

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté de Foresterie et de Géomatique

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

«Le bois des rameaux, un élément crucial de la biosphère»

par les Professeurs

Michel Godron et Gilles Lemieux

mai 1998

Publication n° 88

2^e édition juin 2001

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

édité par le

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

UNIVERSITÉ LAVAL

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Québec G1K 7P4

QUÉBEC Canada

Introduction

Le texte des pages qui suivent est le fruit d'un dialogue entre les deux auteurs. La proposition (en italique) est celle de Michel Godron et les commentaires sont ceux de Gilles Lemieux. Des échanges antérieurs ont aboutis à cette discussion sur les fondements mêmes des travaux amorcé au Québec sur les bois raméaux qui, au fil des ans, ont débouché sur les principes de la pédogénèse rendant la méthode expérimentale possible en recherche biologique du sol, chose à peu près irréalisable jusqu'ici.

Les auteurs repassent brièvement toutes les étapes de l'évolution en indiquant les points de discordance entre les Gymnospermes et le Dicoylédones ligneuses, puis les Monocotylédones, en signalant les différents types de lignines qui leurs sont propres et les écosystèmes qui les caractérisent. L'un des points principaux de cette publication touche l'approche par le biais de la physique et des lois fondamentales de la thermodynamique avec des références spécifiques sur la physique des particules. C'est la métastabilité qui fera l'objet d'attentions spéciales et sera un point de référence tout au long de la discussion.

Il est bon de noter que ce n'est pas la chimie qui est le centre de la préoccupation des auteurs, mais bien la physique, un point fondamental fort peu discuté de nos jours, mais qui est le centre des problèmes qui touchent à la fois les forêts et l'agriculture. Ce sont ces réflexions qui apporteront des solutions dans l'interprétation de la dynamique et de la régie des différents types d'énergie dans les écosystèmes naturels ou anthropomorphiques, bien d'avantage que l'apport de nutriments qui ne sont que les vecteurs de la vie, aussi bien celle du sol que de tous les êtres vivants.

Enfin, il est bon de souligner l'importance économique des questions qui sont ici traitées et les appels aux solutions formulées tant par les individus, les nations et les organismes internationaux, mais curieusement de telles réflexions comme celles-ci ne semblent soulever aucun intérêt alors que le centre du problème et des solutions afférentes sont exposées. Ceci indique cruellement l'importance et la profondeur de cette question existentielle.

Il est bon de noter que le texte en italique est celui proposé par Michel Godron et celui en caractères réguliers est celui de Gilles Lemieux.

Professeur Gilles Lemieux
Université Laval
Québec
Canada

LE BOIS DES RAMEAUX, UN ÉLÉMENT CRUCIAL DE LA BIOSPHÈRE

Michel Godron¹
et
Gilles Lemieux²

1- La biosphère est un système très complexe dont toutes les parties sont indépendantes, mais certaines de ces parties jouent un rôle critique lorsqu'elles sont à la charnière active de deux sous-systèmes. C'est le cas des feuilles qui sont les éléments les plus actifs de la végétation et qui sont les constituants premiers de l'humus des sols. Mais c'est aussi le cas des rameaux dont le rôle a été trop longtemps méconnu alors qu'il mérite d'être précisé.

2- Je voudrais que nous nous comprenions bien vous attribuez aux rameaux une valeur à partir encore une fois de prémices physiques qui sont de l'ordre de la physique newtonienne ou quantique alors que j'en suis surtout aux liens multiples qui lient ces physiques à la vie. Je pense bien comprendre votre démarche et je vous saurais gré d'apporter vos commentaires comme vous l'avez si bien fait à la suite de mon article sur l'entropie.

*3- Les travaux de **G. Lemieux (1986-1996)** récemment commentés par **J.-C. Tissaux (1996)** qui donne une bibliographie très complète, ont attiré à juste titre l'attention sur le rôle que peut jouer le bois des rameaux dans la fertilité des sols. Il est possible aujourd'hui, de replacer ces phénomènes dans la perspective de l'évolution générale des systèmes biologiques, pour mieux les comprendre en posant deux questions:*

- *pourquoi les rameaux existent-ils?*
- *pourquoi le bois des rameaux peut jouer un rôle particulier dans l'évolution des sols?*

4- Ces deux questions sont bien campées mais la seconde est bien moins étoffée dans vos propos puisque vous allez vous maintenir dans une perspective évolutionniste à travers la physique. En ce sens, votre approche est bonne; elle dit comment mais pas pourquoi!

1. Pour quoi des rameaux?

1.1 Rappel historique

5- Au cours de l'évolution, depuis l'origine de la vie, les rameaux sont apparus relativement tard, car plusieurs innovations ont dû les précéder. Il faut les rappeler, au moins brièvement si l'on veut comprendre ce que les rameaux représentent dans l'ensemble des êtres vivants.

¹ 18410 Brinon-sur-Sauldre, FRANCE

²Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval, Québec G1k 7P4, Canada

6- *Les êtres vivants sont restés cantonnés dans les océans pendant plus de 3 milliards d'années, et ils n'ont entamé la conquête des continents qu'à la fin du Cambrien. Les végétaux ont donc été seulement, pendant les cinq sixièmes de la durée de la biosphère, des Algues portées par l'eau, qui n'avaient aucun besoin d'acquérir une tige rigide: les Algues ont donc une structure très simple, constituée d'un amas de cellules nommé "thalle", sans tiges, ni racines, ni feuilles, ni fleurs.*

7- *Après avoir passé plusieurs milliards d'années dans les eaux, les êtres vivants ont trouvé le moyen de conquérir les continents. Les premiers végétaux terrestres sont peut-être des Algues, mais vraisemblablement des Lichens qui sont capables de cesser presque complètement de fonctionner pendant les périodes de sécheresse impliquées par la vie terrestre et qui sont "reviviscents" dès qu'ils sont à nouveau imbibés d'eau. Ils sont constitués par une algue et un Champignon qui vivent en symbiose, la première utilisant la photosynthèse et le second améliorant le système nutritionnel. Sous nos yeux, les Lichens sont encore les premiers colonisateurs des milieux extrêmement arides que sont les rochers, les sables, et mêmes les dalles de béton ou les tuiles des toits. Ces végétaux très rustiques se sont dispensés de fabriquer une tige et des rameaux.*

8- *Sous les climats tempérés, les Lichens foliacés, installés dans un creux de rocher, retiennent des particules de sable et de limon apportés par le vent et constituent un embryon de sol épais de quelques millimètres sur lequel les Mousses trouvent une petite réserve d'eau qui leur permet de vivre et d'accumuler un peu plus d'humus.*

9- J'entends bien ici que la définition que vous donnez au mot est celle que nous donnons tous à la matière organique mais cette fois humifiée, Or Tissaux, faisant le tour de la question, souligne l'ambiguïté profonde de ce terme qui tantôt est assimilé à la litière forestière, tantôt à la partie de la matière organique sans préciser ce que cet humus est, sinon en le traitant par des termes chimiques encore une fois non précisés comme des ou des . Or nous sommes de plus en plus enclins à penser que l'humus doit être défini par les polyphénols qu'il contient et surtout l'ensemble des enzymes et microorganismes. Cet ensemble doit être cohérent dans sa dynamique avec les plantes qui lui ont donné sa structure chimique et biologique en ce qu'elle doit avoir un rôle stabilisateur et dynamique à la fois. Il va de soi que la définition actuelle est bien plus commode que celle que je propose, mais elle permet de rien comprendre ni de rien prévoir.

