'énergie thermique.

25 Ces matériaux originaires du bois caulinaire, lorsqu'appliqués en surface sous la forme d'une litière artificielle, nécessitaient également un important supplément azoté pour en amorcer l'humification. Ceci

est dû au fait que la dépolymérisation doit se faire principalement par des bactéries qui utilisent une enzyme particulière qui est la laccase; le processus est lent, coûteux et aléatoire.

2- Le bois raméal et sa lignine

26 Les premières expériences avec le bois raméal sous forme d'épandage et de mélange avec les premiers centimètres du sol nous montrèrent des résultats très positifs, mais troublants avec des augmentations de rendement et des modifications importantes dans la croissance et la pathologie classique des espèces cultivées. Il nous a donc fallu convenir que nous étions en face d'un phénomène dont on ne trouve aucune trace dans la littérature. Non seulement la description biochimique et nutrimentale de cette partie des arbres n'avait pas été faite, mais l'état des différents composants, bien que connus, n'avait jamais fait l'objet d'association. (**Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1986]**).

27 Ainsi, les rameaux de moins de 7 cm de diamètre¹ contiennent-ils une lignine peu polymérisée, ou sous forme de monomères, et relativement peu de polyphénols, résines ou huiles essentielles difficilement transformables. Si on observe bien sur le terrain comme dans littérature, ce bois raméal est consommé par presque tous les ruminants, mais non pas le bois caulinaire. C'est également à ce niveau que se font les attaques d'insectes, champignons pathogènes, bactéries ou autres. C'est également sur les feuilles et les jeunes rameaux que se manifesteront les carences minérales. Nous en tirons donc la conclusion que le bois raméal est le siège de la fabrication du bois, de la lignine, des polysaccharides, de tous les osides², ainsi que des protéines. Il devient ainsi une source importante de nutriments et d'énergie pouvant être utilisée par presque tous les niveaux de vie.

¹Définition arbitraire en fonction des utilisations locales. Ainsi, plus le diamètre des rameaux est petit, plus le contenu en lignine, protéines et nutriments est important.

²Terme usuel pour qualifier l'ensemble des sucres (glucose, saccharose, fructose, mannose, etc.).

3- Les essais agricoles et forestiers d'utilisation du bois raméal

28 C'est au début des années 80 que **Guay, Lachance et Lapointe (1982)** publièrent deux rapports techniques sous le titre de «Emploi des bois raméaux fragmentés et des lisiers en agriculture», dans lesquels on trouve des notes et des commentaires sur différents essais en agriculture avec des copeaux de rameaux provenant de l'élagage des arbres urbains. On y trouve des résultats des plus intéressants au point de vue rendement.

29 Ce fut dans un contexte de recherche pour trouver d'autres produits que le bois traditionnel, qu'Edgar Guay, sous-ministre adjoint au ministère des Forêts dans le gouvernement québécois, poussa les premières expériences en ce qui regarde l'utilisation des BRF. Après avoir constaté qu'il se perdait des millions de tonnes annuellement de rameaux de toutes sortes, il chercha à en tirer d'autres produits. L'une de premières ressources qu'il regarda de près furent les huiles essentielles. Toutefois, l'industrie existant déjà sous une forme embryonnaire, il le remarqua l'amoncellement rapide de milliers de tonnes de rameaux fragmentés qu'il s'empressa de faire analyser pour en connaître le contenu.

30 Il réalisa très tôt que ces rameaux fragmentés étaient extrêmement riches en nutriments chimiques mais également en produits d'origine biochimiques, comme les protéines et les acides aminés. Délaissant quelque peu la question des huiles essentielles, il porta plus d'attention à ce matériau pour en faire un paillis en agriculture, plus particulièrement en ce qui regarde les pommes de terre. Bien que sur une petite échelle, les résultats s'avérèrent très intéressants.

31 Ce premier essai était la conclusion de nombreuses lectures qui lui avaient permis de combiner la technique américaine du "Sheet Composting" (compost de surface) et celle de Jean Pain qui, en France, avait mis au point une technique de compostage de broussailles dont les résultats étaient des plus intéressants. Il décida donc, avec l'aide de

producteurs agricoles, d'épandre les copeaux de rameaux et de les mélanger avec les premiers centimètres du sol.

32 Comme il n'y avait pas de description et de connaissances dans littérature, Guay, Lachance et Lapointe, se virent contraints d'assimiler ces rameaux au bois conventionnel qui, en toute connaissance de cause, nécessite des quantités importantes d'azote pour se décomposer. C'est ainsi qu'ils décidèrent d'associer aux copeaux de bois de rameaux une importante source d'azote que représentent les lisiers de porc, éliminant ainsi une source de pollution de la nappe phréatique et des cours d'eau.

33 Les résultats ne furent pas longs à se faire sentir particulièrement avec l'élimination des odeurs, une transformation rapide des copeaux et une augmentation des rendements agricoles dès l'année suivante, et même des répercussions positives sur plusieurs années. Ils obtinrent les effets suivant:

- Une augmentation de plus de 50 % du taux de matière organique.
- Une augmentation du pH³.
- Une augmentation des rendements variant de 30 % à 300 % selon les récoltes.
- Ces augmentations de récolte se manifestent en volume ou en contenu en matière sèche comme chez les pommes de terre⁴.
- Une réduction de la consommation d'eau.
- Une modification importante de la flore adventice et de son agressivité⁵.
- Une réduction très importante des insectes et maladies⁶.
- Une plus grande résistance au froid et à la sécheresse.

³ Il est très intéressant de noter que plus tard au Sénégal lorsque le pH dépasse 8,0, nous assistons à une chute de cette valeur vers la neutralité. L'examen préliminaire des systèmes enzymatiques semble nous en indiquer la cause.

⁴ Les premières expériences sur le maïs en Côte d'Ivoire montreront des augmentation de 400% en matière sèche 2 ans plus tard.

⁵ Ce caractère semble plus important en climat tropical.

⁶ Il y a une réduction très importante de *Sclerotinia sclerotinum* sur les tubercules de pommes de terre et des pucerons chez les fraisiers. En climat tropical, c'est la disparition totale des nématodes (*Meloidogyne javanica*, *M. mayagensis* et *Scutellonema cavenessi*).

34 Un premier regard sur les résultats obtenus à cette époque nous a convaincus dès lors de l'importance de la découverte. Elle se manifestait à la fois sous la forme d'augmentation des rendements mais, plus important encore, sur l'instauration d'équilibres chimiques et physiques qui laissaient apparaître un contrôle d'ordre biologique, dont il semblait plausible de pouvoir suivre les dédales⁷.

V- Un regard sur l'un des principes fondamentaux en agriculture; la notion de «matière organique».

35 Après quelques années, comme les modifications apparues sur la structure et le couleur du sol se maintenaient, nous avons conclu que nous intervenions sur les mécanismes pédogénétiques, l'apport des matières traditionnelles ne reposant sur aucun principe scientifique, si ce n'est la **minéralisation**. Nous venions de toucher la source même des principes d'**humification** qui devait nous propulser dans un monde méconnu, et souvent inconnu, auquel nous aurions désormais accès, portant sur la pédogénèse fondamentale d'origine forestière associée au productivisme agricole.

36 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.

37 Jusqu'ici, dans l'incapacité de comprendre les mécanismes qui régissent le sol, nous nous sommes confinés à comprendre 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.

⁷Un estimé des coûts d'aménagement en 1985 sont de l'ordre de 1000.00\$ Can./hectare qui ont un effet marqués sur une période de 5 ans.

Le pas suivant fut de l'éliminer, pour utiliser les fertilisants en solution pour les cultures hydroponiques.

38 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 **dégradation**. Comme quoi, seule la notion de fertilisant et particulièrement l'azote, est reconnue.

