p. Gagnon

FONDS DE RECHERCHES FORESTIÈRES DE L'UNIVERSITÉ LAVAL
LAVAL UNIVERSITY FOREST RESEARCH FOUNDATION

LA DYNAMIQUE DU SOL FORESTIER EN CLIMAT ATLANTIQUE

par

Philippe DUCHAUFOUR
Professeur à l'École nationale des eaux et forêts, Nancy, France

LES PRESSES UNIVERSITAIRES LAVAL
QUÉBEC, CANADA
1959

FONDS DE RECHERCHES FORESTIÈRES DE L'UNIVERSITÉ LAVAL
LAVAL UNIVERSITY FOREST RESEARCH FOUNDATION

LA DYNAMIQUE DU SOL FORESTIER EN CLIMAT ATLANTIQUE

par

Philippe DUCHAUFOUR
Professeur à l'École nationale des eaux et forêts, Nancy, France

LES PRESSES UNIVERSITAIRES LAVAL
QUÉBEC, CANADA
1959

AVANT-PROPOS

DANS les pages qui suivent, le lecteur trouvera un résumé substantiel des conférences prononcées à l'université Laval, en septembre et en octobre 1958, par M. le professeur Philippe Duchaufour, de l'École nationale des eaux et forêts, de Nancy, sous les auspices de l'Institut scientifique franco-canadien.

Suivies par un auditoire de forestiers, d'agronomes et de biologistes, professeurs, étudiants, spécialistes ou officiers de l'administration et de l'industrie, ces conférences ont soulevé un vif intérêt puisqu'elles soulignaient, par-delà les circonstances géographiques, l'essentielle unité des concepts de la pédologie forestière et l'analogie des problèmes qu'elle doit résoudre d'un côté ou de l'autre de l'Atlantique.

Aussi, nous a-t-il paru singulièrement utile d'assurer la publication des leçons de M. le professeur Duchaufour, non seulement à cause de leur valeur intrinsèque, mais encore parce qu'elles permettront aux pédologistes nord-américains d'apprécier, dans un domaine où la multiplicité des aspects rend la synthèse difficile, la rigoureuse logique de la méthodologie scientifique française.

Par sa situation, ses attaches politiques, ses affinités spirituelles, le Canada, et particulièrement le Canada français, peut servir de plaque-tournante aux courants d'idées émanant de France, d'Angleterre et des États-Unis, se faire l'interprète de

l'activité intellectuelle européenne et américaine, faciliter les échanges de vues et de pensée entre ces pays. Les avantages pratiques de ce rôle ne lui échappent pas. Il y trouve par ailleurs une satisfaction de qualité s'il s'agit, comme c'est ici le cas, de présenter aux spécialistes de l'Amérique du nord, l'un des plus éminents pédologistes forestiers de la France d'aujourd'hui.

L.-Z. ROUSSEAU, *doyen*
Faculté de génie forestier

Omer LUSSIER, *président*
Fonds de Recherches forestières

Université Laval,
Québec, mars 1959.

SOMMAIRE

LA DYNAMIQUE DU SOL FORESTIER EN CLIMAT ATLANTIQUE

par

PHILIPPE DUCHAUFOUR
professeur à l'École nationale des eaux et forêts, Nancy, France

I. L'ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES SOLS FORESTIERS

LES TYPES D'HUMUS FORESTIERS ET LEURS PRINCIPAUX CARACTÈRES BIOCHIMIQUES

I. — INTRODUCTION

Il peut paraître étonnant de commencer une série de conférences portant sur l'évolution des sols, par un rappel des propriétés de la matière organique du sol : cela m'a semblé nécessaire, parce qu'elle joue un rôle essentiel dans la pédogénèse ; la matière organique est, en effet, l'intermédiaire entre le monde vivant et le monde minéral ; elle constitue, pour l'association végétale qui lui donne naissance, un puissant moyen d'action sur l'orientation de l'évolution du sol.

Rappelons le schéma général de la décomposition de la matière organique ; les débris végétaux qui tombent sur le sol subissent une double transformation :

1° une minéralisation plus ou moins rapide, donnant naissance à des composés minéraux, en général solubles ou gazeux : CO^2, NH^3, parfois NO^3H, SO^4-, PO^4-, etc. ;

2° une transformation essentiellement d'origine microbienne, aboutissant à la formation de « l'humus » au sens strict, amorphe et colloïdal, plus résistant que la matière organique fraîche à la décomposition microbienne : cet humus se minéralise à son tour, mais beaucoup plus lentement.

On se trouve donc en présence de deux processus antagonistes, un processus de décomposition, de simplification des molécules (la minérali-

sation), et un processus de condensation, de synthèse (désigné souvent par le terme « humification »), donnant naissance à des produits nouveaux.

II. — Critères permettant de caractériser la matière organique et de classer les « types d'humus »

La classification française des types d'humus est basée avant tout sur deux critères essentiels :

1° vitesse de minéralisation de la matière organique fraîche ;

2° importance des phénomènes de biosynthèse, qui caractérisent l'humification ; la nature des produits formés et le degré de leur liaison avec la matière minérale constituent également un élément important de la classification.

L'aération, le « microclimat interne » des horizons d'humus, jouent évidemment un très grand rôle, car ils conditionnent étroitement les deux processus précédents : en gros, on distingue les humus forestiers formés en aérobiose (bonne minéralisation et bonne humification) et les humus formés en anaérobiose (les tourbes : minéralisation et humification lentes).

En réalité, la question est plus complexe ; certaines phases d'anaérobiose sont nécessaires à la formation des humus biologiquement les plus actifs. D'après Iarkov, Anstett et d'autres auteurs, de courtes phases d'une anaérobiose relative existent même dans les *Mull*, dans les chernozems ; la phase d'anaérobiose ne devient nuisible à l'évolution normale de l'humus que lorsqu'elle augmente en durée et en intensité : la matière organique s'accumule alors dans le sol.

Ainsi, si on part d'un *Mull* actif et si son aération diminue à la suite d'une saturation par l'eau de plus en plus longue, on passe par les phases suivantes :

Mull → *Hydromull* ⟶ *Moder hydromorphe* → *Anmoor* ⟶ *Tourbe*

Bien entendu, une classification valable des humus doit tenir grand compte des facteurs biologiques : l'importance de l'activité animale (notamment lombrics, arthropodes) est considérable, car elle conditionne en grande partie la division mécanique des débris végétaux, leur incorporation à la matière minérale, et elle active à des degrés divers l'action des microorganismes ; par exemple, on sait que la présence des lombrics favorise la formation des *Mull*.

Enfin, pour classer les humus, on s'appuiera également sur des critères chimiques, tels que le rapport C/N des horizons supérieurs. En ce qui concerne le pH, il convient d'être circonspect, car il ne constitue par un critère précis et efficace ; on ne l'utilisera que pour les subdivisions des types principaux.

D'après ces bases, on peut classer les types d'humus en cinq catégories fondamentales :

Humus formé en milieu aéré :

1° Minéralisation rapide, bonne incorporation au sol minéral, structure grumeleuse.....	*Mull*
2° Minéralisation assez rapide, assez bien incorporé au sol minéral, mais structure non grumeleuse....	*Moder*
3° Minéralisation lente, matière organique non incorporée.....	*Mor* (ou humus brut)

Humus formé en milieu mal aéré :

1° Humus biologiquement actif, bien incorporé au sol minéral.....	*Anmoor*
2° Humus biologiquement peu actif, non incorporé au sol minéral.....	*Tourbe*

Le degré de saturation en bases, le pH, n'interviennent en général que pour classer les sous-types. Cependant, on admet que l'humus formé en présence de calcaire constitue une catégorie à part, en raison des processus d'humification beaucoup plus intenses que dans les types plus acides (*Mull* calcique ou calcimorphe).

De même, dans les tourbes, les tourbes acides (oligotrophes) sont nettement séparées des tourbes eutrophes ou mésotrophes, beaucoup plus riches en bases et en azote.

Je résumerai les conclusions essentielles de ce paragraphe dans le tableau ci-après.

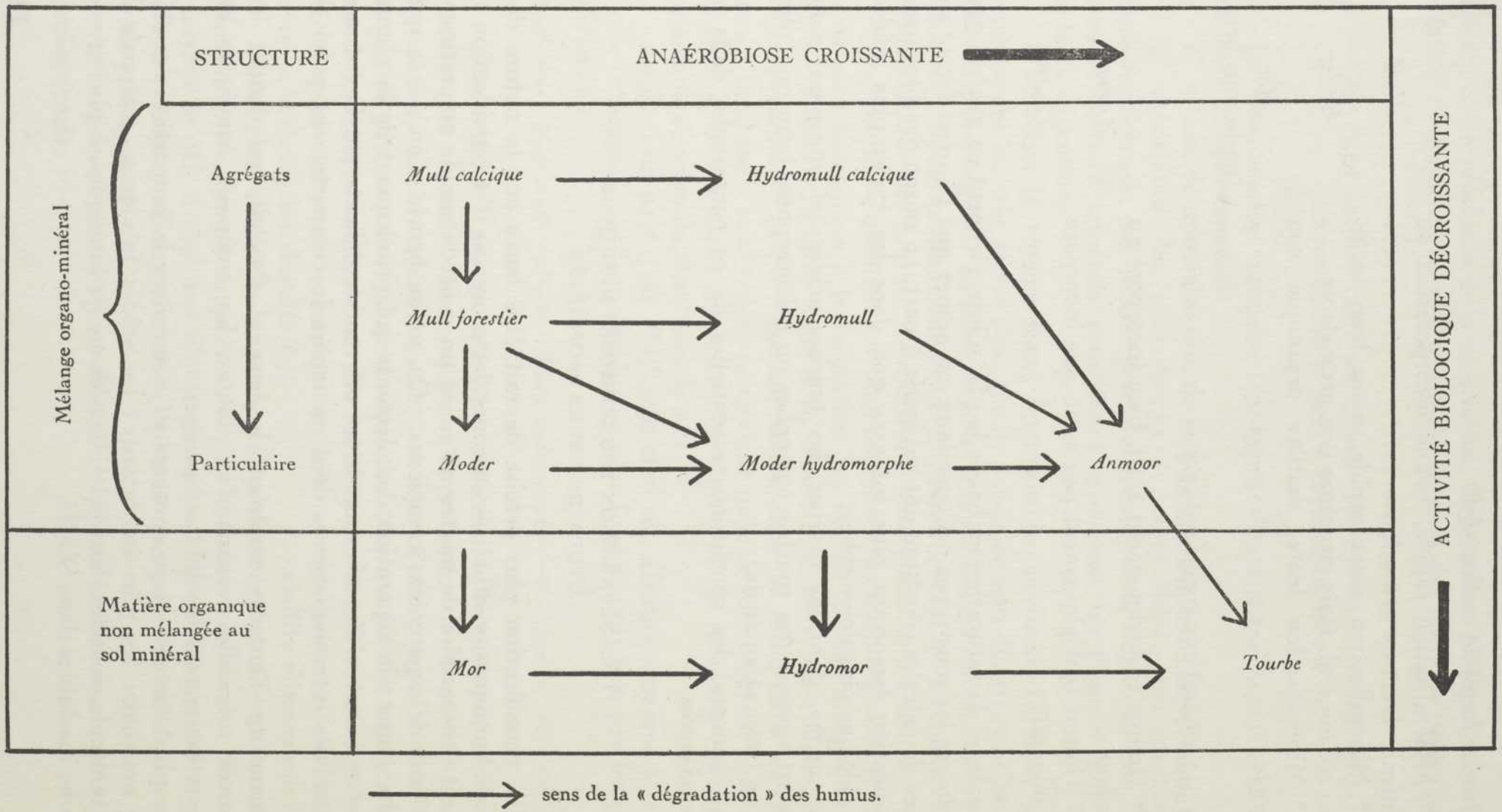
III. Séparation des composés humiques — Étude de leurs propriétés

Une classification plus précise devrait être basée sur la nature des composés humiques, synthétisés au cours des processus d' « humification ». Aussi est-il nécessaire de mettre au point un procédé simple et pratique, permettant de séparer ces complexes. Or, on se heurte d'emblée à une difficulté grave : la séparation des éléments qui proviennent de la plante de ceux qui sont néoformés dans le sol est rendue délicate par l'existence de « produits intermédiaires », dont on ignore le comportement précis à l'égard des réactifs utilisés.