10- Dans le cas qui nous intéresse ici, à moins de se cantonner dans une appréciation physique comme le rôle d'une éponge, il est difficile de comprendre à la fois la statique et la dynamique de la chose

11- *Les Mousses ne peuvent pas avoir une grande taille parce qu'elles n'ont pas de vaisseaux conducteurs de la sève. Un pas important de l'évolution des*

végétaux est franchi avec l'apparition des Rhynales, qui ressemblent à des joncs et se sont fossilisées dans les marais de Rhynie. Ce sont vraisemblablement les premiers Cryptogrammes vasculaires (Fougères, Prêles etc.). Ils possédaient des vaisseaux qui leur ont permis de faire monter la sève jusqu'en haut de leurs tiges, de dominer ainsi les Algues, les Lichens et les Mousses qui restaient collées au sol. C'est la course à la lumière, c'est-à-dire la chasse au photon, qui les a conduits à développer la structure complexe de leur tige vascularisée, qui a été jusqu'à produire les Fougères arborescentes des immenses forêts du Primaire. Nous ne savons pas si les accumulations de charbon du Carbonifère résultent de la faible minéralisation de l'humus des forêts de cette époque ou si elles ont essentiellement des causes géomorphologiques liées à la rhexistasie (H. Erhart, 1967). Aujourd'hui les Fougères sont reléguées dans des habitats relictés en particulier parce que leur cycle de reproduction exige la germination des prothalles en milieux aquatiques.

12- Les Fougères n'ont que des fondes et ne possèdent pas encore de vrais rameaux. Le "tronc" de Fougères (comme celui des palmiers) ne comporte pas l'assise génératrice de bois secondaire périphérique qui permet aux arbres actuels de grossir au fur et à mesure qu'ils grandissent et de mieux résister aux ouragans. Cet avantage mécanique a été acquis par les Gymnospermes (Gingkoales, Cycadales, Cordaïtales et en particulier les premiers Conifères), qui ont pu ainsi dominer les Fougères dans la course à la lumière. Le bois secondaire est produit par le système complexe des faisceaux libéro-ligneux qui est une structure étonnante, donnant une supériorité précieuse aux arbres par rapport à leurs concurrents Parmi les Angiospermes, les faisceaux libéro-ligneux donnent en outre aux rameaux la possibilité de grossir d'année en année et d'accumuler de la lignine très peu polymérisée qui les laisse sensibles aux attaques de Bactéries, d'Insectes et de Champignons. Il est possible qu'ils mettent en réserve des matières nutritives qui seront utiles, au printemps, pour réactiver les méristèmes des bourgeons en profitant des premiers beaux jours.

13- Votre référence à la lignine peu polymérisée est une conclusion bien rapide bien qu'il y ait là un fond de . C'est au niveau des dérivés de la lignine depuis les tanins jusqu'aux terpènes que se trouvent les mécanismes. Ils peuvent donner des positifs en indiquant une vulnérabilité de la plante ou une absence d' par la négative. La présence d'un hôte intermédiaire comme un champignon ou un déficit local en manganèse permet des attaques locales en rendant la plante plus vulnérable encore.

14- Finalement, il apparaît que les rameaux sont une innovation assez récente dans le cours de l'évolution des végétaux mais nous allons voir que, à l'échelle de milliers d'années, la forêt fonctionne d'une manière particulière.

15- Ce texte est plus complet et mieux étoffé que le précédent avec une référence aux mécanismes de base comme le rôle des Basidiomycètes dans la dépolymérisation de la lignine. J'attire votre attention sur le fait que cette dépolymérisation par les Basidiomycètes est importante parce qu'elle permet de séparer les deux molécules avec peu de chance de recombinaisons C'est une

innovation fondamentale dans la structuration des sols dont sont issus les feuillus climaciques.

2. Le fonctionnement original de la forêt

16- Après ce retour en arrière à l'échelle des temps géologiques, regardons maintenant ce qui se passe dans un écosystème à l'échelle de quelques siècles. La course à la lumière qui pousse la végétation vers le haut et produit des arbres a plusieurs conséquences que nous allons examiner successivement

2.1 Les modifications du micro-climat

17- Une forêt crée un micro-climat dont les caractères ont été largement étudiés, et il suffit de rappeler deux résultats:

*- en forêt, règle générale, la température de l'air est plus basse pendant la journée et plus élevée pendant la nuit, et l'humidité de l'air est constamment plus élevée que dans les espaces découverts. Autrement dit, le climat est **plus stable**.*

- quand le rayonnement solaire descend de la cime des arbres jusqu'au sol, la plus grande partie des photons est capturée progressivement par les strates de végétation, selon une courbe d'extinction du rayonnement qui est souvent exponentielle. Autrement dit, la forêt utilise efficacement l'énergie et la néguentropie disponible en modulant l'utilisation de la lumière par les arbres, par les Lichens et les Mousses des troncs et par la végétation herbacée qui pousse près du sol.

18- Une première remarque porte ici sur la forme des conifères: pourquoi n'ont-ils pas adopté une cime large plutôt qu'étroite comme ils l'ont fait? Serait-ce à cause d'une vascularisation défaillante ou d'une qualité de la lumière qui était telle qu'il n'y avait pas nécessité d'établir des pièges à photons gradués et spécifiques. Au-delà des conifères, les mousses, les graminées et les lichens, comme beaucoup d'Éricacées aujourd'hui, n'ont recours à aucun stratagème particulier pour capter les photons. En revanche, ils accumulent dans leurs substrats énergie et nutriments par blocages des cycles de transformation; soit par des déficits en eau ou des surplus selon les cas.

19- La forêt est donc un système dont le fonctionnement énergétique est plus riche en rétroactions stabilisantes qu'une prairie ou qu'une culture.

2.2 Le cycle de l'eau

20- Sous presque tous les climats, les pluies sont trop abondantes en saison humide et trop faibles en saison sèche. Or, lorsqu'il pleut, les feuilles des arbres retiennent 10% à 40% des gouttes de pluie, Cette eau ne descend pas en totalité jusqu'au sol, puisqu'elle s'évapore directement. Ainsi la forêt écrête les fortes pluies qui auraient entraîné du ruissellement ou du drainage.

21- *Un autre effet majeur du couvert de la forêt est de modifier le cycle de l'eau en freinant l'évaporation de l'eau des horizons superficiels du sol. R. Lee (1980) a montré que les bassins versants des régions tempérées où subsiste la forêt perdent nettement moins d'eau (20% à 40%) que les bassins où la forêt a disparu.*

22- Ceci est vrai sans l'ombre d'un doute, mais les réductions que nous avons observées ici comme au Sénégal sont d'un bien autre ordre et plus important dans le maintien des équilibres, c'est de la qui, en quantité minime, a des effets incroyables sur la productivité. C'est un autre lien physico-biologique qui me semble fondamental dans tout l'équilibre de l'écosystème hypogé.