39 Plus tard nous avons donc posé l'hypothèse que (3)*le bois raméal pouvait être une entrée privilégiée dans l'étude et la compréhension de la formation du sol et de la dynamique qui le caractérise, considérée avant tout comme étant la distribution de nutriments chimiques pour la croissance des plantes*. Ce n'est que dix années plus tard que nous avons commencé à comprendre les tenants et les aboutissants des mécanismes en place, de leur évolution, voire de leur effondrement. Bien que dans la décennie qui précède, il y ait eu plusieurs publications importantes sur les mécanismes biologiques liés à la dynamique des nutriments, un premier essai compréhensif de synthèse apparaissait (**Perry, Amaranthus, Borchers & Borchers, et Brainerd [1989]**). Cet important travail de l'école de Corvallis, aux USA, fut orienté sur le comportement des divers niveaux biologiques, dont les mycorhizes et leurs effets étaient le point central d'expérimentation, de synthèse et de compréhension.

40 Ces travaux de l'école de Corvallis, aussi remarquables furent-ils, portaient avant tout sur une tentative d'explication de l'importance d'un seul niveau, qui est celui de la vie, dans un esprit de compétition et de complémentarité, ce qui était à l'époque l'unique avenue de compréhension de notre monde. L'arrivée du bois raméal nous permit alors, de forcer la réflexion sur d'autres plans tant forestier qu'agricole, 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 rétrosynthèse⁸ de composés, le plus souvent dérivés de la lignine et touchant le monde des polyphénols, et de ce que nous connaissons actuellement de l'humus, de l'humine, des humates, et des acides humique et fulvique.

1- Quelques raisonnements a posteriori.

41 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.

42 Les nombreuses rencontres et discussions dans plusieurs pays, tout comme les lectures des travaux sur la question à travers le monde, nous ont convaincus que nous nous attaquons 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**⁹ a une influence importante sur le comportement de l'écosystème, avec une emphase particulière sur la germination et la compétition des plantes.

⁸Néologisme par lequel on désigne le fractionnement de molécules complexes en donnant de nouvelles, aussi complexes et même davantage, à partir de nouveaux systèmes enzymatiques, issus des changements de niveaux de vie par une augmentation de la biodiversité et de l'énergie disponible.

⁹Bois Raméal Fragmenté en français, Ramial Chipped Wood (RCW) en anglais, Aparas de Ramos Fragmentados (ARF) en portugais, Madera Rameal Fragmentada (MRF) en espagnol, et Fragmentiertes Zweigholz (FZH) en allemand.

2- La rationalité de la fragmentation

43 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 curiosité d'en mesurer les effets. En réalité, peu se soucient de la chose et n'espèrent que la disparition de cette "nuisance". J'en veux pour preuve l'exportation de ces branches hors de la forêt, abattue pour cause de rentabilité accrue (**Freedman B, [1990] in Lemieux G.[1991]**). 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.

3- Les caractéristiques d'une nourriture plutôt que d'un fertilisant

44 La notion de nourriture implique l'association de deux aspects que sont l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le système et celle des composantes chimiques (fertilisants) et leurs intermédiaires biochimiques (protéines, acides aminés, sucres, cellulose etc.) Très tôt, il nous a fallu dériver des concepts traditionnels menant directement à la minéralisation, c'est-à-dire la dissociation entre l'énergie et les nutriments. Ainsi, le traitement des matières organiques d'origines 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 à hautes températures (**Kirk, T.K & Farrell, R.L. [1987]**).

4- Les principes qui appellent la fragmentation

45 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.

46 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 T.K. & Fenn, P. [1982]), (Tien, M. & Kirk, T.K. [1983]), (Kirk, T.K. & Farrell [1983]), (Lewis, N.G., Razal, R.A. & Yamamoto [1987]), (Leisola, M. & Waldner, R [1988]). (Leisola, M. & Garcia, S. [1989]) et (Leatham, G.F., & Kirk [1982]). 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 pollués 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.

47 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]. 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.

48 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, J.S., Marletta, M.A. & Kilbanov, A.M. [1986]**), (**Erickson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P. [1990]**), (**Garcia, S., Latge, J.P., Prévost, M.C. & Leisola, M.S.A [1987]**), (**Jones, A. & O'Carroll, L. [1989]**)

49 Toute 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 qui 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, M.P. & Perry, D.A. [1987]**), (**Amaranthus, M.P., Li, C.Y. & Perry, D.A. [1987]**), (**Hintikka, V. [1982]**, **Kirk, T.K. & Fenn, P. [1982]**), (**Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L., & Brainerd, R.E. [1989]**). Pour ce qui est du rôle des Basidiomycètes dans la structuration du sol, considéré encore une fois sous l'angle de la dégradation, un bon nombre d'auteurs nous ont apporté des renseignements précieux comme: (**Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P. [1990]**), (**Hintikka, V. [1982]**, **Kirk, T.K. & Fenn, P. [1982]**), (**Levy, J.F. [1979]**, **Rayner, A.D.M., & Boddy, L. [1988]**), (**Tate, R.L. [1987]**), (**Vaughan, D. & Ord, B.G. [1985]**).

50 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, était un mur qu'il fallait franchir, si nous voulions comprendre quelque chose à ce que nous observions.

51 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 coeur 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.

52 Nous avons appris beaucoup à ce chapitre des auteurs qui suivent: (Anderson, J.M. [1988]), (Anderson, J.M., Coleman, D.C. & Cole C.V. [1981]), (Bachelier, G. [1978]), (Breznak, J.A. [1982], Laroche, L. [1993]), (Laroche, L. Pagé, F. Beauchamp, C. & Lemieux, G. [1993]), (Pagé, F. [1993], Parkinson, D. [1988]), (Sauvesty, A. Pagé, F & Giroux, [1993]), (M. Swift, M.J. [1976], Swift, M.J., Heal, O.W., & Anderson, J.M. [1979]), (Toutain, F. [1993]). 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 la translocation 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, avec l'utilisation du glucose comme source énergétique.

VI- La lignine

53 Comme nous l'avons souligné plus haut, 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, J.S., Marletta, M.A. & Kilbanov, A.M. [1986]). (Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P. [1990]), (Garcia, S. Latge, J.P. Prévost, M.C. & Leisola M.S.A. [1987]), (Glenn, J.K. & Gold, M.H. [1985]), (Jones, A. & O'Carroll, L. [1989]), (Kirk, T.K. & Farrell, R.L. [1987]), (Leatham, G.F. & Kirk, T.K. [1982]), (Kirk, T.K. & Fenn, P. [1982]), (Leisola, M.S.A & Waldner, R. [1988]), (Leisola, M.S.A. & Garcia, S. [1989]), (Lewis, N. G., Razal, R.A. & Yamamoto, E. [1987]), (Rayner, A.D.M. & Boddy, L. [1988]), (Stott, D.E., Kassim, Jarrell, J.P., Martin, M. & Haider, K. [1993]), (Tate, R.L. [1987]), (Vaughan, D. & Ors, B.G. [1985]) et (Vicuna, R. [1988]).

54 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.

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

1- La question des nutriments

56 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.

57 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 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.

58 Comme l'ont démontré plusieurs auteurs (**Amaranthus, M.P. & Perry, D.A. [1987]**), (**Amaranthus, M.P. & Perry, D.A. [1988]**), (**Bormann, F.H, Likens, G.E. [1979]**), (**Flaig, W. [1972]**), (**Gosz, J.R. & Fischer, F.M. [1984]**), (**Gosz, J.R., Holmes, R.T., Likens, G.E. & Bormann, F.H. [1978]**), (**Martin, W.C., Pierce, R.S., Likens, G.E. & Bormann, F.H. [1986]**), il est possible d'apporter des changements très importants dans le comportement des écosystèmes, en faisant varier les facteurs biologiques qui auront un impact important sur les nutriments, soit la forme de ces derniers dont les répercussions physico-chimiques sont incommensurables.

59 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.