Beaucoup d'auteurs emploient le *bromure d'acétyle*, qui dissout les substances originelles venant des plantes, les composés humiques de néoformation restant insolubles (Springer).

Le plus souvent, on se contente de déterminer la proportion des éléments nouveaux les plus importants : les acides fulviques, composés à petite molécule, solubles dans SO^4H^2, et les acides humiques, à plus grosse molécule, insolubles dans SO^4H^2.

TABLEAU DES PRINCIPAUX HUMUS



N.B. : les termes *Hydromull* et *Hydromor* sont empruntés à la classification canadienne de A. Lafond.

L'extraction de ces éléments se fait à l'aide de solutions de sels alcalins ou de bases diluées ; mais les diverses solutions d'extraction ne se comportent pas de manière uniforme : le degré de saturation en calcium des acides humiques, notamment, influence considérablement leur solubilité dans tel ou tel groupe de réactifs.

Malgré tout, on a pu caractériser, d'une manière plus ou moins précise, toute une gamme de produits, de plus en plus polymérisés, de moins en moins solubles et de plus en plus étroitement liés aux argiles (Springer, Laatsch, Scheffer, Flaig). Ce sont, par ordre de polymérisation croissante : acides fulviques — précurseurs des acides humiques — acides humiques bruns — acides humiques gris.

Tiurin a réussi à isoler ces divers complexes, en se basant : 1° sur leur solubilité ; 2° sur le cation auquel ils sont rattachés ; 3° sur le degré de liaison avec les sesquioxydes et les argiles.

On peut alors distinguer cinq grands groupes de complexes :

F_1 : acides fulviques libres ;

F_2 : acides fulviques adsorbés par les divers acides humiques ;

H_1 : acides humiques libres, ou faiblement liés aux argiles ;

H_2 : acides humiques liés aux argiles par l'intermédiaire du calcium ;

H_3 : acides humiques liés aux sesquioxydes Fe^2O^3 ou Al^2O^3.

On constate que chaque type d'humus offre une individualité biochimique et présente une composition en ces cinq groupes de complexes qui permettent de le caractériser avec précision par rapport aux autres types.

IV. Recherches récentes sur la biologie des humus et leurs propriétés fondamentales

1° *Origine et propriétés des acides humiques bruns et acides humiques gris :*

Les auteurs allemands, cités plus haut, et certains auteurs russes : Kononova et Alexandrova, se sont attachés à définir les propriétés biochimiques de ces deux grands groupes de composés humiques : leur origine, en particulier, paraît être bien différente.

Les acides humiques bruns auraient une origine plus chimique que biologique : ils résulteraient d'une fixation de composés ammoniacaux par les « précurseurs » résultant de l'hydrolyse et de l'oxydation de la lignine, en milieu peu acide. L'intervention des microorganismes est donc réduite à la phase initiale de la dégradation de la lignine et de formation des précurseurs.

Les acides humiques bruns sont peu polymérisés, assez pauvres en azote, et liés peu intimement aux argiles ; ils semblent correspondre aux acides humiques libres de Tiurin.

Les acides humiques gris, au contraire, ont une origine essentiellement microbiologique ; ils résulteraient de l'autolyse de certains champignons

du *Mull* (*Spicaria, Stachybotrys, Aspergillus, Penicillium*) et d'actinomycètes ; les acides humiques seraient ainsi élaborés aux dépens des polysaccharides et des celluloses, par formation de corps à noyaux quinoniques ou tanniques.

Les acides humiques gris, de couleur foncée, sont très polymérisés, riches en azote et intimement liés aux argiles : ils semblent correspondre au groupe H_2 défini par Tiurin.

2° *Recherches sur la biologie des humus effectuées à l'École nationale des eaux et forêts et à l'École nationale supérieure agronomique de Nancy* (Duchaufour et Mangenot) :

Elles utilisent une technique simple d'incubation à l'étuve à 28° des échantillons de matière organique : ceux-ci sont placés, en assez gros volume, dans des bacs en matière plastique, où ils bénéficient de conditions optima de température, d'humidité et d'aération ; les études biochimiques et microbiologiques de ces humus sont poursuivies simultanément. Ces techniques ont été récemment reprises par Zöttl, ainsi que par Lemée et Lossaint.

Deux séries de recherches ont été ainsi entreprises.

a) *Recherches portant sur la minéralisation des types d'humus forestiers.* Des courbes de production d'azote ammoniacal et nitrique ont été établies, en fonction du temps : la « minéralisation » est lente, si le rapport C/N est trop élevé, pratiquement plus grand que 20, rapide au contraire si le rapport C/N est inférieur à 20. Le chaulage n'améliore la production d'azote minéral que pour les humus à rapport C/N suffisamment faible ; sinon il active l'humification et la totalité de l'azote minéral disponible est utilisée par les microorganismes, qui effectuent des synthèses biologiques ; l'azote minéral formé retourne alors à l'état organique.

b) *Recherches portant sur les processus d'humification.* Elles ont montré que la synthèse d'acides humiques restait faible en milieu acide ; elle n'est importante que si le milieu est préalablement neutralisé par le calcium. Dans ce cas, elle existe même en milieu stérile, à condition que la lignine ait subi préalablement une dégradation donnant naissance à des « précurseurs » ; ces précurseurs semblent capables de fixer directement l'ammoniac. Ces recherches ont donc confirmé les résultats obtenus par les chercheurs allemands, au sujet de l'origine des acides humiques bruns.

V. Conclusions

Les résultats de ces recherches ont permis d'augmenter considérablement nos connaissances sur les propriétés des humus et d'étayer sur une base plus solide notre système de classification.

Elles montrent que, pour un climat donné, la « minéralisation » dépend plus de la teneur en azote des débris végétaux que du pH : la production d'azote minéral de résidus végétaux à C/N élevé reste faible, leur décomposition est incomplète (production de *Mor*). Inversement, certains *Mull* acides ou *Moder*, à C/N bas, se minéralisent très vite.

Par contre, le degré d' « humification » est essentiellement fonction de la teneur en calcium (et en magnésium) du milieu ; ces cations bivalents favorisent, en effet, la synthèse d'acides humiques gris, liés à l'argile, par le calcium ; il est possible que certains climats secs provoquent une humification intense, de manière indirecte, parce qu'ils favorisent l'accumulation de ces bases dans l'humus : c'est le cas du *Mull* calcique de steppe des chernozems.

II. FACTEURS DE LA FORMATION DES HUMUS FORESTIERS ET CYCLES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS

RÔLE DE L'HUMUS DANS LA PÉDOGÉNÈSE

I. Le cycle biologique caractéristique des humus

Comme l'ont montré plusieurs auteurs, dont Hartmann et Ehwald, l'arbre vit en grande partie en circuit fermé (au moins dans les forêts vierges). La majeure partie des éléments prélevés au sol y retournent, par l'intermédiaire des feuilles, des débris divers, sous forme de matière organique ; les éléments nutritifs, azote, bases, se trouvent dans cette matière organique, sous une forme d'abord peu assimilable, mais ils sont libérés plus ou moins vite par la minéralisation : l'azote organique se transforme en azote minéral, les bases prennent la forme « échangeable ». Sans doute, des pertes se produisent, par lessivage (bases) ou sous forme gazeuse (azote). Mais ces pertes sont généralement compensées par l'existence de sources additionnelles : par exemple, l'azote atmosphérique fixé par les organismes fixateurs, et les bases résultant de l'altération lente des minéraux du sol, qui constituent une réserve inassimilable.

Il existe donc un véritable cycle des éléments nutritifs, du sol à l'arbre et de l'arbre au sol, le premier restituant au second la majeure partie des éléments prélevés ; mais ce cycle est plus ou moins rapide, suivant les types d'humus : une grande partie de ces éléments est, en effet, « stockée » sous une forme provisoirement inassimilable : soit sous forme de matière organique fraîche incomplètement transformée, lorsque la minéralisation est très lente (horizon A_0 des humus bruts) ; soit sous forme d'humus de néoformation, résultant des phénomènes de synthèse (horizon A, des chernozems, des rendzines).

Les sols atlantiques à *Mull* sont des sols à cycle rapide : les « réserves » sont faibles, car elles sont rapidement remises en circuit et réutilisées par les plantes : la nutrition est bonne, à condition que l'activité biologique qui est grande soit alimentée de manière continue : de ce fait, dans ces sols, une certaine instabilité peut résulter d'une minéralisation trop rapide et d'une humification insuffisante (voir plus loin : *l'étude des phénomènes de « lessivage »*).

Les sols à *Mor* (ou humus brut) sont, au contraire, des sols à cycle lent. Une grande partie de l'azote et même des bases est stockée sous forme inassimilable, dans l'horizon A_0. Lorsque la minéralisation devient très lente, la fertilité diminue et la nutrition des espèces résineuses, seules bien adaptées à ce milieu, ne peut se faire que par l'intermédiaire des mycorhizes.

Ainsi, l'humus brut est caractérisé par une réserve inportante de bases, d'azote, de phosphore, provisoirement détournée du cycle biologique.

II. Facteurs conditionnant les types d'humus

Tout facteur, modifiant l'activité biologique dans un sens ou dans l'autre, provoque l'accélération ou le ralentissement de ce cycle et influence l'évolution de l'humus dans une direction donnée.

Pour l'étude de ces facteurs, nous opposerons les facteurs externes (conditions extérieures à l'humus) aux facteurs internes (nature de la « matière première », donnant naissance à l'humus).