23- *L'utilisation de l'eau du sol est optimisée parce que les racines des arbres descendent beaucoup plus bas que celles des plantes annuelles comme le montre le tableau ci-dessous:*

sable fin	sable limoneux		limon	argile
<i>Réserve dans 1 m³ de sol</i>	75	108	167	117
<i>Profondeur des racines</i>				
-culture de plantes annuelles	38	50	62	25
-culture herbacées pérennes	100	100	125	67
-arbres	250	200	200	100
<i>Réserves utilisables</i>				
- cultures de plantes annuelles	28	54	104	29
- cultures herbacées pérennes	75	108	209	78
- arbres	187	216	334	117

24- *Là encore il apparaît que la forêt résiste mieux à la sécheresse que la végétation herbacée et qu'elle est donc plus **stable**.*

25- *L'enracinement profond des arbres a certainement aussi une grande importance dans la pédogénèse, grâce aux nombreuses radicelles qui descendent au contact du sol minéral.*

26- Ici plus qu'ailleurs, j'ai des réticences parce que ce type de raisonnement confond l'approche agricole avec la possibilité de tenir des raisonnements de base qui mèneraient à une inversion de la perception des mécanismes responsables de la stabilité d'origine forestière. Comment comparer une stratégie d'équilibre forestière avec une stratégie de production agricole?

27- La première est soumise aux grandes lois de la physique puis de la chimie toutes intégrées dans la biologie sous réserve d'équilibres dynamiques où la flèche du temps .

28- Il n'y a rien de semblable du côté agricole où tout est soumis à l'homme pour une rentabilité immédiate et surtout où le temps n'intervient nullement, mais plutôt le climat annuel et local. C'est cette approche climatique basée sur des mesures séquentielles inscrites dans des phénomènes chimiques contrôlables qu'ont choisie les pédologues, mais dont les cartes se sont avérées d'une bien piètre utilité, compte tenu des sommes consacrées.

29- Tous les raisonnements doivent dissocier agriculture et forêt remplacer par des mesures et raisonnements-forêts, donnant naissance à des agricoles.

2.3 Les équilibres (et déséquilibres) ioniques

30- **P. H. Nye et D.J. Greenland (1960)** puis **P. Vitousek (1983)** ont eu le très grand mérite de raisonner sur l'ensemble des équilibres ioniques du sol. Le point de départ de leur raisonnement est le rôle des anions : les roches siliceuses en fournissent paradoxalement assez peu parce que SiO_4H_4 n'est pratiquement pas dissocié dans les conditions habituelles de température, de pression et d'acidité qui règnent dans les sols. De même, les hydroxydes de fer et d'aluminium, abondants dans les sols siliceux très altérés, sont très peu solubles. Les roches calcaires peuvent donc donner des anions HCO_3^- , mais seulement s'il arrive suffisamment d'ions H^+ pour dissocier les carbonates.

31- Finalement, la plupart des anions mobiles, capables de déplacer les cations absorbés par les argiles et les colloïdes organiques, sont fournis par les précipitations: ce sont seulement pour les sols salés ou gypseux que la roche-mère fournit une quantité importante d'anions mobiles.

32- Dans les trois forêts naturelles étudiées par **P.M. Vitousek** et ses collègues dans l'Indiana (USA), l'anion SO_4^{4--} est nettement majoritaire (400 à 700 micro-équival./litre) et l'anion NO_3^{3--} est presque absent, sans doute parce qu'il est fortement absorbé par les racines des arbres. Après coupe, c'est l'anion NO_3^{3--} qui domine (1700 micro-équival./litre dans la forêt de feuillus la plus riche, 400 dans la pineraie) et qui risque d'être entraîné par les pluies.

33- L'interprétation de Vitousek tient du raisonnement inverse de celui que je viens de suggérer, c'est-à-dire qu'il part de prémices agricoles et les extrapole à la forêt. À mon avis, rien n'est plus éloigné de la vérité puisqu'il introduit une perturbation anthropique et la compare à une perturbation dans un système commandé par la flèche du temps. L'agriculture, donc elle pour être fidèle à Parménide d'Élée. **Perry et al, (1990)** cite des chiffres analogues à ceux de Vitousek, mais dont l'explication est toute biologique; c'est-à-dire que l'ensemble de la vie microbienne, n'étant plus alimentée en énergie par les arbres, se retourne vers son milieu hypogé et commence à la détruire, libérant ainsi de grandes quantités d'azote sous diverses formes dont l'azote gazeux n'est pas exclus. Ceci indiquerait avant tout que l'azote est fixé par des mécanismes enzymatiques pourvu que l'énergie nécessaire y soit en quantité et en qualité. Je dirais qu'il en va de même pour la production de celluloses et du bois en général qu'on doit à ces systèmes enzymatiques que nous ne savons produire sinon à des coûts astronomiques et encore...!

34- Je réitère ici la distinction où l'agriculture mesure l'azote sous forme d'ions et où la forêt se doit de mesurer l'azote en fonction de l'activité microbiologie. Tout ceci renforce que les systèmes forestiers sont basés sur l'existence de liens biologiques régis par des systèmes enzymatiques qui sont des protéines capables de gérer imposant et diversifié, dont l'expression se manifeste par la production de composés biochimiques dans une physico-chimique.

35- Vous ne faites aucune mention de la chimie des polyphénols, surtout celle issue de la lignine, cette macromolécule presque infinie dans sa forme, se prêtant à tous les découpages et toutes les compromissions, assurant ainsi un écosystème hypogé plus ou moins structuré mais à l'abri des dégradations infinies. Il y a beaucoup à réfléchir et expérimenter dans ce domaine.

2.4 Feuillus et conifères

36- Les conifères sont apparus vers -300 millions d'années et sont beaucoup moins perfectionnés que les feuillus qui ont pris naissance beaucoup plus tard, vers -100 millions d'années. Le métabolisme des conifères est plus que celui des feuillus et, en conséquence, les Conifères souffrent de la concurrence et sont souvent relégués dans des milieux difficiles (forêt boréale, hautes montagnes, sols pauvres) où leur rusticité leur permet de survivre.

37- Je ne suis pas d'accord avec votre interprétation de la question finale du paragraphe ci-haut. Je ne crois pas que la comparaison conifères lents/feuillus rapides tienne. Les écosystèmes générés sont totalement différents et ne peuvent subir de type de comparaison.

38- Il faut substituer cette comparaison à deux systèmes, le premier archaïque répondant à des contraintes qui n'existent plus mais, par sa , arrive à maintenir en échec un autre système plus adapté et plus moderne. C'est le monde des Sauriens en comparaison avec celui des mammifères mieux adaptés à la concurrence par son mode de reproduction et son métabolisme.

39- Il est remarquable de constater que les écosystèmes conifériens subissent l'assaut des Angiospermes sans pouvoir compétitionner vraiment mais plutôt en résistant. Il est également remarquable d'observer que, lors de la dégradation d'un écosystème forestier feuillu, nous retournons vers des conditions où les conifères refont surface en force avec une autre flore archaïque en sous-étage représentée par les Lichens, les Bryophytes et les Ptéridophytes, tant en nombre d'espèces qu'en nombre d'individus. Ce n'est que dans des conditions extrêmes que les Gymnospermes se maintiendront, mais partout ailleurs ils sont par les Gymnospermes et surtout les arborescentes.

40- Au Québec, nous avons sous nos yeux quotidiennement le flux et le reflux des temps anciens dans la forêt dite , plus productive que celle des Gymnospermes et nettement moins que celle des Angiospermes feuillues.