60 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 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.

2- *Le cycle biologique de l'eau en climat tropical*

61 Nous posons l'hypothèse que (4)*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. Les observations préliminaires, tant au Québec qu'au Sénégal, montrent des rendements accrus et des consommations d'eau très réduites.* C'est sur la foi de ces observations que nous posons cette hypothèse, puisque le phénomène se répète, il est insolite et nous n'avons pas trouvé trace d'explications convaincantes dans la littérature.

3- *Les nutriments "chimiques"*

62 En ce qui regarde les nutriments, tout au moins l'azote, le phosphore, le potassium et le magnésium, non seulement nous n'avons pas noté de carences, mais au contraire des améliorations sensibles des réserves le cas du phosphore étant particulier.

4- *L'azote*

63 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 fallut 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: **(Dommergues, Y, & Bauzon, D. [1975]), (Rouquerol, T., Bauzon, D. &**

Dommergues, Y. [1975]), (Thomas-Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. & Balandreau, J. [1979]), (Thomas-Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. & Balandreau, J. [1982]), (Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Pizelle, G. & Petitdemange, É.[1990]). (Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Janin, G., Toutain, F. [1995]). (Parkinson, D. [1988]), (Stott, D.E., Kassim, G., Jarrell, M., Martin, J.P. & Haider, K.[1993]), Swift, M.J. [1976]), Tate, R.L. [1987]), (Vaughan, D. & Ord, B.G. [1985]).

64 Dans l'ensemble, il nous est apparu que la règle générale de 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. Ceci nous permet de poser l'hypothèse suivante: (5) *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.*

5- Le phosphore

65 Cet élément a toujours été la source de difficulté 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 volatil uniquement 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, T., Bauzon, D. & Dommergues, Y. [1975]).

66 A ce jour, des études non publiées nous montrent l'augmentation de la phosphatase alcaline à partir de celle 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 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, W., [1972]), (Ratnayake, M. Leonard, R.T. & Menge, J.A. [1978]), (Swift, M.J., Heal, O.W. & Anderson, J.M. [1979]), (Vaughan, D. & Ord, B.G. [1985]). Nous posons donc l'hypothèse que: (6) *non seulement les BRF apportent des nutriments au sol, mais également un grand nombre de mécanismes pour en réguler la synthèse ou le débit*¹⁰.

67 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]), (Guay, E, Lachance, L. & Lapointe, R.A. [1982]), (Larochelle, L., Pagé, F. Beauchamp, C & Lemieux, G [1993]), (Lemieux, G. & Lapointe, R.A.[1985]), (Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1989]), (Lemieux, G. & Toutain, F. [1992]), (Michaud, M. [1993]), (Pagé, F. [1993]), (Seck, M.A. [1993]), (Seck, M.A. in Lemieux G. [1994]), (Toutain, F. [1993]), (Tremblay, Y., [1985]). 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 agricoles basées sur des techniques

¹⁰Cette régulation se fait par des systèmes enzymatiques de préférence mais également par des déplacements chimiques. Ces systèmes sont d'origine allogène (provenant des BRF) ou endogènes (sous l'action de l'activité microbiologique).

empiriques s'il en est, dont l'unique but est de retirer les nutriments des déchets de cultures.

68 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.

VII- Un premier essai de synthèse

1- L'eau en sus ou en moins

69 Au fil des ans et des résultats qui se répètent, nous en sommes venus à considérer les BRF sous l'angle d'une substance "nutritielle" portant en elle l'aptitude et la capacité de constituer sa propre identité, sous la forme d'un complexe organo-minéral par dépolymérisation, rétrosynthèse, dégradation et combustion enzymatique. La présence de l'eau est un facteur clé du système. L'impossibilité de la lignine de se dépolymériser en présence d'eau, donc en absence d'oxygène, pourrait être la cause des blocages que nous observons dans ces conditions, tant en foresterie qu'en agriculture. Les meilleurs rendements se retrouvent toujours sur des sols mésiques et bien drainés, mais sans excès.

70 Ainsi, la lignine évoluant avec peine donnerait des tanins et des polyphénols dans l'accumulation de tissus végétaux, et leur conservation dans les tourbes sur des périodes excédant le millénaire. À l'inverse, si l'eau est déficitaire et l'évolution des tissus végétaux entravée, ceux-ci s'accumulent en surface avec souvent de grandes concentrations de polyphénols, le plus souvent synthétisés par les plantes elles-mêmes (exemple les Dicotylédones). Cette situation est fréquente sous nos conditions de climat tempéré; elle est reliée à un matériau géologique très filtrant ou une forte pente. Il en va autrement sous les tropiques où la disponibilité de l'eau est liée à la fréquence de sa disponibilité.

71 Une répartition égale de l'eau, mais déficitaire, sur des formations géologiques d'origine sédimentaire et riches en calcium faciliteront les grandes formations de Monocotylédones sur des sols profonds. Elle sera moins stable en présence d'excédent d'eau, montrant une absence de structure véritable. À l'inverse, en période de déficit de précipitations, ces sols sont susceptibles à l'érosion éolienne. Ce fut le cas à plusieurs reprises dans les plaines centrales de l'Amérique du Nord.

2- Le rôle structurant de la lignine

72 Dans ce dernier cas, il semble bien que la structure de la lignine elle-même, et la variabilité de la présence de groupements méthoxyles soient les causes directes de cette instabilité. Du même souffle, ces sols sont souvent propices aux grandes cultures dominées par les Monocotylédones, mais avec des rendements souvent minimes. Le travail mécanique de ces sols semble attaquer grandement leur structure et en accélère la métabolisation, faute de pouvoir remplacer les pertes.

73 Nous posons donc l'hypothèse suivante: *(7)l'origine de la lignine, et de la position et du nombre de groupements méthoxyles seraient responsables de la structure du sol en fonction de son régime hydrique et de celui des précipitations.*

3- Le rôle des chaînes trophiques

74 Si cette hypothèse pouvait être vérifiée, nous aurions une explication aux phénomènes qui rendent la végétation si fragile en climats tropicaux, et particulièrement en conditions sahéliennes. La course à la recherche de l'eau serait due à un affaissement des systèmes vivants telluriques, dans lesquels l'économie de l'eau s'effectue comme les autres nutriments, à l'abri des contraintes chimiques et biologiques qui prévalent dans les sols soumis à de hautes températures quotidiennes. Ceci serait donc la réponse à nos observations qui

veulent qu'en présence d'un système biologique actif et équilibré, nous ayons des augmentations de rendement et des diminutions des besoins en eau pour la croissance. Ces observations valent aussi bien pour les climats tempérés que tropicaux.

75 Nos observations nous permettent de formuler une seconde hypothèse apportant ainsi un autre éclairage sur l'interprétation de nos résultats: (8) *la biodiversité et la qualité de la vie du sol seraient les premiers agents de conservation et d'utilisation de l'eau préservée et disponible à l'intérieur de systèmes biologiques à l'abri des cycles chimiques du sol.*

4- Pour vivre à l'extérieur des contraintes chimiques du sol

76 Nous croyons cette hypothèse parfaitement plausible, puisqu'ainsi la forêt aurait développé, au cours de millions d'années des mécanismes biologiques permettant de court-circuiter les comportements nocifs et délétères d'un grand nombre de produits chimiques, issus directement de l'activité de la végétation de l'écosystème épigé. Nous aurions ainsi une explication logique de la dégradation des sols, tributaires dans un premier temps de la biodiversité initiée et maintenue par la forêt qui, à la disparition de cette dernière, ne peut produire faute d'«alimentation». Dans cette conjoncture, le sol devient le centre de la vie en faisant le stockage, la libération et la mise en disponibilité des nutriments à la "demande" même des plantes.