1° *Facteurs externes :*

a) *Les facteurs climatiques* exercent une influence décisive. La décomposition rapide de la matière organique est conditionnée par une température élevée, une humidité suffisante mais non excessive, de façon que l'aération reste favorable. En climat équatorial, en climat méditerranéen, on n'observe pas de formation de *Mor*, en milieu aéré. Au contraire : les climats boréaux, alpins, et à un degré moindre le climat atlantique à forte nébulosité (Bretagne), favorisent la formation des humus bruts à décomposition lente.

Si on compare le climat de l'Érablière canadienne à celui de la Chênaie atlantique, on constate que, même les *Mull*, offrent une décomposition plus lente dans le premier cas que dans le second ; ils sont plus épais et plus riches en matière organique ; il s'ensuit que les phénomènes de « podzolisation » interviennent rapidement dans l'Érablière, par dégradation de cet humus ; alors que les phémomènes de « lessivage », résultant d'une minéralisation trop rapide de la matière organique, sont presque inexistants, à l'opposé de ce qui se passe dans la Chênaie.

Le « climat local » renforce l'action du climat général, dans un sens ou dans l'autre : En montagne, aux altitudes inférieures, la décomposition de la matière organique est ralentie par l'excès d'insolation, qui provoque la sécheresse ; aux altitudes élevées, au contraire, l'humus brut se forme de préférence aux expositions froides, par suite de l'insuffisance de chaleur et de radiations.

Je reviendrai ultérieurement sur l'influence des variations rapides du microclimat dans le temps : les coupes de forêt, les incendies, éclairant brusquement un sol antérieurement ombragé, accélèrent la décomposition des humus, notamment de certains *Mor* ; l'alternance de l'ombre et de la

lumière provoque aussi une alternance de phases de stockage et de phases de minéralisation : un humus brut libère ses éléments nutritifs immobilisés, par à-coups, le cycle normalement lent pouvant être ainsi brusquement accéléré à certaines périodes.

b) *Le facteur roche-mère* est non moins important. La roche-mère intervient surtout par sa richesse en réserve de bases, susceptibles de saturer plus ou moins rapidement les acides organiques formés au cours de la décomposition de la matière organique : en neutralisant plus ou moins complètement les humus, elle active leur vie biologique, donc la vitesse de décomposition.

Sur les roches-mères calcaires ou riches en bases, la formation d'humus brut est, le plus souvent, empêché, à condition : 1° que l'activité animale soit suffisante pour assurer un mélange intime de la matière organique et de la matière minérale ; 2° que les bases contenues dans la roche-mère existent à l'état libre, sous forme « active » (ex. : calcaire à l'état divisé, non à l'état de particules trop grosses).

Il est donc assez rare de rencontrer des humus bruts sur roche-mère calcaire : cela arrive cependant lorsque tous les autres facteurs sont favorables à l'édification d'un humus brut : climat froid ralentissant l'activité biologique, peuplements de Résineux ; c'est le cas de certains sols humiques carbonatés à *Mor* en montagne, ou de certains *grey wooded soils* en climat boréal ; il est remarquable que les humus bruts formés dans ces conditions soient, en général, peu acides et très riches en Ca^{++} et Mg^{++} échangeables.

2° *Facteurs internes :*

Les débris organiques qui retournent au sol agissent sur l'humus par trois propriétés essentielles : la teneur en azote, la teneur en bases (cendres), la teneur en certains éléments antiseptiques, tels que les tannins.

Schématiquement, les tissus jeunes, faiblement lignifiés, sont riches en azote et en bases, ils tendent à se décomposer activement ; alors que les tissus âgés, très lignifiés, sont pauvres en bases et en azote, et tendent à se décomposer lentement.

Mais les faits sont en réalités plus complexes :

La teneur en azote des tissus végétaux est avant tout une question d'espèce (Ehwald) : certaines espèces, dont les feuilles sont à rapport C/N bas, favorisent l'activité biologique (espèces « améliorantes », telles que certains feuillus, Orme, Frêne, Aulnes, etc.), par opposition aux espèces dont les feuilles offrent un C/N élevé et qui ralentissent l'activité biologique : elles sont dites — d'ailleurs à tort — « acidifiantes », par exemple les Éricacées, la plupart des Résineux.

La teneur en bases des résidus végétaux est liée beaucoup plus étroitement aux réserves de bases du substratum minéral : bien qu'elle dépende

surtout de la nature des végétaux, elle varie aussi dans une large mesure avec le substratum. Wittich a signalé que les aiguilles de Pin sylvestre ayant poussé sur roche calcaire pouvaient contenir plus de calcium que les feuilles de Hêtre ayant crû sur un sol siliceux. Une étude statistique de la composition des feuilles de Hêtre, effectuée récemment par Rühl, montre que leur teneur en calcium varie de 1 à 5 suivant la nature de la roche-mère.

Ainsi, la roche-mère agit sur la teneur en bases de l'humus de deux façons : soit *directement* par saturation des acides humiques ; soit *indirectement*, par l'intermédiaire de la plus ou moins grande concentration de cendres qu'elle favorise dans les tissus végétaux, donc la matière première de l'humus.

À ce propos, je rappelerai la conclusion de ma première conférence : c'est la richesse en azote de là matière organique qui conditionne surtout la vitesse de minéralisation ; celle-ci dépend donc en définitive essentiellement de la nature de la végétation forestière.

Au contraire, l'humification est liée à la teneur en bases, elle dépend donc davantage de la roche-mère que du type de forêt : ces observations sont, bien entendu, valables à l'intérieur d'une aire climatique bien déterminée.

On se souvient que les *Mull* (et même certains *Moder*) sont surtout caractérisés par la vitesse de leur minéralisation : les considérations précédentes expliquent qu'on puisse les rencontrer sur certaines roches-mères très pauvres en bases, si le rapport C/N est assez bas ; dans les Vosges, j'ai vu des *Mull* acides à pH4 !

Il est dès lors possible de conclure de cette étude des facteurs de la formation des humus, qu'il existe deux causes essentielles du ralentissement du cycle des éléments nutritifs et de formation du *Mor* : *une cause externe*, liée à un climat défavorable, en général trop froid (*Mor* boréal ou subalpin), et *une cause interne*, liée à une composition défavorable des débris végétaux qui tombent au sol : faible richesse en azote, teneur excessive en lignine et en tannins (*Mor* atlantique).

Les deux causes peuvent bien entendu se combiner, mais, le plus souvent, l'une d'elles est déterminante. On peut alors avoir affaire à deux types d'humus brut, qui se comportent très différemment :

1° l'humus brut « actif » — ou au moins susceptible d'être activé par simple amélioration des conditions extérieures défavorables : c'est le cas de certains humus bruts boréaux ou subalpins qui se décomposent très vite, après une coupe rase, par simple exposition au soleil ; le cycle biologique, provisoirement ralenti, est alors brusquement accéléré.

2° l'humus brut « inactif », formé par une végétation dite « acidifiante » et réfractaire à toute activation provoquée par une amélioration

du microclimat : c'est le cas de certains *Mor* atlantiques, édifiés lentement par de très vieilles landes à Éricacées ; le cycle des bases et de l'azote est alors définitivement freiné. Seul l'emploi de moyens mécaniques et chimiques peut en améliorer les propriétés.

III. Conclusion : l'action de l'humus sur la pédogénèse

J'aurai l'occasion de revenir assez longuement sur cette importante question, au cours des chapitres suivants. Mais, dès maintenant, je voudrais conclure en donnant quelques idées générales et en étudiant rapidement trois exemples types.

Rappelons que les propriétés fondamentales de la matière organique sont liées à trois processus : 1° vitesse de la minéralisation active de la matière organique fraîche, assurant un cycle d'éléments nutritifs rapide ou lent ; 2° importance de l'humification, liée à l'activité de synthèse des microorganismes, fabriquant des composés humiques insolubles ; 3° production de composés ortaniques solubles en quantité très variable suivant les humus (acides fulviques libres, F_1 de Tiurin).

Les trois exemples que je passerai en revue sont les suivants :

1° *Podzol à « Mor » :* minéralisation lente de la matière organique fraîche ; synthèse presque nulle de composés humiques insolubles, capables de retenir le fer et l'argile ; formation d'acides organiques solubles, susceptibles de dégrader chimiquement les argiles et de complexer le fer et l'alumine : ces composés organiques, qui, nous le verrons, sont durables, sont les agents de la « podzolisation » ;

2° *Sols lessivés à « Mull » :* minéralisation rapide de la matière organique fraîche ; synthèse réduite de composés humiques insolubles, conférant à la fraction minérale une structure peu stable : un certain entraînement mécanique du fer et de l'argile est possible ; mais cet entraînement reste limité, par suite de la faible abondance des composés organiques solubles, qui sont toujours rapidement minéralisés ;

3° *Chernozems :* ils sont caractérisés par une humification abondante, donnant des complexes argilo-humiques très stables, et une très bonne structure qui s'oppose au processus d'entraînement. Les composés solubles, au contraire, sont très peu abondants, de sorte que les phénomènes d'entraînement et de lessivage sont nuls.

Ces trois exemples se passent de commentaire : ils parlent d'eux-mêmes ; ils montrent que l'évolution des sols dépend étroitement de celle de l'humus, donc de la végétation.

III. L'ÉVOLUTION DES SOLS FORESTIERS LA NOTION DE « CLIMAX » DU SOL

DÉGRADATION DES SOLS EN LIAISON AVEC CELLE DE LA VÉGÉTATION

I. Introduction

Le sol n'est pas un milieu inerte, mais il évolue en même temps que la végétation qu'il supporte ; il naît aux dépens d'une roche-mère, il passe par une phase de jeunesse, puis de maturité . . . parfois de sénilité ; la comparaison de cette évolution du sol avec l'évolution parallèle de la végétation s'impose à l'esprit. Or, l'évolution de la végétation aboutit à un état stable, en équilibre avec le milieu, appelé *climax*. Par analogie, il est possible d'appeler *climax* du sol (ou *pédoclimax*) la phase de maturité stable du sol, qui correspond au climax de la végétation.

Le *climax* du sol est connu d'une manière assez précise dans les pays à faible densité de population, où la végétation naturelle a été peu modifiée par l'homme : Ainsi, les « sols zonaux », définis par les premiers pédologues, pour la Russie et l'Amérique du nord, sont des sols-*climax*, qui caractérisent des types de végétation bien tranchés suivant les zones de latitude. Mais dans un pays comme la France, où les conditions de végétation et de climat sont moins tranchés, où d'autre part l'action perturbatrice de l'homme s'est exercée pendant des siècles, la notion de *climax* du sol est beaucoup plus difficile à mettre en évidence : la plus souvent, la végétation climacique a été modifiée et remplacée par une association dite « secondaire », à laquelle correspond un sol différent du sol climacique primitif . . . Les sols, comme les associations, ont suivi une évolution, qui les a peu à peu éloignés du stade initial ; ce type d'évolution est fréquemment désigné par l'expression « évolution regressive », parce qu'elle s'éloigne du *climax* ; inversement, toute évolution qui se rapproche du *climax* sera appelée « évolution progressive ».