41- En conséquence, il me semble plus approprié de raisonner à l'échelle des écosystèmes qu'à celle de l'évolution des espèces depuis les Algues jusqu'aux grandes forêts feuillues pour avancer dans le débat de la compréhension de notre monde végétal. Ainsi les Mousses ne cherchent pas refuge mais sont l'expression d'un système périmé et mal adapté aux réalités actuelles.

*42- Du point de vue biochimique, dans les feuillus et dans les Conifères, les proportions globales de celluloses (40% à 50%) d'hémicelluloses (20% à 30%) et de lignine (18% à 27%) sont relativement proches mais, dans chacune de ces catégories, il existe des différences sensibles. Par exemple, selon **M Foesser et al. (1996)** les Conifères produisent deux à trois fois plus de glucomannanes que de xylanes, et c'est l'inverse pour les feuillus. Pour les lignines les proportions sont:*

	Gaiacyle	Syringyle	Hydroxybenzoyle
Conifères	90%	4%	6%
Feuillus	45%	50%	5%

43- **G. Lemieux** souligne que la dominance de la gaiacyle (où les noyaux benzéniques n'ont qu'un seul groupement méthoxyle) ralentit la transformation de la litière des Conifères et favorise la constitution de podzols plutôt que celle de sols bruns. Les rameaux des feuillus tombés au sol donnent des pourritures blanches, alors que ceux des Conifères donnent plutôt des pourritures brunes. Dans les deux cas, les agents de la transformation sont des Basidiomycètes dont l'action (par

dépolymérisation de la lignine) est beaucoup plus "douce" que celle des Bactéries thermophiles et des Levures qui agissent dans les composts.

44- Le plus important ici est de considérer le type de mécanisme de dépolymérisation où la repolymérisation devient difficile comme l'amorce d'un type de impossible ou presque chez les Conifères, mais la base même de la vie des écosystèmes d'Angiospermes, mieux adaptée chez les Dicotylédones que chez les Monocotylédones. Cette se fait par l'intermédiaire du sol où l'énergie s'accumule et obtiendrait ses valeurs maximales après une soixantaine d'années (**Gosz, Holmes Likens & Bormann [1978]**) . Dans des conditions similaires, les conifères ne peuvent que stocker dans la biomasse épigée, étant donné que le système tellurien n'est pas en mesure de stocker, évitant ainsi les de la concurrence. Ainsi, ils ont une vie séquentielle , tous les individus ayant le même âge ou presque, ne pouvant plus avoir accès aux nutriments du sol , le feu semble être le meilleur allié en faisant pour rajeunir toute la société végétale. À mon avis, voilà ce qu'apporterait la différence entre les deux lignines; deux mondes végétaux fort différents dans leur métastabilité.

*45- **G. Lemieux** souligne que les Conifères ne sont pas favorables au développement de la strate herbacée, alors qu'ils tolèrent les Mousses qui risquent moins de les concurrencer. Des observations précises et répétées seraient nécessaires pour savoir si les Mousses ralentissent la transformation de l'humus ou si elles sont seulement les témoins de ce ralentissement. Quoiqu'il en soit, il paraît clair que le fonctionnement des Forêts de Conifères est généralement moins rapide que celui des forêts de feuillus. Mais, là encore, il faudrait disposer de dispositifs expérimentaux comparatifs pour être plus précis, en particulier sur le rôle des incendies qui sont plus fréquents dans les forêts de Conifères.*

2.5 La quantité d'humus

46- Dans le centre de la France, nous avons pu faire des analyses physiques élémentaires (taux d'humus par perte au feu et texture) dans les dix premiers centimètres du sol des parcelles dont l'utilisation était connue en 1662 et en 1839 (**M. Godron et al., 1964**). Dans une parcelle cultivée en 1662, encore cultivée en 1839 et encore cultivée aujourd'hui, il reste 1% d'humus. Sous les vieux chênes qui bordent cette parcelle, le taux d'humus atteint 9,5%. Sous des châtaigniers clairsemés plantés en 1839, il est de 4,9%. Dans la vigne qui succède à une châtaigneraie qui existait en 1839, il est de 2,3%. Le plus étonnant est que le taux d'argile de ces sols de terrasses sableuses suive le taux d'humus:

	Taux d'humus	Taux d'argile
<i>Culture</i>	1,3	0,8
<i>Vieux chêne</i>	9,4	4,7
<i>Jeune chênaie</i>	9,5	6,1
<i>Châtaigniers clairs</i>	4,9	2,2
<i>Vigne</i>	2,3	1,0

47- Il est vraisemblable que ce sont les Vers de terre qui ont fait remonter vers la surface du sol de l'argile contenue dans les horizons profonds.

48- Voici un chapitre où je suis en désaccord complet sur votre interprétation bien que les chiffres soient très intéressants et des plus révélateurs.

49- En premier, votre confusion entre les systèmes agricoles et forestiers montre combien l'agriculture a marqué les jugements et les réflexions de tous, au point où tout est confondu. À mon avis, il y a autant de différences entre un cheval et un avion; les deux participent à la civilisation et au transport, mais dans des optiques diamétralement opposées selon des mécanismes qui ont peu en commun.

50- En second, je dirais de ces observations que l'argile est un capital important dans la métastabilité, mais serait avant tout que représentent les lombrics qui doivent avoir recours aux argiles pour protéger les colonies bactériennes de leur système digestif ce qui leur permet de se nourrir de polyphénols que sont les tanins ou les complexes tanins-protéines. Voilà un excellent exemple de mécanisme d'aggradation responsable du maintien de la fertilité.

51- En fait, ceci recoupe en partie nos expériences avec les BRF de *Quercus rubra* et nous ont amenés à constater que les BRF de feuillus dominants, dont principalement le chêne rouge, étaient responsables de l'apparition d'écosystèmes de feuillus plutôt que de résineux dans nos parcelles.

52- Ici ce serait le lien biologique qui serait responsable du maintien de ce haut taux d'"humus" à cause de la présence de lignine favorable au tannage des protéines, dont les bactéries seraient responsables de la remise en circuit des nutriments, à condition d'avoir une source d'argile qui fut dès lors concentrée dans les horizons supérieurs. Je limiterais mes comparaisons avec le châtaignier; les cultures et la vigne appartenant au monde agricole et qui ont des valeurs bien inférieures.

2.6 La microflore et la microfaune

53- *La forêt produit des tonnages élevés de litière qui sert d'aliment pour la microflore et la microfaune. Quand un peuplement forestier est installé sur le sol neuf d'une dune, la litière s'accumule pendant plusieurs dizaines d'années, parce que les décomposeurs n'absorbent pas la totalité des feuilles mortes qui tombent chaque année. Mais un changement de microflore et de microfaune se produit et il accélère la transformation de la litière au point que l'épaisseur de celle-ci diminue pour tendre vers un équilibre stable.*

54- Vous illustrez bien mon propos pour le terme humus qui comme et litière sont constamment sans attribuer une valeur à l'un ou l'autre, bien que le terme litière est un peu plus précis tout au moins dans sa dynamique. Les litières de conifères, bien que ne se transformant pas ou peu, sont stables et participent à la métastabilité du système. Il ne faut pas trop insister sur les caractères physiques et leurs impacts (sur l'eau, l'air, le pH etc.) C'est sur la biologie elle-même régulée par des systèmes enzymatiques inscrits dans des dynamiques particulières que ces substances végétales ont un effet sur la rapidité des mycélium ou sur les bactéries responsables de la synthèse de lipases, de la laccase, des phosphatases ou de diverses peroxydases dont celles responsables de la dépolymérisation de la lignine.