77 Pour qu'une telle possibilité puisse se réaliser, il est indispensable de posséder une source d'énergie stable. Cette source diversifiée doit contenir des substances convenant au système. Cette vaste diversité n'est présente que dans le bois raméal, alors que le bois caulinaire est déficitaire sous plusieurs aspects en plus de posséder une lignine hautement polymérisée. Les deux premières sources utilisables seront les acides aminés et les protéines, en parallèle avec les sucres. Par la

suite, ce sera le tour des celluloses, des hémicelluloses et pour terminer, la lignine et ses dérivés.

78 Voilà donc une suite de produits énergétiques et «comestibles» utilisables en tout ou en partie par les différents niveaux trophiques capables de croître et de permettre la reproduction des différents types de vie. La lignine sera également un élément des plus importants, en participant en plus de la chaîne énergétique, à la constitution physique du sol par la réduction et la concentration des noyaux benzéniques, la base même de la structuration du sol en passant par l'acide humique¹¹. Cette relation entre les nutriments et la fraction minérale du sol est assurée par la lignine et ses dérivés humiques, par la formation des agrégats et la chélation du fer.

79 Ces agrégats jouent un rôle primordial dans la fertilité, en ce qu'ils constituent la base de la structure du sol, son atmosphère, etc., tout en étant une source de nourriture pour les microorganismes. Il en résulte que les agrégats auront une vie limitée et devront être remplacés sans cesse. Ils fournissent refuge aux microorganismes comme les bactéries ou des formes enkystées, en plus d'être une source d'énergie et de nutriments.

5- La cause majeure de la dégradation des sols tropicaux.

80 Comme nos mesures et observations nécessitent des interprétations, nous avons opté pour une interprétation forestière à la lumière de ce que nous venons de décrire. Nous posons donc l'hypothèse suivante: *(9) les BRF sont la source de nutriments et d'énergie dont la lignine est le principal agent de stabilité et de contrôle du sol, à la condition d'être sous la forme d'oligomères facilement dépolymérisables par les Basidiomycètes. Les produits ainsi obtenus peuvent faire l'objet d'une utilisation biologique immédiate, d'une rétrosynthèse ou de la constitution d'humus, la base*

¹¹ Il s'agit d'une macromolécule dont nous n'avons trouvé trace de la structure chimique dans la littérature. Il en va de même de l'humus, des humates et de l'humine. Ce sont vraisemblablement des restes de la transformation de la lignine très variables après diverses attaques chimiques et biologiques, d'un poids moléculaire élevé avec une fonction acide faible. Il en va donc de l'humus comme de la «matière organique», d'où une grande confusion entre les deux dans la littérature.

même de la fertilité, de la régie des nutriments et de la constitution des réserves énergétiques du sol.

81 Vue sous cet angle, la disparition de la forêt et de tous les mécanismes dépendant de la présence de la lignine et des processus de transformation de cette dernière, devient une catastrophe sans nom. Elle serait donc la réponse à la déperdition des sols et la chute dramatique des rendements. L'application des engrais minéraux n'apporte pas de solution, bien au contraire, elle occasionne des chutes de rendement plus importantes encore. L'introduction de méthodes culturales occidentales fut, à ce chapitre, une véritable catastrophe que tous récusent à grands cris, mais sans apporter des solutions pour autant.

82 Nous posons donc l'hypothèse suivante: (10)*les mécanismes responsables de la fertilité des sols étant universellement d'origine forestière, la disparition de la forêt entraînera à court, moyen ou long terme, une chute de la fertilité et de la productivité. L'utilisation de produits chimiques comme fertilisants a comme conséquence de précipiter l'effondrement de la structure du sol et l'apparition de carences et de parasites.*

83 Plus qu'un problème de disponibilité de nutriments, la dégradation des sols tropicaux sera le fait d'une disparition de l'énergie endogène nécessaire pour la régie des nutriments et de l'eau. En climat tropical les nutriments se logent bien plus au niveau des rameaux que dans le sol même. Ici encore, de vouloir utiliser le sol pour produire à partir de produits chimiques sans énergie est voué à l'échec, comme l'histoire récente nous le montre.

6- La base du fonctionnement des écosystèmes forestiers

84 À mesure que nous avançons 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. Le fait que nous n'ayons jamais sollicité ces mécanismes en dit long sur notre anthropocentrisme.

85 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. Il nous semble que la question énergétique est au centre de la question. Elle l'est sous une forme nutritielle, c'est-à-dire où l'énergie exogène peut être introduite dans les cycles vitaux et associée aux nutriments biochimiques (sucres, graisses, huiles...). Ils sont eux-mêmes porteurs d'énergie endogène.

86 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, 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]). Chez les graminées, il n'y a que de 10% à 40% qui soit dirigé vers l'écosystème hypogé.

87 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 Basidiomycètes, que se noue principalement la nutrition de la plante et les échanges avec le sol. (Allen, T.F.H. & Starr, T.B. [1982]), (Amaranthus, M.P., Li, C.Y. & Perry, D.A. [1987]), (Amaranthus, M.P. & Perry, D.A. [1987]), (Anderson, J.M., Huish, S.A., Ineson, P., Leonard, M.A. & Splatt, P.R. [1985]), (Borchers, S. & Perry, D.A. [1987]), (Clarholm, M. [1985]), (Coleman, D.C. [1985]),

(Fogel, R. & Hunt, G. [1983]), (Hogberg, P. & Pearce, G.D. [1986]), (Ingham, R.E., Troffymow, J.A., Ingham, E.R. & Coleman D.C. [1985]), (Janos, D.P. [1980]), (Lynch, J.M. & Bragg, E. [1985]), (Malloch, D.W., Pirozynski, K.A. & Raven, P.H. [1980]), (Meyer, F.H. [1985]), (Meyer, J.R. & Linderman, R.G. [1986]), (Olsen, R.A., Clark, R.B. & Bennet, J.H. [1981]), (Perry, D.A., Molina, R. & Amaranthus M.P. [1987]), (Rambelli, A. [1973]), (Reeves, F.B., Wagner, D., Moorman, T. & Kiel, J. [1979]), (St-John, T.V. & Coleman D.C. [1982]), (Trappe, J.M. [1962]), (Vogt, K.A., Grier, C.C., & Meier C.E. [1982]), (Whipps, J.M. & Lynch [1986]).

88 Nous avons fait allusion à maintes reprises à l'importance de la lignine dans la constitution du sol et la régie des nutriments par les différents niveaux trophiques. Dans les forêts de Dicotylédones, se retrouvent deux sources de lignine 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. Elles sont très riches en lignine peu polymérisée et sapides pour la microfaune. Elles représentent dans l'érablière une biomasse variant de 2 et 3 tonnes à l'hectare annuellement (Pagé, F. [1993]).

7- Le rôle du bois raméal au niveau de la pédogénèse

89 Les résultats obtenus en milieux agricoles et forestiers, montrèrent dès le début, des résultats qui furent vérifiés par la suite: (Aman, S., Despatie, S., Furlan, V. & Lemieux, G. [1996]), (Beauchamp, C. [1993]), (Guay, E., Lachance, L., & Lapointe R.A. [1982]), (Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1985]), (Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1986]), (Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1988]), (Lemieux, G. & Lapointe R.A. [1989]), (Lemieux, G. & Lapointe, R.A. [1990]), (Lemieux, G. & Tétréault, J.P. [1993]), (Lemieux, G. & Toutain, F. [1992]), (Lemieux, G. [1995]), (Seck, M. A. [1993]). 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.

90 Nous sommes maintenant en mesure de formuler l'hypothèse suivante: (11) *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. Y est associée l'énergie nécessaire assurant à la fois la dynamique et le tribut que toute vie doit payer à l'entropie. L'émission d'énergie couvre partiellement ou totalement le spectre électromagnétique.*

8- La deuxième loi de la thermodynamique: l'entropie et la biologie du sol

91 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. Nous avons toujours été frappés par l'inhibition de la productivité sous les tropiques, où les sols sont dégradés, 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.