Il convient de préciser qu'il y a deux sortes d'évolution progressive, de même qu'il existe deux sortes d'évolution régressive.

En ce qui concerne l'évolution régressive, par exemple : celle-ci peut être un « rajeunissement », un retour au stade initial de roche-mère, par un phénomène d'érosion (« régression » au sens de Pallmann) ; ou bien, elle peut consister en une nouvelle évolution, donnait naissance à un

nouveau profil, distinct du profil climacique (« dégradation » de Pallmann, conduisant donc à un sol dit « dégradé »).

De même, le point de départ d'une évolution orientée vers le *climax* peut être soit un lithosol, soit un sol préalablement dégradé : il s'agit de deux types d'évolution progressive bien différents.

Un exemple très caractéristique d'évolution progressive partant d'un lithosol a été donné par Ludi, dans son étude des sols de moraine du glacier d'Aletsch : le glacier ayant reculé progressivement depuis environ un siècle, il est parfaitement possible de connaître avec précision l'âge des différents sols, suivant leur position par rapport au front du glacier actuel. Les phases d'évolution du sol, liées à celles de la végétation, peuvent se schématiser de la façon suivante :

Sols :	Lithosol neutre	⟶	Ranker à humus brut	⟶	Podzol ferrugineux
Végétation :	Mousses, colonisateurs	⟶	Fruticée d'Aulne vert	⟶	Lande à Rhododendron
Âge :	5 ans		30 ans		85 ans

Le sol primitivement neutre, riche en bases et dépourvu d'humus, sans horizons différencié, évolue vers un sol à humus très acide (pH4), fortement décalcifié et à horizons très tranchés, par suite d'un lessivage intense du fer : *Ainsi, le sol en évoluant acquiert des propriétés nouvelles, qui l'éloignent de la roche-mère :* c'est là une notion fondamentale.

II. Sol « climax » et sol « analogue »

Un sol-*climax* présente donc des caractères propres, qui le rendent relativement indépendant de la roche-mère primitive ; ces caractères nouveaux doivent être imputés à l'action combinée du climat et de la végétation, cette dernière agissant sur la matière minérale, par l'intermédiaire de l'humus qu'elle lui incorpore.

Ainsi, la matière organique joue un rôle essentiel dans cette évolution : Aussi est-il facile de comprendre que les horizons supérieurs, humifères, évoluent plus vite que les horizons inférieurs, les horizons minéraux : dans de nombreux cas, les horizons profonds conservent même, quand le stade climacique est atteint, des caractères propres, qui sont liés à ceux de la roche-mère. Il s'ensuit que les sols-*climax* formés, sous une même association forestière, sur des roches-mères différentes, ont des horizons humifères de morphologie et de propriétés semblables, alors que les horizons profonds sont différents : Pallmann a désigné ces sols par l'expression « sols analogues », que je reprendrai ici.

Il convient de préciser ces notions, un peu théoriques, par l'étude d'exemples précis. Pour l'instant, je me bornerai à donner des exemples de certains sols analogues et à les comparer à des sols dégradés, sur des

roches-mères variées, réservant à plus tard l'étude détaillée des phases de chaque type d'évolution.

III. Sols analogues et sols dégradés dans la chenaie atlantique

Il est très difficile de définir le *climax* de la Chênaie atlantique car, presque partout, l'action humaine est intervenue : cependant, les vieilles forêts royales, maintenant forêts domaniales, traitées en futaie de longue date, se trouvent à un état très proche du *climax* ; à la périphérie des massifs forestiers, au contraire, on trouve fréquemment d'anciennes forêts particulières ou communales, qui ont été le plus souvent surexploitées, incendiées, pâturées ; le sol et la végétation forestière y ont subi une « dégradation » plus ou moins complète. Lorsque ces massifs reposent sur plusieurs affleurements de roches-mères très différentes, il devient possible d'étudier les sols-*climax* de vieilles futaie, formés sur roches-mères différentes, c'est-à-dire les sols analogues ; et ensuite d'opposer ces sols aux « sols-dégradés », occupant une situation périphérique, sur les mêmes affleurements géologiques. Lorsque les archives, le cadastre, permettent en outre de reconstituer l'histoire de la forêt, cette méthode s'avère très fructueuse, pour mettre en lumière les phases de l'évolution de la végétation forestière et du sol.

Ainsi, il est fréquent de trouver de vieilles Chênaies, sur trois types de roches-mères très différents : 1° limons sur calcaire ; 2° argiles compactes ; 3° sables. La forêt, proche du *climax*, est une Chênaie à Charme, qui constitue globalement la même association sur les trois affleurements ; seule l'existence de certaines espèces différentielles montre qu'il s'agit de sous-associations ou faciès différents. De même, le sols analogues, formés sur les trois roches-mères, appartiennent au grand groupe des « sols bruns forestiers » à *Mull*. L'ensemble des horizons A est décarbonaté et légèrement acide ; seul l'horizon profond (horizon B) montre des différences marquées : sur calcaire, il contient du carbonate de chaux (sol brun calcimorphe) ; sur argile compacte, il est parfois saturé d'eau et offre un aspect « marmorisé » (sol brun marmorisé) ; sur sable, il est enrichi en fer et de couleur rouille (sol brun lessivé).

Mais ces différences entre les trois types de sols analogues sont relativement minimes, si on les compare aux sols dégradés formés sur les mêmes roches-mères : Ceux-ci, de même que les associations végétales qu'ils supportent, s'opposent radicalement : sur calcaire, on note la présence d'une pelouse xérophile, sur rendzine superficielle ; sur argile, d'une lande humide à *Molinia cærulea*, sur pseudogley ; enfin sur sable, d'une lande sèche à *Erica cinerea* et *Calluna vulgaris*, sur podzol ; la dégradation de la forêt a provoqué l'apparition de nouveaux équilibres végétation-sol, entièrement distincts de l'équilibre climacique primitif ; ces équilibres sont

parfois assez stables et il est alors difficile d'y amorcer à nouveau une évolution progressive vers le *climax* : on les désigne alors parfois par le terme de « *paraclimax* ».

IV. Sols analogues et sols dégradés des sapinières de basses montagnes (Vosges)

La forêt climacique, sur roche silico-alumineuse, dans les Vosges, est parfaitement définie : c'est une Sapinière mélangée de feuillus : Hêtre aux altitudes élevées et sur les versants frais, Chêne rouvre aux altitudes inférieures et sur les versants chauds. Les roches-mères sont au nombre de trois : granit, grès vosgien (très grossier), grès permien (grès fin, relativement plus riche en argile et en réserves de bases). Sur ces roches-mères, de propriétés assez voisines, les sols analogues non seulement sont caractérisés par des humus identiques, mais encore ils offrent des horizons minéraux peu différents : il s'agit, dans les trois cas, de sol brun oligotrophe, à *Mull* acide.

La dégradation de la forêt, que nous étudierons plus en détail dans un chapitre ultérieur, aboutit à une Pineraie à *Calluna vulgaris* et *Vaccinium myrtillus* ; mais cette fois le type de sol diffère suivant la roche-mère : alors que sur le grès vosgien le sol dégradé est un podzol à alios ferrugineux, sur granit ou sur grès permien il ne dépasse pas le stade de sol brun podzolique (ocre podzolique).

V. Sols analogues et sols dégradés en haute montagne (Alpes françaises et suisses)

À l'étage subalpin dans les Alpes, la forêt climacique est une forêt de Pin (*Pinus cembra* ou *P. uncinata*), de Mélèze (*Larix europæa*), d'Épicéa (*Picea excelsa*), avec sous-bois de Rhododendron. Pallmann a défini la notion de « sol analogue » précisément à l'aide de cet exemple : sur roche-mère silico-alumineuse, le sol climacique est un podzol ferrugineux ; sur roche-mère calcaire, c'est un sol humique carbonaté à humus brut en surface : là encore, les horizons humifères sont semblables, les horizons profonds diffèrent.

Notons qu'à cette altitude, le *climax* est un podzol, à l'inverse de ce qui se passe en climat atlantique, où le podzol représente un type de sol dégradé.

Le pâturage en forêt est à l'origine d'un processus de dégradation assez curieux du podzol forestier subalpin : sous son influence, les Éricacées régressent, la forêt se clairière ; les espèces du pâturage, Graminées et Légumineuses, envahissent peu à peu le sol ; la forêt devient un « pré-bois » de Mélèze. L'humus se transforme en *Mull*, les horizons caractéristiques du podzol disparaissent et le sol évolue vers un « sol brun » faiblement

évolué : là encore, l'évolution régressive conduit à un résultat inverse de celui qui est observé en climat atlantique.

VI. Conclusions

Une question de pose : comment provoquer et favoriser l'évolution progressive, qui permettra de reconstituer le sol-*climax*, dans une forêt dégradée ? Je reviendrai longuement sur ce problème, à propos des procédés d'amélioration et de fertilisation des sols forestiers dégradés. Mais il convient de tirer, dès maintenant, deux conclusions pratiques.

1° Plus la dégradation est accentuée, plus la reconstitution de l'équilibre climacique est difficile : certaines associations dégradées se comportent en « *paraclimax* » plus ou moins stable ; il ne faut donc pas attendre que la dégradation soit arrivée à son terme, pour favoriser la nouvelle évolution progressive de la forêt et du sol. Ainsi, une forêt clairiérée, caractérisée par un sol faiblement podzolisé, est plus facile à reconstituer qu'une vieille lande à Bruyères sur podzol.

2° Le seul moyen de revenir au sol-*climax* consiste à essayer de reconstituer la forêt climacique ; mais sur des sols déjà appauvris, elle peut être peu intéressante économiquement. Ainsi, sur un sol podzolique, dans le domaine atlantique, le Chêne manifeste une croissance bien moins satisfaisante que certains Résineux ; par ailleurs, nous verrons que l'emploi d'un Résineux en peuplement pur ne fait qu'accélérer la dégragation du sol. La meilleure solution consiste donc à reconstituer un peuplement, sinon exactement semblable à la forêt climacique, mais tout au moins *équilibré biologiquement*. Un tel peuplement orientera l'évolution du sol dans un sens nettement « progressif ».

IV. L'ÉVOLUTION DES SOLS FORESTIERS, SUR ROCHE-MÈRE SILICEUSE OU SILICO-ALUMINEUSE FILTRANTE

DÉGRADATION PAR PODZOLISATION

Nous commencerons l'étude des divers types de dégradation des sols forestiers en climat atlantique européen, par celle qu'on observe en station drainée, sur roche-mère gréseuse, sableuse ou sablo-limoneuse, perméable, au moins dans les horizons supérieurs : le processus général de la dégradation est alors la « podzolisation » : je rappelle, à ce propos, que ce processus n'est une dégradation, une véritable « maladie » du sol, qu'en climat atlantique ; un climat boréal ou en haute montagne, la podzolisation est un processus climatique normal. D'ailleurs les podzols *climax* du Canada septentrional ont des profils et des propriétés bien différents de ceux des podzols atlantiques : il est donc évident que ces deux types de podzols doivent être distingués avec soin.