2.7 Synthèse

55- *En résumé, la forêt crée un milieu stabilisé, auto-protecteur, économe en énergie et qui optimise les cycles de l'eau, de l'énergie et de la négentropie.: elle augmente les flux de matières annuelles et conserve les éléments nutritif, en particulier l'azote qui risque d'être dilapidé par les défrichements. Encore faut-il essayer de comprendre pourquoi une structure aussi complexe que la forêt se met en place et se stabilise tous les jours sous nos yeux. Mais dès que l'on réfléchit sur la stabilité, on s'aperçoit que c'est une notion qui risque de conduire à des paradoxes si elle est mal définie. En particulier, la stabilité d'un système biologique est-elle identique à celle d'un système purement physique?*

56- Je pense que votre approche est correcte et que vous apporterez plus loin certaines réponses, mais où la comparaison avec ces systèmes purement physiques soutient bien certaines différences. Toutefois, vous admettez que cette stabilité s'appuie sur des liens souvent de réciprocité où la somme des bénéfiques est plus grande que la somme des intrants et des efforts. Ceci est en bonne partie la thèse que nous soutenons après observations et mesures.

3- Équilibre et stabilité

57- *Jusqu'à maintenant, nous avons utilisé le concept de stabilité dans son sens banal mais, maintenant que nous avons saisi le rôle crucial de la stabilité dans*

le fonctionnement des forêts, il va falloir l'analyser un peu pour lui donner un sens précis afin de comprendre que la forêt constitue un de métastabilité et d'en tirer des conclusions sur le rôle des rameaux.

3.1 Retour à quelques concepts fondamentaux

58- Pour ne pas masquer les questions difficiles, il faut se souvenir que les notions de stabilité et d'équilibre ont été l'objet de discussions très fondamentales dès la naissance des sciences rationnelles. Ainsi au VI^{ème} siècle av. J.-C., Héraclite d'Éphèse prenait parti en écrivant .

59- De fait, un système vivant se modifie en permanence, en particulier par l'assimilation de matières nutritives et par des échanges d'énergie avec l'extérieur. Son équilibre n'est pas un immobilisme statique, c'est une relative permanence de certains de ses caractères autour d'un état moyen qui peut en outre évoluer au cours du temps. Par exemple, un jeune bouleau ne fonctionne pas de la même manière le jour et la nuit, ni en été puis en hiver; en outre d'une année à l'autre, il peut grandir ou être foudroyé.

60- C'est la des liens qui réussit à mettre en harmonie tous les paramètres. C'est également le résultat de l'histoire génétique de chaque espèce et en particulier celle du bouleau dont il est ici question. La séquence et la réapparition des rétroactions commandées à la fois par la génétique, les commandes enzymatiques, les réponses des membranes en fonction des contraintes climatiques... et j'en passe et des meilleures, sera le lot de chaque individu d'une espèce qui sera modifiée par l'écosystème et, à son tour, apportera à la fois stabilité et instabilité mais à des échelles différentes et des répartitions dans le temps et dans l'espace qui seront également différentes et souvent contradictoires. Malgré tout, les individus comme l'écosystème évolueront vers des équilibres plus ou moins stables et plus ou moins longs, permettant un cycle de tout l'édifice commandé par la flèche du temps

*61- Quels sont les caractères permanents qui nous permettent de penser qu'il s'agit toujours du même bouleau? Réflexion faite, nous sommes obligés de reconnaître que ces caractères dépendent de la personne qui observe le système: pour le forestier, la position de l'arbre sur le terrain suffit pour l'identifier, mais le généticien regardera plutôt la permanence de son patrimoine génétique au travers des mutations qui peuvent affecter toutes ses cellules et s'intéressera même plutôt à sa descendance. Pour le physiologiste, si un drageon naît sur une racine, il fera partie du système tant qu'il ne sera pas affranchi. Tout travail scientifique commence par le "découpage" subjectif et arbitraire du fragment de l'univers que nous décidons d'étudier. **E. Klein (1996)** l'exprime très clairement:.*

62- L'observateur et la partialité sont les deux côtés d'une même pièce de monnaie. La technique du saucisson est également nécessaire,

mais dès lors la technique de synthèse des observations est soumise à la flèche du temps; le saucisson ne pouvant être reconstruit dans le même ordre, alors nous n'aurions obtenu aucune information de l'expérience.

63- *Autrement dit, pour caractériser l'équilibre d'un système biologique, il faut avoir pris soin de le définir en précisant à partir de quel degré de changement, le système ne serait plus identique à lui-même et deviendrait un autre système. Ce maintien de l'identité malgré les vicissitudes, Parménide d'Élée, contemporain d'Héraclite, en avait reconnu la nécessité: . Là aussi **E. Klein (1996)** nous avertit: .*

64- *La stabilité du système dépend radicalement de cette identification initiale: la feuille du bouleau, l'arbre entier, et la forêt n'ont qu'une stabilité relative, il faut donc pousser plus loin l'analyse.*

65- Vous avez tout à fait raison. Toute stabilité n'est que relative par rapport à des paramètres qui nous échappent à des horizons divers. Il faut donc la caractériser. Ici il n'est pas inopportun de souligner que les écosystèmes archaïques ont des seuils qui font appel à la résilience avec des ruptures abruptes, ce qui est en partie le cas des écosystèmes de conifères. Paradoxalement, des petits groupes ou des individus peuvent persister sous diverses formes pouvant se compter en siècles, sinon en millénaires.

66- Le second groupe d'écosystèmes arborescents d'Angiospermes semble se perpétuer, pas son élasticité; le remplacement des par pieds isolés en est sans doute la cause alors que la vie des individus est plus brève et au mieux se mesure en quelques siècles.

3.2 Comment mesurer la stabilité?

67- *Pour mesurer la stabilité, il faut procéder en trois étapes" Pour savoir si un système est stable, l'observateur extérieur commence normalement par noter les fluctuations des paramètres qu'il peut mesurer. Il apparaît alors que pour chaque paramètre, 12 types de stabilité peuvent être distingués (**M. Godron, 1994 figure no.1**) en tenant compte de l'augmentation ou de la diminution de la moyenne, de l'amplitude et de la périodicité des variations observées autour de la courbe de régression de la moyenne.*

68- *Ensuite, il peut provoquer des perturbations pour voir jusqu'à quel point le système est capable de résister et il verra alors que deux types de résistance opposés doivent être distingués alors qu'ils sont trop souvent confondus: la résilience est la résistance au choc, c'est-à-dire la force de rupture instantanée que le système peut encaisser sans être détruit, alors que la limite d'élasticité caractérise le domaine des déformations réversibles (**M. Godron 1984**).*

69- Comme je l'ai mentionné plus haut, je ne puis qu'être en parfait accord avec ces propos. Vous admettez que les peuplements de résineux dits ont un comportement bien différent de ceux des feuillus

du même type: les premiers disparaissent en catastrophe la plupart du temps, ce qui incite les à gueuler contre la coupe rase et ce qui autorise les exploitants à utiliser l'argument . Toutefois il faut noter que certaines essences de résineux ont un comportement erratique comme certains pins, pruches (*Tsuga*), ou épicéa qui ne donnent que des peuplements mixtes et peuvent avoir des vies de quelques siècles, pourvu qu'ils soient associés à des peuplements climaciques de feuillus. Il en va de même de plusieurs essences feuillues, dites de transition qui miment le comportement des conifères avec des vies brèves et des fins catastrophiques. C'est le cas de plusieurs Bétulacées et Salicacées.