92 L'évolution rapide des BRF en climat tropical et la stagnation en milieu arctique nous semblent provenir directement d'une inversion dans la distribution de l'énergie exogène, c'est-à-dire provenant du soleil. Dans les deux cas, le sol est incapable de payer son tribut à l'entropie en émettant de l'énergie par rayonnement. Ce raisonnement nous mène directement au coeur de la question énergétique dont les connaissances évoluent rapidement de nos jours avec les grandes découvertes des systèmes stellaires. C'est avec une meilleure connaissance de la matière que nous sommes en mesure de mieux comprendre. Ainsi, la constitution de cette dernière et les relations entre tous les éléments de l'univers sous la forme d'un continuum,

couvrent l'ensemble du spectre électromagnétique depuis les quarks jusqu'aux molécules. La suite est prévisible avec les macromolécules, les virus, les cellules, les tissus et les espèces dont les plus évoluées deviennent les moins nombreuses (Reeves, H, [1992]), (Prigogine, I, & Stengers, I. [1984]).

93 Nul ne peut contester qu'entre la vie et la mort, il y a un phénomène mesurable qui est celui de l'émission de chaleur. Ceci implique la nécessité de la présence d'une source énergétique endogène qui ne peut se manifester qu'en présence d'une quantité énergétique exogène nécessaire (température ambiante).

94 Bien avant l'abondance de fertilisants pour exprimer la fertilité d'un sol, l'énergie endogène est le facteur déterminant. Toutefois, l'évolution des polyphénols est susceptible de bloquer cette énergie nécessaire, d'où la perte de fertilité, même en présence d'énergie endogène. C'est le cas des sols organiques en milieux arctiques, handicapés à la fois par un manque d'énergie exogène, et par des polyphénols et tanins *sui generis* comme résultat final de l'évolution.

95 En milieux tropicaux, la dégradation des sols me semble plutôt liée à l'absence d'énergie disponible à cause de la surabondance d'énergie exogène, forçant le métabolisme de l'écosystème à tout consommer en peu de temps, ne laissant que des formes de vie peu actives et peu productives.

96 C'est ainsi que la forêt tropicale est la seule habilitée à contourner l'inconvénient qui découle de cette suractivité métabolique du sol, en limitant la disponibilité des nutriments biochimiques, ce qui bloque l'accès à des sources énergétiques endogènes qui profiteraient avant tout à l'écosystème hypogé au détriment de l'épigé. Dans cette optique, la chute d'un important volume de tissus riches en nutriments et en lignine, l'émission de la majorité de sa productivité vers le sol, et la transformation de la lignine du système racinaire permettent de fournir l'énergie nécessaire au sol. Ainsi, le métabolisme étant très rapide sous ces conditions, le «réservoir» de nutriments devient l'arbre

lui même qui ne permet qu'une vie réduite, mais active de l'écosystème hypogé.

97 Dans cette conjoncture, le tribut à payer à l'entropie se ferait d'abord au niveau des arbres, puis du sol en général. Ainsi, on comprend mieux pourquoi la disparition des arbres lors de l'exploitation de la forêt, souvent pour des raisons industrielles, devient catastrophique, en ne laissant que des sols pauvres et peu fertiles à l'agriculture, ce qui est le lot du continent africain en particulier.

98 Nous posons donc l'hypothèse suivante: (12) *le bois raméal apporte avec lui une énergie endogène permettant de payer le tribut incontournable à l'entropie en permettant l'accès aux divers nutriments. Il en sera de même en instaurant des mécanismes enzymatiques propres à en faire la synthèse ou à les rendre accessibles.*

9- Les aspects nutritionnels des BRF

99 Cette hypothèse implique que les BRF soient perçus d'abord et avant tout comme un «aliment» complet où nutriments et énergie sont intimement associés. En formulant cette hypothèse nous sommes conscients de provoquer un choc dans les idées reçues et qui ont fait que l'agriculture s'est développée avec des augmentations de productivité que nous n'avons jamais connues auparavant. Nous sommes tout à fait conscients que ce n'est pas en quelques décennies que nous pouvons changer les perceptions de base de l'industrie responsable des fondements de la vie sur terre. Nous sommes également conscients que cette hypothèse peut, et doit arriver à modifier en profondeur, et l'écologie et l'économie d'un grand nombre de pays dont les principaux sont en climats tropicaux.

100 L'efficacité du bois raméal à modifier en profondeur le milieu agricole, en portant plus haut la productivité, nous le présente sous les aspects d'un "aliment", ce qui confère au sol son caractère vivant, mais à multiples facettes. Ici, la vie est diversifiée, intriquée, composée de

tous les niveaux possibles, dépendants les uns des autres, où la «vie et la mort» sont intimement associées dans la régie des nutriments chimiques dont la structure générale sera assurée par l'évolution de la lignine et des polyphénols.

101 En plus, il est remarquable de constater, qu'un grand nombre de mécanismes physico-chimiques, chimiques et biochimiques sont à la base de ces équilibres. Mentionnons la chélation des métaux lourds dont le fer, la régulation de la dissociation des ions hydrogènes et hydroxyles, la production de systèmes protéiques, toujours réversibles que sont les enzymes participant à l'alimentation azotée et phosphorée. Cette réversibilité est la base même de la régulation, mais dans le cas du sol, ces mécanismes ne sont pas uniques. Il y a une autre régulation où la vie elle-même intervient par l'émission d'énergie accumulée dans sa propre masse donnant un ensemble d'éléments supplémentaires eux-mêmes réversibles comme la structure, une atmosphère contrôlée auxquels s'associent de nombreux phénomènes d'inhibition biologique d'ordre polyphénolique.

10- La pédogénèse en forêt de Gymnospermes

102 Cette réversibilité des «phénomènes intimes de la pédogénèse» est l'apanage même de la vie où les nutriments sont associés à l'énergie qui peut être réémise par dégradation biologique. On peut donc s'interroger sur la notion de qualité de cet "aliment", son homogénéité ou, à l'inverse, sa grande diversité. Ainsi, nous avons observé de grandes différences dans le comportement des essences utilisées. La première concerne les Gymnospermes (conifères) et les Angiospermes Dicotylédones (ligneux feuillus) dans l'efficacité de la transformation dans le sol, les premiers étant la cause de blocages, empêchant toute l'évolution favorable à la structuration du sol, ainsi qu'à la croissance et la germination des plantes. 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.

11- La pédogénèse sous les forêts d'Angiospermes Dicotylédones

103 Au contraire, les essences ligneuses des Angiospermes Dicotylédones semblent avoir recours à un système à l'opposé, en accueillant et suscitant la venue de nombreuses espèces, tout en assurant la complémentarité de chacune. C'est une stratégie basée sur la biodiversité et la complémentarité, mais toutes les essences sont loin d'être égales entre elles. Il faudra beaucoup de travail exploratoire pour les comprendre et voir les actions spécifiques à l'intérieur des mécanismes pédogénétiques. Nos expériences sur la germination des arbres (Lemieux, G. & Lapointe R.A. [1989]), portant sur une période de cinq ans, nous le confirment bien. Il en va de même en Côte d'Ivoire (Aman, S., Despatie, S, Furlan, V. & Lemieux, G. [1996]), où une comparaison systématique de quatre essences différentes a été faite entre lors de la culture du maïs, montrant des variations importantes dans les rendements. Des comparaisons analogues ont été signalées au Sénégal, dans la région de Ziguinchor, en reliant les effets d'*Acacia mangium* et ceux de *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*. (Lemieux, G. [1994]).