I. Propriétés du sol climacique : le sol brun lessivé de la chenaie atlantique

Au chapitre précédent, j'ai défini, les caractères essentiels du sol-*climax* sur de type de roche-mère : c'est un sol brun lessivé (parois un sol lessivé) à *Mull.*

Ce sol est caractérisé par une quantité faible de matière organique, assez acide, à minéralisation très rapide ; l'humus est cependant en quantité suffisante, pour assurer, au moins dans l'horizon de surface, une structure en agrégats favorable, et former des complexes plus ou moins solides avec l'argile et les oxydes de fer, présentant précisément la couleur brune caractéristique de ces sols. Un lessivage *limité* de l'argile et du fer est constant dans ces sols (le profil est de type ABC) ; le lessivage est, en effet, rapidement équilibré par les remontées exercées mécaniquement par certains animaux du sol, en particulier les lombrics ; le degré de lessivage varie suivant les propriétés de la roche-mère (granulométrie, teneur en bases), la pente, etc., de sorte que le sol est soit de type brun lessivé

(faible contraste entre A et B) ou lessivé (fort contraste de couleur et de granulométrie entre A et B ; à l'horizon A devenant brun clair, parfois beige).

Ce sol est favorable à la croissance et à la nutrition des arbres : l'azote, le phosphore, les bases, font l'objet d'un cycle rapide ; l'horizon B, un peu plus compact, garde des réserves d'eau en saison sèche. Son plus grave défaut est parfois l'insuffisance d'humus, qui, nous le verrons, peut provoquer une accentuation dangereuse du lessivage.

II. Les causes et le processus de la dégradation du sol brun lessivé

Le sol-*climax* de la forêt atlantique offre une stabilité très variable : lorsque la teneur en éléments fins (limon, argile) et en bases est suffisante, il est stable, l'équilibre biologique ne peut être rompu facilement, le sol « résiste » aux causes de dégradation ; ce sont, au contraire, les profils les plus pauvres en éléments fins et en bases qui sont le plus sujets à se dégrader et le plus sensibles aux influences extérieures défavorables.

Les causes actives de la dégradation sont alors les suivantes : les coupes répétées et trop brutales, les incendies fréquents, le ramassage de la litière en forêt, le fauchage de la végétation herbacée : ces causes étant évidemment d'autant plus nocives qu'elles interviennent plus régulièrement, plus fréquemment et pendant une durée plus longue.

Je rappellerai que, dans certains cas, l'effet produit n'est pas entièrement défavorable dans l'immédiat : une coupe, un incendie modéré, provoquent une stimulation de l'activité des microorganismes, qui se traduit par une activation de la minéralisation de l'humus, donc de la mobilisation de ses réserves, pouvant être propice à la croissance des régénérations. Mais cet effet est toujours de courte durée ; de plus il aboutit souvent à une dilapidation des réserves de l'humus, par entraînement ou à l'état gazeux.

C'est *l'évolution à longue échéance* du sol qui peut être gravement compromise. En effet, l'humus, déjà insuffisant, peut disparaître presque entièrement ; comme il constitue le ciment des agrégats, la structure est détruite et le sol se tasse ; l'argile, les oxydes de fer sont dispersés et libérés : ils peuvent alors être facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration. D'autre part, l'activité des lombrics diminue, les remontées compensatrices sont donc également freinées ; il s'ensuit une augmentation grave des phonomènes de « lessivage » des colloïdes.

D'autre part, la disparition progressive du peuplement diminue l'apport annuel de litière, ce qui ne permet plus la reconstitution de l'humus, avec son stock d'éléments nutritifs : le cycle des bases et de l'azote, défini préalablement, est rompu.

En résumé, la première phase de la dégradation du sol — qui, nous le verrons, est sensiblement la même pour tous les types de dégradation — se traduit par une disparition plus ou moins complète du *Mull* forestier, une aggravation du lessivage et un appauvrissement général du sol.

La seconde phase, plus lente, plus progressive que la première, est liée à l'établissement, sur le sol forestier, d'une végétation différente de la végétation climacique : cette végétation donne naissance à un type de matière organique différent du type primitif, qui oriente la pédogénèse dans une direction nouvelle : cette végétation peut s'installer spontanément dans les clairières, les vides de la forêt : c'est là l'origine de la « lande », des Bruyères qui envahissent le sol ; mais elle peut aussi avoir une origine artificielle ; lorsque le sylviculteur introduit une espère forestière nouvelle pour combler les vides : presque toujours, il s'agit d'un peuplement résineux, en l'occurrence Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), ou Pin maritime (*Pinus pinaster*), dans le Sud-Ouest. Le plus souvent, les deux, Pins et Éricacées, additionnent leurs effets.

Ces associations forestières non climaciques engendrent un humus de *type « Mor », bien différent du « Mull » primitif, et cet humus provoque à son tour la podzolisation.* Sous certains peuplements de Pin, la podzolisation progresse très rapidement et un podzol ferrugineux peut se constituer en deux générations de Pin sylvestre : En forêt de Leiria, au Portugal, sur sable dunaire, j'ai personnellement observé des podzols à alios typiques, formés dans un rayon de 10 à 20 m autour de vieux pins maritimes de 250 ans, éloignés les uns des autres. Dans l'intervalle des arbres, le sol de la « fruticée », composée d'espèces variés qui avaient envahi la dune, était resté très peu évolué.

Le *podzol atlantique*, qui prend ainsi naissance, offre des propriétés défavorables à la forêt feuillue ; la nutrition de l'arbre, en azote, en bases, en eau, y est défectueuse : seules les Éricacées, les espèces résineuses, peu exigeantes et munies de mycorhizes, peuvent y vivre, de façon d'ailleurs précaire.

Dans la plupart des cas, la Pineraie ou la lande sur podzol constituent un nouvel équilibre relativement stable, qu'on peut qualifier de « *paraclimax* » (Bretagne). Dans d'autres cas, au contraire, le Bouleau peut les coloniser à nouveau et reconstituer un sol brun (Dimbleby), amorçant ainsi une évolution progressive.

III. Étude détaillée de trois exemples de dégradation du sol brun forestier

J'étudierai trois exemples précis, de manière plus détaillée : les dégradations des sols de la Chênaie atlantique sur argile à silex, de la Sapinière vosgienne sur grès vosgien et enfin des forêts feuillues en climat continental (plateau de Bohême en Tchécoslovaquie).

1° *Dégradation des sols de la Chênaie atlantique, sur argile à silex*[1] (figure I) :

Les affleurements d' « argiles à silex » des secteurs parisien et ligérien sont essentiellement à vocation forestière et portent quelques-uns des plus grands massifs forestiers de France : ils constituent donc une roche-mère particulièrement intéressante à étudier. Or, ces argiles à silex comprennent presque toujours deux niveaux de granulométrie bien différente : un niveau superficiel plus ou moins sableux ou limoneux, assez filtrant ; un niveau profond argilo-limoneux beaucoup plus compact, peu perméable ; le niveau sablo-limoneux de surface est d'épaisseur très variable, suivant les stations : lorsqu'il est épais, il est particulièrement exposé à se podzoliser. (Nous verrons, plus loin, que s'il est au contraire peu épais, c'est l'imperméabilité du niveau compact sous-jacent qui imprime à la dégradation du sol une orientation toute différente, vers le pseudogley).

La dégradation de la Chênaie atlantique passe par des phases successives bien caractéristiques, que nous résumerons par le schéma suivant :

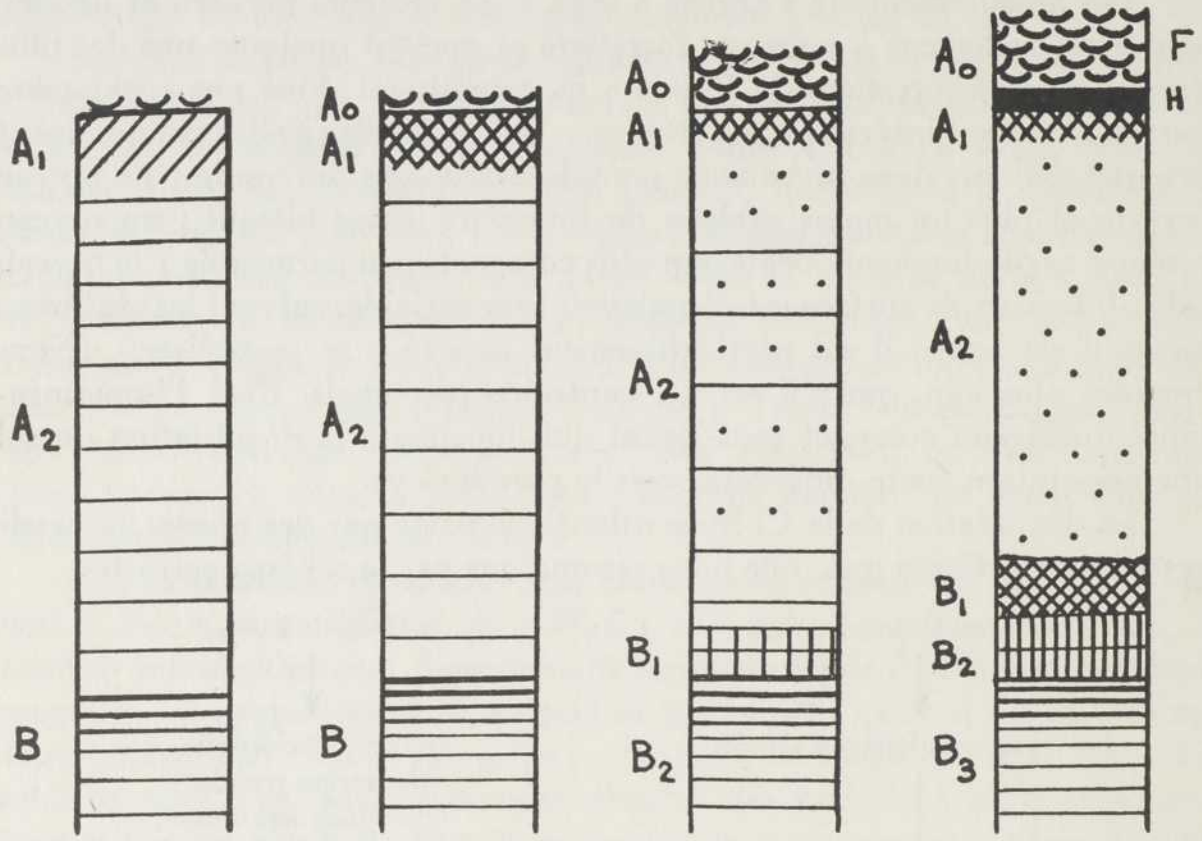
Sol brun lessivé à *Mull*	Chênaie à *Mull*
↓	↓
Sol fortement lessivé à *Moder*	Chênaie acidiphile, à espèces sociales (*Pteridium aquilinum*, *Deschampsia flexuosa*)
↓	↓
Sol podzolique à *Mor* (souvent à pseudogley en profondeur)	Chênaie dégradée, à Bouleaux et à Bruyères
↓	↓
Podzol humo-ferrugineux (souvent à pseudogley)	Pineraie ou Lande à Bruyères

L'examen des profils montre très clairement les phases de cette évolution : la phase initiale d'accentuation du lessivage est marquée par un entraînement accru d'argile et de fer formant en B un horizon argilo-ferrique, tandis que l'horizon lessivé, A2, devient progressivement plus sableux, plus acide, et prend une teinte plus claire.