70- À l'inverse, les peuplements d'Angiospermes arborées climaciques ont une remarquable à un point tel que la société végétale se perpétue sans absorber de chocs létaux, sauf des interventions anthropiques comme dans le bassin méditerranéen, bien qu'à l'échelle de plusieurs millénaires, rien ne soit perdu. Sous le couvert de la , les écosystèmes climaciques d'Angiospermes arborées étant capables de au niveau du sol en mettant les concurrents à cette tâche, ont un avantage indéniable sur les conifères. Toutefois, individu contre individu, les Conifères ont une résistance bien plus grande, mais ne savent pas contourner les obstacles de la concurrence. Plutôt que de thésauriser au niveau du sol, ils stérilisent et expulsent les tout en devant accepter certaines catégories qui se sont

71- Enfin, il peut essayer de caractériser les "régulateurs" qui stabilisent le système. Il apparaît alors que le mot stabilité a deux sens: en premier lieu, la stabilité est une constatation, mais elle est aussi une propriété interne du système qui résume les réactions qu'il produit pour résister aux perturbations. Ces mécanismes stabilisants sont des régulations (c'est-à-dire des "rétro-actions" négatives), diamétralement opposées aux rétro-actions positives qui ont lieu lors des explosions chimiques ou nucléaires. Un modèle, destiné à représenter le système, devra essentiellement incorporer ces régulations qui sont des processus thermodynamiques.

72- Il va de soi que le mot stabilité ait deux sens mais un seul lui a été attribué en sylviculture, un dérivé de l'agriculture, celui d'un écosystème uniquement épigé pouvant être contrôlé par des actions anthropiques sélectives. Ces , à bien y regarder sont le fait de systèmes protéiques que sont les enzymes, elles-mêmes fragiles mais terriblement efficaces dans leur contexte et spatial. Ce qui va caractériser les écosystèmes forestiers en particulier sera qu'ils sont contrôlés par des systèmes enzymatiques eux-mêmes générés par d'autres niveaux de vies que représentent les chaînes trophiques, les obligeant ainsi à se soumettre à la biodiversité constamment renouvelée pourvue que l'apport énergétique soit constant et de bonne

3.3 La stabilité des systèmes et la thermodynamique

3.3.1 Stabilité et structure

73- Le premier principe de la thermodynamique précise que .

74- Au contraire, le second principe de la thermodynamique fait intervenir la flèche du temps, puisqu'il dit que: . En particulier, les frottements qui existent dans tout système physique entraînent une déstructuration. En termes plus précis, ce principe dit que leur entropie ne peut qu'augmenter jusqu'au moment où elle atteindra sa valeur maximale correspondant à l'équilibre thermodynamique. Un système ne peut se structurer que s'il reçoit de l'extérieur de l'énergie de haute qualité qui fournit de la négentropie.

*75- Or, toute structure spatiale peut se lire comme un message. et elle contient de l'information au sens de **Nyquist (1928)**, de **Shanon (1948)** ou de **Brillouin (1959)**. La structuration est une diminution d'entropie et une acquisition d'information. C'est pourquoi l'information est synonyme de négentropie.*

76- Les êtres vivants se structurent, se développent et se reproduisent, n'échappant nullement au second principe, car ce ne sont pas des systèmes isolés: l'ensemble de la biosphère capte l'information (ou négentropie) que peuvent donner les photons de courte longueur d'onde du rayonnement solaire (ou l'énergie chimique disponible dans les profondeurs pour le cas des "fumeurs" océaniques), et construit des structures de plus en plus complexes, qui sont durables quoiqu'elles paraissent à priori fragiles et instables. Pour savoir dans quelle mesure ces structures résultent de processus purement déterministes, il faut faire quelques pas dans le domaine de la physique quantique.

*77- Je pense comprendre maintenant ce que vous apportez en vous référant à la théorie de l'information dans ce qui est un appelant à la structuration. J'espère n'être pas trop loin de la réalité en disant que **l'information produite entre les êtres sont des liens d'abord et avant tout enzymatiques souvent labiles, permettant les échanges énergétiques, et chimiques eux-mêmes soumis aux lois fondamentales de la physique et de la chimie et dont l'expression est la structuration de sociétés où toute l'histoire biologique est présente en temps réel dans ses aspects statiques et dynamiques.***

3.3.2 Physique classique et physique quantique

*78- En physique classique, la "loi fondamentale de la dynamique" dit que toute force est proportionnelle à l'accélération qu'elle produit. Cette loi est déterministe, comme le dit fort bien **I. Prigogine (1996)**: nous connaissons les conditions initiales d'un système soumis à cette loi, c'est-à-dire son état en un instant*

quelconque, nous pouvons calculer tous les états suivants aussi bien que les états précédents (p.19) En un langage plus formel, les trajectoires, en mécanique classique, restent identiques à elles-mêmes quand on remplace t par son opposé $-t$.

79- *En mécanique quantique, E. Klein (1996) écrit que Mais l'expérience des fentes d'interférence montre qu'il n'est plus possible d'admettre que (op. cit. p.28). La théorie de D.Bohr permet de retrouver un déterminisme strict (op. cit. p. 90), mais elle conduit à d'autres difficultés.*

80- *Les relations d'incertitude de Heisenberg ne s'opposent pas à un certain déterminisme. En effet, elle ne signifient pas qu'il existerait une position exacte et une vitesse exacte pour une particule et que nous serions incapables de les connaître simultanément. Elles veulent seulement dire que la représentation formelle de ces particules ne leur attribue jamais ces deux caractéristiques à la fois en raison de la non-commutativité des opérateurs. En termes un peu plus précis, les fonctions d'onde qui conduisent à des valeurs de plus en plus précises de la position donnent aussi des valeurs de plus en plus incertaines pour l'impulsion. Ceci n'exclut pas le déterminisme tel qu'il est finement analysé par R. Omnès (1994, pp. 256-261). Quand la physique quantique donne seulement des probabilité d'arriver à tel ou tel résultat (op. cit. p.272-274) elle n'exclut pas que chacune des trajectoires soit déterministe.*

81- *Finalelement, le déterminisme n'est pas l'opposé du probabilisme: (op. cit. p.291). Le point qui reste critique pour un biologiste est la flèche du temps : quand la physique quantique dit qu'il n'est pas possible de savoir par quelle fente d'un interféromètre est passé un corpuscule (op. cit. p.274) la symétrie passé-futur est rompue et il me semble que c'est l'une des brèches que les biologistes doivent explorer pour comprendre mieux ce qu'est la vie.*

82- Cette asymétrie des temps futurs et passés m'a toujours fortement intrigué. Les temps symétriques proposés par la physique newtonienne ont certainement permis des prouesses extraordinaires du génie humain avec l'explosion de l'économie et des sciences de l'ingénieur. Mais en cette fin de millénaire, nous voici confrontés à une rupture. Les temps futurs semblent se volatiliser sans que les temps anciens prennent la relève (ce qui est le cas chez les peuples primitifs qui n'ont que des temps anciens). Il en va de même pour les sociétés végétales. Les conifères qui ont un temps ancien très long n'ont qu'un temps futur très limité et doivent se contenter que d'un temps présent pour survivre, d'où la résilience de leurs sociétés.