104 Ces deux modes de gestion de la concurrence, l'un archaïque et l'autre plus "moderne", nous permettent de poser l'hypothèse suivante:(13) *la structure de la lignine et son évolution dans l'ensemble des mécanisme 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.*

12- Origine et répartition des sols aptes à l'agriculture

105 Cette hypothèse en rejoint une autre que nous formulerons plus loin en ce qui regarde l'évolution de l'agriculture. Des observations faites récemment en République Dominicaine (**Lemieux, G., Marcano, J. & Gonzalez, A. [1994]**), montrent que même sous les tropiques, les sols de forêts conifériennes (*Pinus occidentalis*) étaient impropres à l'agriculture tout comme dans les pays à climat tempéré. Nous avons longtemps estimé que les sols de forêts conifériennes étaient impropres à la culture à cause de la pluviométrie, du nombre de jours sans gel, du pH trop bas ou trop élevé, d'une mauvaise structure, d'une roche-mère trop filtrante, etc. Nous pensons maintenant, bien que ces observations soient exactes, que la raison fondamentale reposerait avant tout sur le type de pédogénèse donnant des sols polyphénoliques, éliminant à toutes fins utiles la concurrence, ne laissant que quelques espèces spécialisées dans ce type de milieu, mais formant de grandes populations.

106 Ces commentaires et observations ouvrent la porte à une autre hypothèse qui viendrait confirmer l'importance du type de lignine sur les mécanismes pédogénétiques. Un tour d'horizon sur le développement du peuplement humain tributaire de l'agriculture, montre que c'est la transformation des sols de la forêt feuillue qui a donné naissance à une agriculture permettant l'accumulation de richesse et de bien-être, depuis les débuts de l'humanité. C'est en milieu forestier feuillu que l'homme prend naissance en Afrique orientale semble-t-il, il y a un million d'années. Ce n'est certainement pas un hasard! Ceci s'avérera exact pour l'Europe, l'Asie et l'Amérique.

107 L'ensemble de l'Afrique est sous l'emprise de la forêt feuillue, alors qu'aux mêmes latitudes, l'Amérique latine est bien plus nuancée avec plusieurs écosystèmes tropicaux de conifères.¹² C'est ainsi que nous avons pu prendre conscience de la différence entre les écosystèmes feuillus et conifériens, et un survol des tropiques nous a

¹²Le genre *Pinus* y est le plus important.

confirmé que c'est la forêt feuillue qui donne les terres à vocation agricole. On fait les mêmes observations plus au nord tant en Amérique, en Europe qu'en Asie. La question de savoir pourquoi les sols africains, originaires de la forêt feuillue, sont si peu productifs, se pose automatiquement. La réponse que nous avons trouvée réside dans l'effondrement des mécanismes pédogénétiques avant tout d'origine biologique, alors que nous avons cherché la réponse du côté des mécanismes chimiques et physiques.

108 Nous formulons donc l'hypothèse suivante: (14)*les mécanismes pédogénétiques propres à la forêt feuillue sont tributaires de la structure de la lignine, permettant un cyclage harmonieux des nutriments et de vastes adaptations, et une productivité sans pareille. Ainsi, elle donnera des peuplements inéquiens de forêts climaciques, alors que les Gymnospermes auront tendance à donner des forêts équiennes, non climaciques et à comportements catastrophiques. Les forêts feuillues ont permis l'invention et la pérennité de l'agriculture sous tous les cieux.*

13- Quelques réflexions sur le bois raméal

109 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.

110 Ces résultats mettent en lumière l'importance des mécanismes d'origine forestière qui gouvernent à la fois la structure, la fertilité et la productivité du sol. Nous posons donc l'hypothèse suivante: (15) *les sols agricoles dérivés de la forêt feuillue, sous toutes les latitudes, peuvent être considérés comme des sols forestiers dégradés pour les besoins de l'homme. L'application de BRF permet le retour de la*

fertilité, en activant les mécanismes de régénération, en favorisant la régie et le contrôle des chaînes trophiques ainsi que la structure du sol.

111 Nous sommes persuadés qu'un tel énoncé soulèvera des vagues d'incrédulité dans un premier temps mais qui, devant les faits, devront s'atténuer peu à peu. Nous avons toujours été frappés par l'approche "agricole" de la foresterie moderne, et par la conception et l'adaptation industrielles de l'agriculture aux besoins de l'homme. Nous proposons, à travers les connaissances nouvelles que nous apportons, de regarder les sols agricoles à travers les mécanismes pédogénétiques, d'abord biologiques, puis biochimiques, et finalement chimiques et physiques. Les techniques relatives aux sols agricoles devraient avoir dès l'abord une considération nutritive plutôt que chimique, hydrodynamique, physico-chimique ou autres.

112 Plusieurs fausses pistes ont été empruntées au cours du dernier siècle; elles ont limité la réflexion par l'utilisation de systèmes de plus en plus artificiels, basés à la fois sur le concept de «nutrition minérale des plantes» et de «matière organique».

113 Le premier concept a permis d'accumuler un nombre incalculable de données scientifiques, vérifiables mathématiquement, et qui ont apporté une véritable révolution sociale sous tous les cieux. Toutefois, il faut reconnaître que nous avons atteint un palier au point de vue économique, et que toutes les mesures d'artificialisation font grimper les coûts en flèche et limitent l'accès aux productions, voire même les interdisent.

114 Le second concept s'avère beaucoup plus pernicieux, en ce qu'il ne peut se définir chimiquement et donne toujours des résultats qu'il est difficile sinon impossible de répliquer, montrant ainsi la faiblesse du concept. C'est en se retournant vers le passé que la tradition «organique» a pris du galon, en faisant la promotion sous tous azimuts de l'utilisation et de la fabrication des composts et des fumiers. C'est à travers les mécanismes de minéralisation que se sont avancés les utilisateurs, et encore à court terme. La réaction des Africains, en ce qui

regarde la matière organique, est tout à fait juste dans l'optique déchétiaire proposée par les pays nantis du nord: nous n'en avons pas et lorsque nous en avons, elle est immédiatement consommée dans le sol. Il va de soi que la filière dite «organique» a un avenir très précaire dans ces conditions, d'autant plus que les quantités de déchets compostables sont aléatoires et limitées alors que les pertes énergétiques beaucoup trop importantes et représentent une perte considérable, qui lors du compostage aurait autrement pu être introduite dans le système même.

115 Ce sont les raisons pour lesquelles nous sommes amenés à proposer la technique forestière de production de BRF pour des besoins strictement agricoles. Il est techniquement possible et économiquement rentable de produire les quantités de BRF nécessaires à la mise en place de tous les mécanismes de régie du sol, à partir de la biologie et de la biochimie ancillaire. De plus, nous croyons qu'avec un peu d'effort, il sera possible de convaincre les utilisateurs en inscrivant cette technologie directement dans la culture et la tradition. Ainsi, la production de BRF peut et doit être régie en parallèle avec les besoins, alors que ceci est impossible par les techniques déchétiaires de compostage qui sont beaucoup trop coûteuses et rapportent trop peu en fonction des déboursés d'énergie humaine.

14- La désertification et l'énergie endogène des sols.

116 Les propos que nous venons de tenir ouvrent la porte à une compréhension nouvelle des processus de désertification, en laissant entrevoir des techniques simples et qui seraient susceptibles de corriger le mal à sa source même. Il faudra consacrer des efforts considérables pour faire comprendre la nécessité de retourner au sol l'énergie nécessaire à sa conservation et à sa productivité. La solution viendra sans doute de la compréhension des mécanismes liés à la dépolymérisation de la chaîne des polyphénols qui donnent accès aux mécanismes de régulation, dont l'eau sera le plus éclatant et le plus apprécié. Nous posons comme hypothèse que (16)*la question énergétique à partir de*

la lignine et de ses dérivés est la base de la lutte à la désertification et à la remise en production des terres arables.