La phase podzolique commence lorsqu'un *Mor* se forme en surface, l'horizon A2 du sol lessivé, étant devenu très filtrant, se transforme rapidement, sous l'action des composés organiques solubles qui prennent naissance, en un horizon cendreux ou presque cendreux, qui caractérise la phase podzolique ; les migrations de fer, d'alumine, de composés humiques s'intensifient et s'arrêtent, à la partie supérieure de l'ancien horizon B de sol

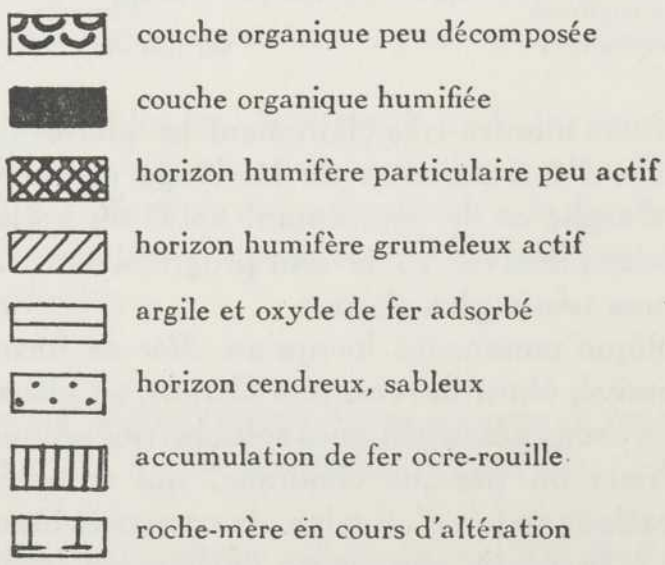
1. Je rappellerai, à ce propos, le remarquable travail de Galoux sur la dégradation des sols de Chênaie de la Campine belge, qui conduit à des conclusions semblables aux nôtres.

lessivé, peu perméable : *un second horizon B foncé, très différent du premier, riche en matière organique et en sesquioxydes, se superpose à l'ancien :* ces



I	II	III	IV
Sol brun lessivé	Sol lessivé	Sol podzolique	Podzol humo-ferrugineux

FIGURE I. — Phases de dégradation des sols de la Chênaie atlantique.



processus expliquent les caractères particuliers du podzol atlantique, qui l'opposent au podzol boréal : horizon A2 cendreux, beaucoup plus épais

(occupant l'emplacement de l'horizon A2 du sol lessivé), horizon B humo-ferrugineux, surmontant un B argilo-ferrique souvent transformé, par son imperméabilité même, en pseudogley.

En résumé, en climat atlantique, une phase de lessivage prépare la phase de podzolisation : 1° en créant les conditions de profil favorables à l'établissement du profil de podzol, par la formation d'un A2 lessivé et d'un B, de textures bien tranchées ; 2° en créant les conditions favorables à l'établissement d'une végétation « podzolisante », formatrice d'un *Mor*.

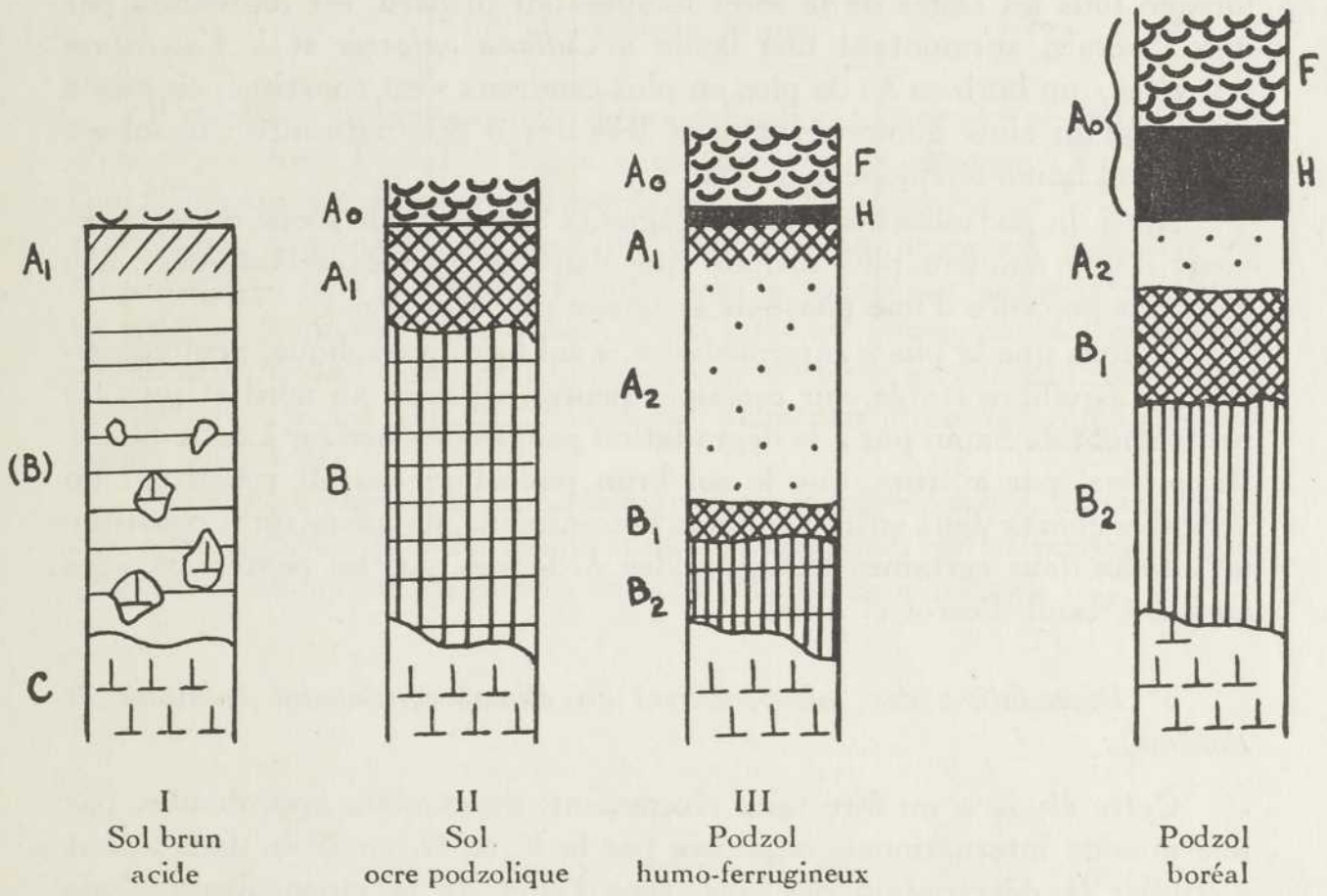


FIGURE II. — Phases de la dégradation des sols dans les Vosges. Comparaison du podzol atlantique et du podzol boréal.

(Légende : voir figure I)

2° *Dégradation des sols de Sapinière, sur pente de roche dure, en basses montagnes* (*Vosges*) (figure II) :

J'ai défini, dans le précédent exposé, le profil climacique de la Sapinière à Hêtre des Basses-Vosges, sur grès vosgien : il s'agit du sol brun acide à *Mull* ; un tel sol est encore peu évolué, en raison de la pente et des phénomènes d'érosion qu'elle occasionne ; le lessivage de l'argile et du fer est donc très peu accentué, parfois inexistant ; souvent même, l'altération qui caractérise l'horizon (B) est incomplète et des fragments de roche-mère, peu décomposés, subsistent à faible profondeur.

Dès la première phase de la dégradation, la podzolisation commence : elle apparaît dans la Sapinière clairiérée à *Vaccinium myrtillus* (expositions fraîches) ou dans les « rapailles » des expositions chaudes, caractérisées par une Pineraie, mélangée des restes de taillis de chênes : Par suite de la dégradation de l'humus, qui évolue vers le *Mor*, les acides fulviques formés attaquent le sol brun, libérant les oxydes de fer et d'alumine, et formant ainsi un horizon B, de couleur vive (ocre-rouille), située directement sous l'horizon humifère *A* : ce sol est un sol brun podzolique (ou ocre podzolique).

Le stade ultime de la dégradation, qui s'observe sur les versants chauds, lorsque tous les restes de la forêt feuillue ont disparu, est représenté par une Pineraie, surmontant une lande à *Calluna vulgaris* et à *Vaccinium myrtillus :* un horizon A2 de plus en plus cendreux s'est constitué, en même temps qu'un alios humo-ferrugineux très dur a pris naissance : le sol est un podzol humo-ferrugineux à alios.

Ainsi, la podzolisation, en montagne et sur pente de roche dure, intervient d'une manière plus brutale que dans les plaines atlantiques ; elle n'est pas précédée d'une phase de lessivage préparatoire.

Notons que la phase intermédiaire, à sol brun podzolique, peut constituer un équilibre stable, sur certaines pentes exposées au nord et sous un peuplement de Sapin pur ; la dégradation peut donc s'arrêter à cette phase. Rappelons, par ailleurs, que le sol brun podzolique paraît constituer un véritable *climax* dans votre Érablière laurentienne, de même qu'il constitue un *climax* dans certaines Hêtrières des Ardennes, sur les pentes exposées au sud (Manil, Pécrot et Avril).

3° *Dégradation des sols forestiers en climat continental (plateau de Bohême) :*

Cette étude a pu être faite récemment, de manière approfondie, par une mission internationale organisée par la F. A. O. en 1956, dans le but d'étudier la dégradation des sols, sous l'effet de la monoculture d'une essence résineuse : M. l'Inspecteur général Lachaussée représentait la France et il a rapporté de sa mission de nombreux documents, qu'il a bien voulu me communiquer.

La Tchécoslovaquie était particulièrement bien choisie, pour un tel programme, car en 1750 une ordonnance royale a prescrit de raser une grande partie des peuplements feuillus et de planter du résineux à l'état pur (Épicéa — un peu de Pin sylvestre), à une densité extraordinaire (60 000/ha). Ces peuplements ont été abandonnés à eux-même sans éclaircie, soumis à une exploitation par coupe rase à 100 ans, et replantés de la même façon. On se trouve actuellement à la fin de la 2e génération ; la création d'un peuplement aussi artificiel et éloigné du *climax* est une belle expérience, pour les forestiers pédologues !