83- À l'inverse, les sociétés climaciques de feuillus ont des temps anciens brefs mais des temps futurs longs à cause de l'adaptation. Ces sociétés sont pérennes mais non éternelles. Ici la flèche du temps fait son oeuvre à l'intérieur des sociétés, préparant ainsi des temps futurs de plus en plus stables.

3.3.3 La stabilité physique

84- *En physique classique, pour un ensemble de systèmes réversibles indépendants, les trajectoires individuelles et les fonctions de probabilité sont deux descriptions équivalentes. I. Prigogine (1996) reprenant en particulier les intuitions de H. Poincaré (1893,1913), montre que, au contraire, pour les systèmes où il existe des interactions permanentes entre les éléments (plus précisément, des résonances entre les degrés de liberté du système), la seule description acceptable est probabiliste et qu'elle inclut la flèche du temps. Tel est le cas des phénomènes de diffusion qui sont irréversibles: (I. Prigogine 1996, p. 50).*

85- *Finalement, les systèmes déterministes, prédictibles, réversibles, ne seraient que des cas particuliers ou même des idéalizations ou des approximations du cas général.*

86- *I. Prigogine s'est intéressé aux systèmes qui sont loin de l'équilibre et dont le futur peut prendre plusieurs voies (cf. P. Glansdorff et I. Prigogine 1971) Leur futur pourrait être prédit seulement si nous connaissons les conditions initiales avec une précision infinie. Paradoxalement, ces systèmes peuvent être dits "instables" puisqu'ils sont loin de l'équilibre et "stables", puisqu'ils perdurent.*

87- *Les êtres vivants sont typiquement (I. Prigogine 1996 p. 64). Ils sont même auto-organiseurs (C. Biebracher et al., 1995). Dans cette perspective, la stabilité des systèmes biologiques n'est nullement un immobilisme figé, mais ce n'est qu'une stabilité relative, comme il était dit dans le paragraphe 3.1. Plus précisément, c'est une métastabilité dont nous allons essayer de préciser les modalités.*

88- *Vous touchez ici ma préoccupation première de rattacher ce que nous observons en appliquant les BRF au sol et en comparant les résultats avec les techniques agricoles. La production de non-équilibres fortement organisés dans le temps et dans l'espace m'a toujours semblé la caractéristique principale de la vie. Pour la première fois, Prigogine m'apporte quelques réponses en disant que le monde des certitudes n'existe pas mais celui des équilibres multiples existe. C'est la thermodynamique hors-équilibre.*

3.3.4 La métastabilité

89- *Les êtres vivants résistent à de faibles perturbations, mais une perturbation forte les détruit. Ce caractère est exactement la définition de la métastabilité. En physique, l'exemple le plus simple d'équilibre métastable est celui d'une bille placée dans un "creux" d'une surface bosselée: elle revient régulièrement au centre du "creux" tant qu'elle est soumise à de faibles secousses, mais elle en sort si le système est fortement secoué (figure 2).*

90- *Dans la surface bosselée, il peut exister plusieurs "creux" et une bille peut aller d'un "creux" à un "creux" voisin, en franchissant la bosse qui les sépare grâce à une impulsion énergétique, et les "creux" les plus profonds sont ceux qui*

assurent la plus forte métastabilité. De même, un système biologique métastable peut se transformer en un autre système métastable. Ainsi, les Algues sont dans un "creux" correspondant aux milieux aquatiques, et elles survivent difficilement dans les milieux terrestres soumis aux sécheresses périodiques. Les Lichens sont dans le "creux" des rochers arides, et ils en sont chassés par les Mousses, puis par les Fougères et les plantes à fleurs dès qu'une couche humifère retient un peu d'humidité pendant les périodes de sécheresse.

91- Au cours de l'évolution, la complexité croissante des systèmes biologiques est donc l'acquisition d'une métastabilité plus profonde, grâce à une augmentation de l'information dans la structure du système. Le passage à la structure plus complexe se fait par un "saut qualitatif" franchissant un seuil peu stable, où existent pendant peu de temps de l'évolution.

92- Ainsi, . L'image de la bille dans les montagnes russes permet de comprendre cet apparent paradoxe: les systèmes fortement régulés grâce à une structure complexe sont situés au fond d'un puits de métastabilité profond, mais ils sont irréductiblement détruits s'ils sortent de ce puits.

93- Un système évolue et se perfectionne grâce à des innovations qui réussissent et se maintiennent si elles apportent des moyens supplémentaires pour résister aux perturbations: une innovation peut subsister et se stabiliser seulement si elle apporte un atout dans la lutte pour la vie, et en particulier une plus grande capacité d'utilisation de l'énergie solaire.

94- Si l'écosystème épigé apporte des innovations constantes sous les tropiques, il en va tout autrement en climat tempéré; c'est l'écosystème hypogé qui invente constamment et fait face à des situations complexes qui touchent le paradoxal en maintenant une structure qui doit avoir des fonctions multiples et différentes dans la stabilité de l'écosystème épigé, responsable de l'alimentation énergétique. C'est ici que la structure de la molécule de lignine et tous les produits polyphénoliques jouent un rôle paradoxal incroyable. Ils sont à la fois énergie, structure physique aussi bien que régulateurs chimiques et biologiques.

*95- Ces simples remarques fondamentales expliquent les rôles respectifs du hasard et de la nécessité: si une structure favorable, telle que celle du bois secondaire qui nous intéresse aujourd'hui peut exister, elle a toutes les chances d'apparaître un jour ou l'autre, mais la date et le lieu de naissance de cette innovation sont soumis à des aléas si nombreux que nous aurons l'impression que cette naissance a lieu au **hasard**.*

3.3.5 Complexité de la structure et stabilité du fonctionnement

*96- Pour comprendre la place des rameaux dans l'évolution des végétaux, il faut ajouter une remarque : les innovations qui apportent des régulations favorables sont toujours des structures complexes et leur enchaînement a conduit **Teilhard de***

Chardin à remarquer que l'évolution biologique s'accompagne d'une complexité croissante.

97- Par exemple, les Mousses, dotées de pseudo-feuilles, d'une pseudo-tige et de pseudo-racines, sont plus complexes que les Algues, mais les Cryptogrammes vasculaires, à leur tour, sont plus complexes que les Mousses, puisqu'ils possèdent des vaisseaux. Les faisceaux libéro-ligneux et l'assise subéro-phello-dermique des Conifères et des Phanérogames ligneux, sont encore plus complexes, etc.

98- **Ainsi apparaît clairement le lien entre structure et fonctionnement que Durheim avait si bien décrit: «Les phénomènes qui concernent la structure ont quelque chose de plus stable que les phénomènes fonctionnels; mais entre les deux ordres de faits, il n'y a que des différences de degré. La structure même se rencontre dans le devenir, et on ne peut la mettre en lumière qu'à condition de ne pas perdre de vue ce processus du devenir».** Et nous pouvons être plus précis en disant maintenant que . Une structure qui se complexifie peut augmenter la profondeur du puits de métastabilité.