117 Nous sommes enclins à penser que cette «lutte» devrait s'inscrire dans un vaste plan d'ensemble, dont la diffusion pratique se ferait selon les techniques traditionnelles de tous les peuples africains, qui est avant tout orale. Il faut absolument traduire ces propos en langage oral, compatible avec la compréhension traditionnelle. Il faudra éviter l'imposition *ad nominem* du discours scientifique véhiculé par une langue écrite et accessoirement orale. La diffusion devra donc se faire dans la langue des ethnies, faute de quoi tout va s'écrouler.

VIII- Le programme de recherche

118 Il devra comporter plusieurs volets dont les aspects fondamentaux seraient les suivants:

- a) La question énergétique du point de vue physique dans le cadre de la thermodynamique. Il pourrait se faire dans les pays du Nord comme du Sud.
- b) La question du rôle des composés polyphénoliques dans la gestion de l'énergie, de sa distribution et de sa qualité dans la gestion des nutriments chimiques et de la formation et le maintien des chaînes trophiques.
- c) La question de la transformation biologique des BRF, les stockages nutritiels et leur relaxation.
- d) L'étude et la compréhension des différents systèmes enzymatiques, en particulier ceux originaires des BRF.
- d) Les essences à cultiver dont l'efficacité sera connue pour la production de BRF.
- e) Les séquences d'application des différentes essences seules ou en mélange.
- f) Les périodes d'application en relation avec les quantités nécessaires.
- g) Les méthodes de fragmentation et d'application.

IX- Hypothèses

(1) *si durant des centaines de millions d'années la forêt avait dominé en l'absence d'agriculture, que lors de l'utilisation du sol après avoir éliminé la forêt, des dégradations importantes apparaissaient et des baisses de fertilité se perpétuaient, c'est que les mécanismes à la base de la fertilité devaient être d'origine forestière. **page 3.***

(2) *les mécanismes qui régissent la fertilité, la pédogenèse, la biodiversité, les productivités primaire et secondaire devaient reposer sur des bases qui n'apparaissent pas clairement dans la littérature scientifique du siècle qui s'achève. Nous en tirons la conclusion que seul le productivisme était la base de tous les raisonnements. **page 4***

(3) *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. **page 14.***

(4) *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. **page 24.***

(5) *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. **page 25.***

(6) *non seulement les BRF apportent des nutriments au sol, mais également un grand nombre de mécanismes pour en réguler la synthèse ou le débit. **page 26.***

(7) *l'origine de la lignine, et de la position et du nombre de groupements méthoxyles seraient responsables de la structure du sol en fonction de son régime hydrique et de celui des précipitations. **page 28.***

(8) *la biodiversité et la qualité de la vie du sol seraient les premiers agents de conservation et d'utilisation de l'eau préservée et disponible à l'intérieur de systèmes biologiques à l'abri des cycles chimiques du sol. **page 29.***

(9) *les BRF sont la source de nutriments et d'énergie dont la lignine est le principal agent de stabilité et de contrôle du sol, à la condition d'être sous la forme d'oligomères facilement dépolymérisables par les Basidiomycètes. Les produits ainsi obtenus peuvent faire l'objet d'une utilisation biologique immédiate, d'une rétrosynthèse ou de la constitution d'humus, la base même de la fertilité, de la régie des nutriments et de la constitution des réserves énergétiques du sol. **page 31.***

(10) *les mécanismes responsables de la fertilité des sols étant universellement d'origine forestière, la disparition de la forêt entraînera à court, moyen ou long terme, une chute de la fertilité et de la productivité. L'utilisation de produits chimiques comme fertilisants a comme conséquence de précipiter l'effondrement de la structure du sol et l'apparition de carences et de parasites. **page 31.***

(11) *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. Y est associée l'énergie nécessaire assurant à la fois la dynamique et le tribut que toute vie doit payer à l'entropie. L'émission d'énergie couvre partiellement ou totalement le spectre électromagnétique. **page 34.***

(12) *le bois raméal apporte avec lui une énergie endogène permettant de payer le tribut incontournable à l'entropie en permettant l'accès aux divers nutriments. Il en sera de même en instaurant des mécanismes enzymatiques propres à en faire la synthèse ou à les rendre accessibles. **page 37.***

(13) *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. **page 39.***

(14) *les mécanismes pédogénétiques propres à la forêt feuillue sont tributaires de la structure de la lignine, permettant un cyclage harmonieux des nutriments et de vastes adaptations, et une productivité sans pareille. Ainsi, elle donnera des peuplements inéquiens de forêts climaciques, alors que les Gymnospermes auront tendance à donner des forêts équiennes, non climaciques et à comportements catastrophiques. Les forêts feuillues ont permis l'invention et la pérennité de l'agriculture sous tous les cieux. **page 41.***

(15) *les sols agricoles dérivés de la forêt feuillue, sous toutes les latitudes, peuvent être considérés comme des sols forestiers dégradés pour les besoins de l'homme. L'application de BRF permet le retour de la fertilité, en activant les mécanismes de régénération, en favorisant la régie et le contrôle des chaînes trophiques ainsi que la structure du sol. page 41.*

(16) *la question énergétique à partir de la lignine et de ses dérivés est la base de la lutte à la désertification et à la remise en production des terres arables. page 44.*

X- 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.** (1996) «Effects of chopped twig wood (CTW) on maize growth and yields in the forest-savanna transition zone of Côte d'Ivoire» En voie de publication.
- 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. & 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., 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. *Mychorrhizae 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, 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.
- 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.
- 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.

- Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. & Balandreau, J.** (1982) «A more effective method for counting and isolating nitro-fixing rhizosphere bacteria». In Non-symbiotic nitrogen fixation Newsletter, Australia 7: 3-6.
- Boddy, L.** (1983) «Carbon dioxide release from decomposing wood: effect of water content and temperature». *Soil. Biol. Biochem.* **15 (5)** : 501-510.
- Borchers, S. and D. A. Perry** (1987) «Early successional hardwoods as refugia for ectomycorrhizal fungi in clearcut Douglas-fir forests of southwest Oregon». Page 84 in D.M. Sylvia, L.L. Hung and J.H. Graham eds, *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical applications and Research Priorities*. University of Florida Gainesville.
- Borman, F. H. & Likens, G. E.** (1979) «Pattern and Process in a Forested Ecosystem». Springer Verlag, New York,
- Breznak, J. A.** (1982) «Intestinal microbiota of termites and other xylophagous insects». *Ann. Rev. Microbiol.*, **36**: 323-343.
- Caron, C.** (1994) «Ramial Chipped Wood: a basic tool for regenerating soils». Lincoln University, IFOAM Meeting, Christchurch, New-Zealand. Université Laval, QUÉBEC, 8 pages, ISBN 2-921728-07-9, 1995.
- 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.
- Dommergues, Y. & Bauzon, D.** (1975) «Données récentes concernant l'influence des mycorhizes sur l'absorption minérale et organique chez les plantes» *Sci Sol.* **1**:19-28.
- 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.
- 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.
- 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
- 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» Rapports techniques 1 et 2, Ministère des Terres et Forêts du Québec, Québec. 74 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.
- Hogberg, P. and G. D. Pearce** (1986) «Mycorrhizas in Zambian trees in relation to host taxonomy, vegetation type and successional patterns». *J. Ecol.* **74**:775-785.
- 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.** (1980) «Mycorrhizae influence tropical succession». *Biotropica* **12** (Suppl.): 56-64.
- 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 polycopiées.
- 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.
- Kristeva L. A.** (1953) «The participation of humic acids and other organic substances in the nutrition of higher plants». *Pochvivedenie* **10**: 464-469.