Le sol climacique primitif était un sol brun forestier à *Mull*, très peu lessivé, ce qui est de règle en climat continental. Là encore, la podzoli-

sation est intervenue directement, sans phase de lessivage préalable, causant une dégradation immédiate des argiles, l'apparition d'un horizon cendreux et la formation d'un alios plus ou moins durci.

Le podzol, qui résulte de cette évolution, a une productivité très faible, même pour les peuplements résineux. Les forestiers et les pédologues s'attaquent actuellement au problème difficile de la reconstitution de la forêt et de son sol, question que nous reprendrons ultérieurement à propos des sols forestiers dégradés.

IV. Conclusions

Il y a donc différentes sortes de podzolisation : ce peut être un processus climacique (forêt boréales, haute montagne), ou un processus de dégradation (Chênaie atlantique, basse montagne). Dans le domaine de la Chênaie atlantique, la podzolisation est préparée par un processus préalable de « lessivage » : le « sol lessivé » fait alors la transition entre le sol brun forestier et le podzol atlantique. Dans tous les autres cas, au contraire, elle intervient de façon immédiate, sur un sol brun ou sur une roche-mère peu altérée : le sol brun podzolique est alors une phase intermédiaire qui paraît obligatoire.

Mais cette phase « brun podzolique » peut correspondre, dans certains cas, à un équilibre plus ou moins stable, notamment sur les pentes de grès vosgien ; c'est même un *climax*, dans l'Érablière canadienne.

V. COMPARAISON DES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES

LESSIVAGE ET PODZOLISATION

I. Introduction

L'École française de pédologie estime qu'il convient de distinguer ces deux processus d'évolution du sol, comme étant fondamentalement différents, alors qu'ils sont encore confondus par plusieurs auteurs, notamment en Amérique : sous le prétexte qu'il s'agit toujours de phénomènes d'entraînement des colloïdes (oxydes de fer, argile, etc.), ces auteurs admettent, en effet, qu'il n'existe qu'une différence de degré, non de nature, entre les processus de pédogénèse qui caractérisent des zones climatiques aussi différentes que le sud-est des États-Unis (*Red and yellow « podzolic » soils*) et l'extrême nord du Canada (podzol).

Or, les études faites en France, puis dans l'ensemble de l'Europe, montrent de manière de plus en plus évidente que ces processus doivent être soigneusement distingués, et se traduire par une nomenclature appropriée : nous avons donc cru bon de séparer le *lessivage* : « processus d'entraînement mécanique des colloïdes en milieu faiblement humifère, relativement peu acide et biologiquement actif » de la *podzolisation* : « processus d'altération chimique des colloïdes minéraux, libérant des sesquioxydes, se produisant sous l'action d'un *Mor* ».

Cette notion s'est répandue peu à peu dans toute l'Europe, où elle a été adoptée par de nombreux auteurs : par les pédologues belges d'abord, puis en Autriche (Fink), en Grande-Bretagne (Avery), en Allemagne (Kohl, Kundler) et même en U.R.S.S. (Friedland). Plusieurs de ces auteurs Fink, Avery, emploient le terme français « sol lessivé ».

Les recherches sur ce problème se poursuivent depuis plus de dix ans ; les idées à son sujet ont pu se préciser peu à peu, en utilisant successivement les résultats des études de terrain, puis ceux des études de laboratoire, et enfin les essais de coordination des uns et des autres : je retracerai brièvement les phases successives de leur évolution.

II. Données des recherches de terrain et des études morphologiques et chimiques des sols

Sans revenir sur le détail du chapitre précédent, je rappellerai et préciserai quelques conclusions essentielles, qui ont trait au sujet traité :

Les sols « lessivés », dont l'humus est un *Mull* ou un *Moder* à minéralisation rapide, ne montrent qu'un entraînement mécanique d'oxydes de fer et d'argile, sans modification chimique des constituants : il n'y a pas formation d'Al^2O^3, ni migration de matière organique dans l'horizon B. À l'inverse, la podzolisation débute par une altération intense des éléments minéraux du profil, qui se traduit par une libération massive d'oxydes de fer, donnant au sol une couleur ocre ou rouille (horizon (B) d'altération) : dès le début de leur dégradation, les sols bruns forestiers perdent leur couleur terne pour prendre, au moins localement, une teinte plus vive (sol brun podzolique). Enfin, un fait important, qui oppose les sols podzoliques (même dans les stades initiaux) aux sols lessivés, est l'imprégnation des horizons (B) d'altération, par des composés organiques solubles abondants. La migration de ces composés, qui complexent et solubilisent les sesquioxydes, n'intervient que dans une phase ultérieure : l'horizon A_2 plus ou moins cendreux apparaît alors, tandis que l'horizon B_1, riche en composés organiques et en sesquioxydes, se constitue à son tour : cet horizon, rappelons-le, vient se plaquer au-dessus de l'ancien horizon B du sol lessivé, dans les cas où les deux types de pédogénèse se succèdent.

III. Données de l'étude de la fraction minérale des deux groupes de sols

Cette étude a été poursuivie statistiquement, en collaboration avec G. Millot et Michaux en 1950 : la fraction fine (inférieure à $0{,}5\mu$) a été étudiée, à l'aide des spectres aux rayons X, dans les deux types de sols.

Dans les sols lessivés, les argiles migrent sans transformation : on trouve les mêmes types d'argiles et dans les mêmes proportions, dans les horizons A et B ; les oxydes de fer ne migrent que partiellement : seule la fraction la plus libre, la moins solidement fixée au complexe argilo-humique, est entraînée.

Dans les podzols, au contraire, les argiles sont détruites entièrement dans les horizons A ; on constate en effet que la fraction fine de ces horizons est constituée uniquement de grains de quartz très fins ; en B, on retrouve des argiles (provenant de migrations dans une phase précédente) et les sesquioxydes libres Al^2O^3 et Fe^2O^3.

Il y a donc destruction des argiles en A : la question qui se pose est alors la suivante : que devient la silice colloïdale libérée ? On peut penser qu'elle reste sur place et se transforme en quartz par cristallisation lente : mais l'examen au microscope électronique du quartz fin de l'horizon A_2 des podzols a montré que cette hypothèse était inexacte ; il s'agit uniquement, en effet, de quartz détritique.

La silice libérée migre en B, comme l'a montré Tamm ; j'ai moi-même constaté, par des dosages chimiques, que l'alios contenait souvent 0,5% de silice colloïdale.

Ainsi, à la différence du lessivage, la podzolisation est un phénomène d'altération chimique intense, qui affecte non seulement des minéraux complexes, mais aussi les argiles elles-mêmes : la totalité des oxydes de fer liées aux argiles est libéré ; ensuite, les argiles elles-mêmes s'altèrent, avec libération d'alumine et de silice, qui migrent à leur tour.

IV. Données de la pédologie expérimentale : étude des phénomènes d'entraînement, par percolation de colonnes de terre

De nombreux auteurs ont essayé de reproduire au laboratoire les phénomènes d'entraînement des colloïdes, par percolation de colonnes de terre : citons, à ce propos, les expériences de Betremieux, Bloomfield, Lossaint, De Long et Schnitzer, etc. . . .

Toutes ces expériences ont mis en évidence le rôle des composés organiques solubles : 1° pour réduire les oxydes de fer à l'état de FeO ; 2° pour complexer le fer et favoriser son entraînement. Selon Betremieux, le fer, entraîné à l'état ferreux, précipite en B à l'état ferrique. Selon De Long et Schnitzer, une grande partie du fer peut être entraînée aussi à l'état ferrique.

Mais ces expériences n'ont pas permis de distinguer les deux phénomènes, car elles ont été poursuivies dans des milieux différents des milieux naturels : ainsi, Bloomfield et Lossaint ont utilisé des extraits stérilisés de feuilles de différentes espèces ; dans ces conditions, ils ont constaté que les extraits de Frêne (*Fraxinus excelsior*), de Charme (*Carpinus betulus*), s'avéraient plus actifs pour complexer et entraîner le fer, que les extraits de feuilles de Pin (*Pinus sylvestris*) : ce résultat paraît en contradiction formelle avec les phénomènes naturels décrits précédemment ; en réalité, ils s'expliquent très bien, si on tient compte du fait que, dans la nature, les milieux ne sont pas stériles et que ces composés organiques solubles, plus ou moins résistants à la destruction par les microorganismes, ont une durée plus ou moins longue : Lossaint a récemment montré que les extraits non stériles de feuilles de Pin gardaient leur efficacité beaucoup plus longtemps que les extraits de feuilles de Frêne ou de Charme. Il semble que ces expériences aient reproduit les processus de « lessivage », non de « podzolisation ».

V. Données de l'étude de la matière organique et de son évolution dans le sol

Il est bien prouvé que la matière organique joue un rôle essentiel dans les processus de solubilisation et d'entraînement des colloïdes : mais son action est-elle semblable dans les deux processus étudiés ?

Avant d'aborder cette question, il convient de rappeler une notion fondamentale, dont il a été déjà question : au cours de son évolution, la

matière organique fraîche donne naissance à deux grandes catégories de composés, dont les actions sur l'évolution des sols s'opposent : 1° des produits organiques insolubles (acides humiques en particulier), qui constituent avec l'argile un ciment et forment ainsi des agrégats, qui s'opposent à l'entraînement des colloïdes et, dans une certaine mesure, des bases (bases retenues par le complexe absorbant) ; 2° des composés organiques solubles qui, complexant le fer et dispersant l'argile, favorisent leur entraînement.

Il est donc intéressant de comparer la nature et les propriétés de ces différents composés, dans les deux grands groupes de sol, et de voir dans quelle mesure cette étude ne donnerait pas la clef des expériences précédentes.

1° *Composés insolubles (acides humiques) :*

Rappelons que les phénomènes de lessivage sont liés à une minéralisation rapide de l'humus, avec faible humification : la disparition des réserves humiques est presque toujours à l'origine d'une recrudescence de ces phénomènes. En milieu suffisamment riche en bases (Ca^{++} et Mg^{++}), la réserve humique est, au contraire, plus abondante, la structure plus stable, le lessivage est réduit à son minimum (sol brun calcimorphe, sol brun mélanisé).

Quant aux podzols, la quantité de composés humiques insolubles, formant des agrégats avec l'argile, est presque nulle ; il est normal que, dans ces sols, les processus d'entraînement atteignent leur intensité maxima.

2° *Composés solubles :*

Ils constituent la cause active de l'entraînement des colloïdes, c'est donc leur étude qui permet le mieux de différencier les deux processus : Or, la méthode Tiurin de dosage des « acides fulviques libres » (F_1), les plus actifs à ce point de vue, montre les faits suivants :

Dans les sols lessivés, la teneur en F_1 passe de 0,5 à 1,4% en A_1 à 0,1% en B ; dans les sols podzoliques, la teneur en F_1 passe de 0,2% en A_1 à 1,2 à 2% en B.