99- Voilà bien ce que j'observe à partir de cette lignine elle-même la finalité des celluloses et hémicelluloses dans un continuum qui donne aussi bien le bois que le sol. Il va de soi que les sols forestiers sont plus fertiles et plus stables que les sols de plaine de graminées. Il faut reléguer à un autre plan l'allusion que vous faites aux de Bryophytes tout comme aux tourbes le plus souvent issues de ces mêmes Bryophytes. Leur stabilité sont le fruit de leur statique, non pas de leur dynamique. Les relations sont purement physiques et chimiques avec des phases, suivies de reviviscences ou non dont la phase ultime et stable sera les lignites ou les charbons.

4. La forêt et la fertilité des sols

100- *Tout ce qui vient d'être analysé aussi précisément que possible peut être résumé à grands traits:*

- *sous presque tous les climats, la végétation évolue vers une structure forestière, parce que la forêt est plus profondément métastable que les formations herbacées (CF.§ 3),*

101- Je pense que la série d'expériences que nous avons faites ouvre la porte à des explications et la découverte de mécanismes dont l'importance était fortement sous-estimée jusqu'ici. La forêt serait donc régie par la dynamique de toutes ses composantes avec des temps passés et futurs très longs. Dans le cas des formations herbacées, la stabilité des populations est toute relative et largement soutenue par la statique de composantes majeures comme la disponibilité de l'eau et l'utilisation de mécanismes allélopathiques un peu analogues à ceux des conifères.

- en forêt l'économie de l'énergie et de la nutrition minérale sont optimisées, les pertes en éléments nutritifs sont minimisées, la microflore et la microfaune sont très efficaces, le microclimat est plus favorable et le bilan hydrique est amélioré (cf. 2),

102- Ceci est le corollaire de ce que je viens d'exprimer.

- les arbres ont développé leur résistance aux parasites au point de vivre plusieurs centaines d'années.

103- Ceci est une demi-vérité puisque la qualité des sols, propres à générer des ou des dits pathogènes, joue un rôle prépondérant dans les aspects Les signaux attirant ces sont toujours le fait de déséquilibres accidentels ou d'ordres conjoncturels dans la vie même de la société végétale. Il est vrai que ces mêmes sociétés peuvent résister à des épidémies d'insectes aussi sévères fussent-elles, mais difficilement au maintien de déficiences chroniques que nous entretenons par la récolte des bois.

104- Mais depuis environs 8,000 ans, l'Homme a bouleversé ces systèmes en détruisant la forêt pour cultiver des céréales et pour élever du bétail. Ce faisant, il a consommé un capital de régulations stabilisantes qui avait été accumulé en 300,000,000 d'années. Les travaux de G. Lemieux montrent que:

- dans des sols qui ont été dégradés et sont moins stables que ceux de la forêt naturelle. la restitution des bois de rameaux permet de revenir dans le "creux" de métastabilité de la forêt et d'améliorer le fonctionnement de la végétation.

- la pédogénèse qui se développe alors reconstitue une bonne partie des régulations favorables des sols forestiers, en particulier pour améliorer le bilan hydrique du sol.

105- J'insisterais ici davantage sur les bilans azotés et phosphorés bien que celui de l'eau n'est pas négligeable.

106- Il est très remarquable que la reconstitution, dans le sol, d'une petite partie du processus qui assurait la métastabilité de la forêt suffise pour amorcer un "remontée biologique"; ceci rejoint l'idée de la structure holographique des systèmes biologiques selon laquelle une partie du système permet de reconstituer l'essentiel de l'image complète (G. Langlet, 1994).

107- Cette allusion à l'holographie n'est pas déplacée puisque tous les systèmes biologiques portent en eux leur histoire totale et complète qui peut donc s'exprimer en temps réel tout comme chaque cellule porte l'ensemble du patrimoine génétique de tout individu vivant dans son ADN. C'est l'expression actuelle des temps anciens pour des temps futurs le résultat le plus concret de la flèche du temps.

Bibliographie

- Biebracher, C., Nicolis, G. & Schuster, P. (1995)** Rep Eur. 16546 Commission Européenne.
- Erhart, H.** Masson, Paris.
- Forman, R & Godron, M. (1996)** John Wiley & Son, New-York.
- Foesser, M, Contamin, B & Chantre, G. (1996)** Informations-Forêts no.3, f 534.
- Glansdorff, P. & Prigogine, I. (1971)** Masson, Paris.
- Godron, M. (1984)** Masson, Paris 196 p.
- Godron M. (1994)**
- Godron, M. Grandjouan, G., Heulme, E., Le Floc'h, J., Poissonnet, J. & Wacquant, J.-P. (1964)** Ed. CNRS, Paris 192 pages.
- Gosz, J. R., Holmes, R. T., Likens, G.E. & Bormann F. H. (1978)** . in *Pour la Science*, juin 1977 pp. 101-110.
- Hawking, S. (1991)** Flammarion, Paris.
- Kirk, T. K. & Fenn, P. (1982)**
- Langlet, G. (1994)**
- Lee, R. (1980)** Columbia Univ. Press, New-York 349 pages.
- Leisola, M. S. A & Garcia, S. (1989)** in *Enzyme systems for lignocellulose degradation.*- Atelier tenu à Galway, Irlande dans le cadre de la Communauté économique européenne Publié par Elsevier Applied Science pp.89-99
- Leisola, M. S. A & Garcia, S. (1989)** in *Enzyme systems for lignocellulose degradation.*- Atelier tenu à Galway, Irlande dans le cadre de la Communauté économique européenne Publié par Elsevier Applied Science pp.89-99
- Lemieux, G. & Lapointe, R. A. (1989)** . Département des Sciences Forestières de l'Université Laval, Québec, 223 pages. ISBN2-550-21342-4.
- Lemieux, G. (1995)** Université Laval, Québec Canada, 25 pages, ISBN 2-921728-13-3.
- Lemieux, G. (1996)** Université Laval, Québec, Canada 51 pages, ISBN 2-921728-15-X.
- Lemieux, G. (1997)** Université Laval, Québec, Canada 65 pages, ISBN 2-921728-23-0.
- Nye, P.H. & Greenland, D.J. (1960)** Commonwealth Bur. Soils. Tech. Bull 51, 156 p.
- Nyquist, H. (1928)**
- Monès R. --** Gallimard, Paris.
- Perry, D. A., Amaranthus. M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989)** BioScience 39 (4): 230-237.
- Poincarré, H. (1893)** Gauthier-Villars, Paris.
- Poincarré H. (1913)** Flammarion, Paris
- Prigogine, I. (1996)** O. Jacob édit. Paris
- Prigogine I. et Stengers, I. (1979)** Flammarion, Paris.

- Schrodinger, E. (1945)** Cambridge Univ. Press
Shannon C. (1948) Bell syst. Tech. Journ. **27**: 379-423 et 623-656.
Tissaux, J-C. (1996) Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université Laval, Québec publication no. 60, 34 pages ISBN 2-921728-18-4.
Toutain, F. (1981) Rev. For. Fr. **6**: 449-464.
Toutain, F. (1993) In "Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés" édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux; Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec. (Canada), ISBN 2-550-28792-4 p. 103-110.
Vitousek, P.M. (1983) in Mooney, H.A. & Godron, M. (eds) Disturbance and ecosystems, Springer Verlag 129-144.

oo

ISBN:2-921728-35-4
Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, mai 1998

mai 1998
2e édition juin 2001
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.ffg.ulaval.ca/brf/>
FAX 418-656-3177
tel. 418-656-2131 poste 2837
ISBN:2-921728-35-4
Publication n° 88