- 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., & 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.
- 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. S. A. & Garcia, S.** (1989) «Le mécanisme de dégradation de la lignine» traduction française du texte anglais original publié dans *Enzyme Systems for Lignocellulose Degradation*, Galway Irlande, p. 88-89. Publié dans «Le bois raméal et la pédogénèse: une influence agricole et forestière directe». Université Laval, Québec. © ISBN 2-550-21267-3. Publication n° ER90-3128.
- Lemieux, G, Lachance, L. et Lapointe, A.** (1989) «L'intersuffisance des écosystèmes épigé et hypogé». Texte original, traduction française et commentaires de Perry. D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G. Borchers, S.L. et Brainerd, R.E. «Bootstrapping in Ecosystems» BioScience 39 (4): 230-237 (1989) Université Laval, Département des Sciences Forestières, 41 pages. © ISBN 2-550-21445-5 Publication n° ER90-3140.
- Lemieux, G, Marcano, J, & Gonzalez A.** (1994) «Rapport de mission en République Dominicaine du 26 avril au 8 mai 1994) Université Laval, 56 pages français/espagnol .
- Lemieux, G. & Goulet, M.** (1992) «"Slyvagraire" und "Sylvasol", neue Wege zum Aufgradieren von Acker -und Waldböden» 4 pages, Düsseldorf. Université Laval, ISBN 2-550-26540-8 FQ 92-3102.
- Lemieux, G. & Lachance, L.** (1995) «Essais d'utilisation du bois raméal fragmenté (BRF) pour la régénération des sols dans les cultures en couloir en milieu africain» Université Laval, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, 16 pages ISBN: 2-921728-14-1.
- Lemieux, G. & Lapointe R. A.** (1985) «Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté». Département des

Sciences Forestières, Université Laval, Québec, 109 pages. © ISBN 2-550-21340-8 Publication no. 3226

- Lemieux, G. & Lapointe, R. A.** (1986) «Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol». Département des Sciences Forestières Université Laval, Québec 17 pages. ©ISBN 2-550-21338-1. Publication no. ER89-1211.
- 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. Publication no. ER89-1250.
- 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. ©ISBN 2-550-21342-4. Publication no. ER89-1276.
- 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. Publication no. ER90-3136
- Lemieux, G. & Tétréault, J.-P.** (1993) «L'origine forestière des sols agricoles: la diversification microbiologique par aggradation sous l'effet des bois raméaux fragmentés». Présenté en conférence à Bruxelles. octobre 1992. Université Laval, 31 pages y compris les discussions © ISBN 2-550-27481-4. Publication n° FQ93-3052.
- Lemieux, 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, FQ94-3014.
- Lemieux, G. & Tétréault, J.-P.** (1994) «Le bois raméal, le système humique et la sécurité alimentaire». Université Laval, Québec, 16 pages, ISBN 2-921728-10-9.
- 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, 13 pages ISBN 2-550-26541-6, FQ92-3103.
- Lemieux, G.** (1992) «L'aggradation des sols par le patrimoine microbiologique d'origine forestière». Escola Superior Agrária de Coimbra PORTUGAL, Université Laval, ISBN 2-550-26521-1 publication n°: FQ92-3099 10 pages.
- Lemieux, G.** (1993) «A universal pedogenesis upgrading processus: RCWs to enhance biodiversity and productivity». Food and Agriculture Organization (FAO) Rome, ISBN 2-921728-05-2, 6 pages. (traduction du français).
- Lemieux, G.** (1993) «L'aggradation pédogénétique, un processus universel sous l'influence des BRP: les effets sur la biodiversité et la productivité». FAO, Rome, décembre 1993. Université Laval, Département des Sciences Forestières. 6 pages.

- Lemieux, G.** (1993) «Le bois raméal fragmenté et la méthode expérimentale: une voie vers un institut international de pédogénèse» in *Les Actes du Quatrième Colloque International sur les Bois Raméaux Fragmentés*, p. 124-138. G. Lemieux et J.P. Tétrault éditeurs, Université Laval, Québec, Canada. © ISBN 2-550-28792-4 FQ94-3014.
- Lemieux, G.** (1994) «La lignine des Dicotylédones ligneuses: son influence universelle sur le système humique», séminaire donné à l'université Pedro Henriquez Ureña, Santo-Domingo, République Dominicaine. Université Laval, Québec, 56 pages. ISBN 2-921728-11-7, 1995.
- 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.
- Lemieux, G.** (1995) «Les germes économiques et scientifiques de la révolution verte au Sahel» Université Laval, Québec 23 pages, ISBN 2-921728-13-3
- 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*, 79:725-7927.
- 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, F. H.** (1985) «Einfluss des Stickstofffaktors auf den Mykorrhizabebatz von Fichtensaemlingen im Humus einer Waldschadensflaeche». *Alleg. Forstzeitschrift* 9/10.
- 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.
- Olsen, R. A., R. B. Clark and J. H. Bennet** (1981) «The enhancement of soil fertility by plant roots». *Am. Sci.* 69: 378-384.

- Pagé, F.** (1993) «L'apport des bois raméaux en sols cultivés: le rôle de la pédofaune sur la transformation de la matière ligneuse». In *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec. (Canada) 187 pages, ISBN 2-550-28792-4, FQ94-3014, 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.
- Prigogine, I. & Stengers I.** (1978) «Order out of chaos». Bantam édit. Toronto, Canada.
- 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.
- 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.
- Rayner, A. D. M. & Coates, D.** (1987) «Regulation of mycelial organization and responses», In *Evolutionary Biology of the Fungi* (Rayner, A.D.M., Brasier, C, M. & Moore D, éditeurs) Cambridge University Press, Cambridge.
- 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 ectomycorrhizes et la nutrition azotée et phosphatée des arbres» Congrès DGRST, mai 1975.
- St. John, T.V. and D.C. Coleman** (1982) «The role of mycorrhizae in plant ecology». *Can. Journ. Bot.* **61**: 1005-1014.
- Sauvesty, A., Pagé, F. & Giroux, M.** (1993) «Impact des milieux pédologiques en bosses et creux sur les teneurs en composés phénoliques et en éléments minéraux dans les feuilles d'érable à sucre en dépérissement au Québec» *Can. Jour. For. Res.* **23**: 190-198.
- Seck, M. A.** (1993) «Essais de fertilisation organique avec les bois raméaux fragmentés de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraîchères des Niayes (Sénégal)». in *Les Actes du Quatrième Colloque International sur les Bois Raméaux Fragmentés*, p. 36-41. G. Lemieux et J.P. Tétreault éditeurs, Université Laval, Québec, Canada. © ISBN 2-550-28792-4 FQ94-3014.
- 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, D., Weinhard, P., Villecourt, P. & Balandreau, J.** (1982) «The spermosphere model. I. Its use in growing, counting and isolating N₂-fixing bacteria from the rhizosphere of rice» *Can. Journ. Microbiol.* 28: 922-928.
- 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.
- Thomas-Bauzon, Kiffer, E., Janin G. & Toutain, F.** (1995) «Méthodologie de recherche des bactéries cellulolytiques diastrophes appliquée à *Sphaerothermes sphaerotorax*. *Science de la Vie/Life Science* 318:699-707.
- Thompson, W.** (1984) «Distribution, development and functioning of mycelial cord systems of decomposer basidiomycetes of the deciduous woodland floor». In *The Ecology and Physiology of the Fungal Mycelium* (Jennings, D.H. & Rayner A.D.M. éditeurs) p. 185-214 Cambridge University Press, Cambridge.
- Tien, M., & Kirk, T. K.** (1983) «Lignin-degrading enzyme from Hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium*» *Burds. Science* 221: 661-663.
- 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 FQ94-3014, 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 (sheet composting) avec apports variables d'engrais de synthèse» Ministère de l'Agriculture, Québec rapport interne, 8 p
- 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 2-921728-15-X

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec 1996

Publication n° 59a

2ième édition

mars 2002

mai 1996

édité par

Le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Faculté de Foresterie et de Géomatique

Université Laval

Québec G1K 7P4

QUÉBEC

Canada

courriel:

gilles.lemieux@sbf.ulaval.ca

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

FAX 418-656-5262

tel. 418-656-2131 poste 2837

ISBN 2-921728-15-X