D'autre part, l'étude au laboratoire d'extraits à l'eau à 30°C. a donné les résultats suivants : les extraits de feuilles ou de litière fraîche contiennent très peu d'azote (C/N 70 à 75 pour les Résineux), alors que les extraits de *Mor* en contiennent une certaine quantité (C/N 15 à 20). Les premiers, probablement des polysaccharides (Bernier), s'avèrent très rapidement fermentescibles *in vitro,* alors que les seconds sont relativement résistants à la décomposition microbienne.

Bien que ces produits solubles ne soient pas encore identifiés, on peut donc affirmer avec certitude qu'ils sont différents lorsqu'ils proviennent de litière fraîche (ou de *Mull*), ou lorsqu'ils sont extraits de l'humus brut : *les premiers sont fermentescibles, peu durables, ils ne se retrouvent pas dans*

l'horizon B (sols bruns lessivés et sols lessivés). *Les seconds résistent à l'action microbienne, ils s'accumulent et subsistent dans les horizons B* (podzols).

Une remarque doit être faite, en ce qui concerne les composés intermédiaires entre les deux groupes, les « précurseurs » des acides humiques, à solubilité variable : ces composés paraissent jouer un grand rôle dans la podzolisation. Il est possible que leur évolution passe par deux phases, en application de certaines observations de Iarkov et de Betremieux : 1° une phase soluble, se déroulant en anaérobiose, au cours de laquelle aurait lieu l'entraînement du fer ; 2° une phase d'insolubilisation par oxydation et polymérisation, au sein de l'horizon B. Mais cette hypothèse n'a pas été vérifiée.

VI. Essai de synthèse : différences fondamentales entre les sols lessivés et les sols podzoliques

Il résulte de l'ensemble de ces données que les sols lessivés et les podzols s'opposent entièrement par leur processus de pédogénèse. Résumons schématiquement ces différences :

Lessivage :

— Matière organique à minéralisation rapide (*Mull*, certains *Moder*), humification souvent insuffisante pour s'opposer aux processus d'entraînement ;

— Formation de composés organiques solubles, fermentescibles, peu durables, qui disparaissent du profil, à mesure qu'ils migrent en profondeur ;

— Ces composés solubles sont en quantité suffisante pour complexer le fer le plus mobile et disperser une partie des argiles ; il n'y a en aucune façon altération des silicates.

Podzolisation :

— *Mor* à minéralisation lente, ne formant pas de composés humiques insolubles, susceptibles de constituer un complexe argilo-humique floculé.

— Formation de composés solubles abondants, durables, non fermentescibles, susceptibles de s'accumuler en B après migration.

— Ces composés, très acides, sont « agressifs » à l'égard des colloïdes minéraux qu'ils altèrent, en libérant la silice, l'alumine ; la totalité des oxydes de fer est complexée et entraînée.

Ainsi, la podzolisation, à la différence du lessivage, est avant tout une altération intense, complétée ensuite par un phénomène d'entraînement.

Mais il existe d'autres différences entre les deux grands groupes de sols, portant notamment sur le cycle des éléments nutritifs : elles permettent

d'expliquer le comportement relatif de deux types de sols, à l'égard de la nutrition des arbres.

Les sols lessivés sont caractérisés par un *cycle rapide des bases et de l'azote* ; une partie des bases est lessivée et retenue en B ; réabsorbée par les racines, elle retourne par l'intermédiaire de l'humus dans l'horizon A1.

Au contraire, les podzols sont des sols à cycle lent : la minéralisation de l'humus est très lente et libère peu d'azote et de bases ; les bases échangeables elles-mêmes sont retenues très énergiquement dans l'humus brut.

Ainsi, presque tous les éléments nutritifs sont stockés, dans l'horizon organique A0 ; les horizons minéraux s'appauvrissent de plus en plus et, dans ces conditions, l'entraînement des bases diminue nécessairement ; *le cycle biologique se localise de plus en plus dans les seuls horizons humifères de surface.*

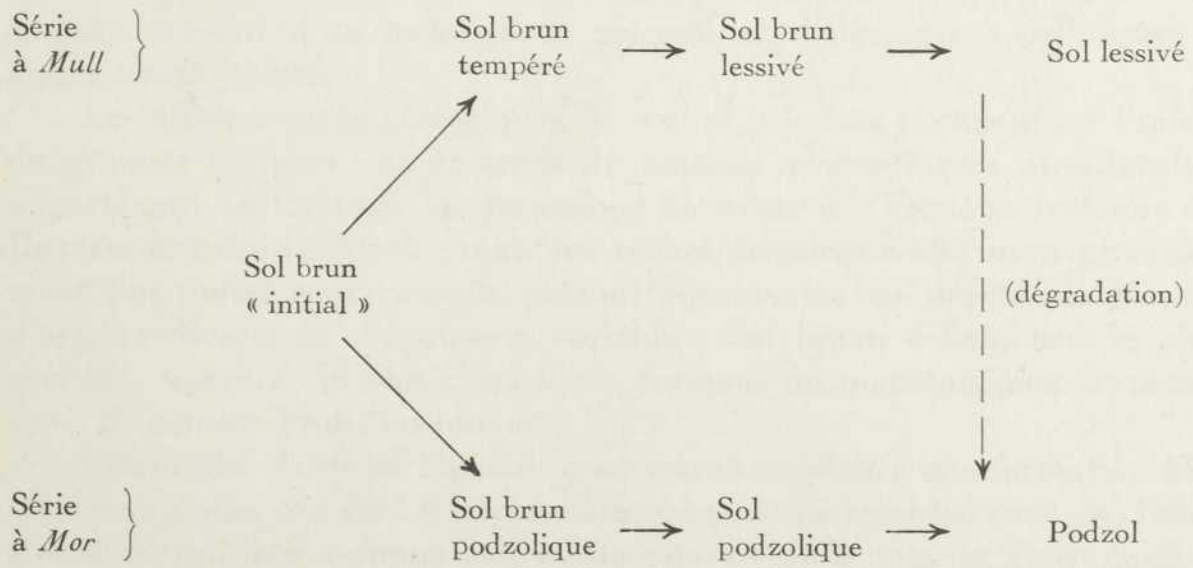
Conclusions

Je tirerai de cet exposé deux conclusions fondamentales, l'une qui a trait à la classification des sols, l'autre qui concerne les différences entre les podzols boréaux et les podzols atlantiques.

1° *Classification des sols :*

Il est essentiel de placer les sols lessivés et les sols podzoliques dans deux classes différentes : la pédogénèse des sols lessivés se rapproche de celle des sols bruns tempérés, dont elle ne diffère que par l'intensité des phénomènes d'entraînement. Les podzols, au contraire, constituent à eux seuls une classe à part. C'est aussi l'avis de Kundler.

Il existe deux grandes séries évolutives de sols, qu'on peut matérialiser par le schéma suivant :



Les stades initiaux sont encore assez voisins, alors que les différences s'accentuent pour les stades les plus évolués.

2° *Comparaison du podzol atlantique et du podzol boréal (ou subalpin) :*

Les propriétés de ces deux types de podzols diffèrent en fonction même de leur origine et de leur processus évolutif : le podzol atlantique est caractérisé par une phase préparatoire de lessivage, l'altération des silicates ne survenant qu'ensuite. Au contraire, dans le podzol boréal, altération et entraînement se produisent simultanément.

Autrement dit le podzol atlantique prend naissance sur un milieu préalablement fortement appauvri en bases ; le *Mor* atlantique est édifié par une végétation dite « acidifiante », très peu exigeante en éléments nutritifs : c'est un « *Mor* inactif », qui, dans les cas graves, est très pauvre en réserves de bases ou d'azote minéralisable.

Au contraire, le podzol (de même que le podzol subalpin) se forme aux dépens d'un substratum pouvant être encore relativement riche en bases ; l'humus brut est d'origine climatique, il peut être « activé » facilement (voir premier chapitre). D'autre part, il peut accumuler des réserves de bases et d'azote plus abondantes et plus facilement disponibles, que dans le cas du podzol atlantique.

Ainsi, l'étude physico-chimique des deux types de podzols, confirme très nettement les résultats : 1° de leur étude morphologique ; 2° de leur étude écologique et biologique, qui a montré que l'un était un *climax*, alors que l'autre résultait d'une dégradation.

VI. L'ÉVOLUTION DES SOLS FORESTIERS SUR ROCHE-MÈRE CALCAIRE

I. Introduction

Il convient de définir d'abord ce qu'on entend par « roche-mère calcaire » : la teneur en carbonates de ces roches-mères peut varier de 1 à 2% à 99%, et il est évident que, du point de vue de la pédogénèse, ces deux extrêmes ne se comportant pas de la même façon.

Une remarque préliminaire s'impose : en plaine, les sols trop exclusivement calcaires ne sont pas des sols forestiers. Sur ces sols, il se développe un *climax* local de la végétation (« *climax* édaphique ») qui est une « fruticée » (association d'arbustes), ou une pelouse. Ainsi, par exemple, la craie sénonienne, en Champagne, donne un sol contenant souvent plus de 80% de carbonate de chaux ; ce sol est superficiel, sec, très pauvre en tous éléments autres que le calcium : d'après certains auteurs, Fliche, Laurent, l'association *climax* de cette région serait une sorte de « steppe édaphique » ; la seule formation ligneuse serait la « garenne », sorte de pré-bois très clair, occupant les grèves calcaires, les terrasses fluviales (Gaume).

Les sols calcaires qui portent vraiment des forêts se forment en réalité sur des roches-mères mixtes : limono-calcaires, argilo-calcaires, qui résultent le plus souvent d'un mélange de calcaire et d'éléments « siallitiques », argile, limon, sables.

Les affleurements géologiques de roches calcaires occupent en France de grandes surfaces : ils forment de grandes plates-formes structurales, appartenant au Crétacé, au Jurassique et même au Tertiaire (calcaire de Beauce, calcaire lutétien) : mais ces roches calcaires n'affleurent généralement pas ; elles sont presque partout recouvertes de dépôts siallitiques d'origine diverse et d'épaisseur variable : soit limon éolien, soit le plus souvent « argiles de décalcification », formant un manteau plus ou moins épais de couleur brune ou rouge.

Ces argiles de décalcification constituent en réalité une formation très complexe ; elles ont subi une première phase de pédogénèse sous un climat chaud, ce qui leur a donné leur teinte vive (d'où le nom de *Terra fusca* si cette couleur est ocre, *Terra rossa* si elle est rouge : Kubiena, Franz). Au cours des périodes glaciaires, ces formations ont été remaniées par « cryoturbation » et mélangées plus ou moins intimement à des fragments de calcaire

éclatés, provenant de la roche sous-jacente ; les coupes de sols montrent des poches très caractéristiques de *Terra fusca*, dont l'épaisseur varie considérablement d'un point à un autre (voir figure III) ; l'ensemble s'est alors comporté en nouvelle roche-mère et a subi une pédogénèse très variable, suivant la profondeur de la roche dure, le degré de division du calcaire et l'intimité du mélange formé ; enfin, suivant la nature et l'état de la végétation qui le recouvre.

II. Le « climax » du sol forestier sur roche calcaire

Les sols mixtes, ainsi définis, se comportent en bon sol forestier ; il est même possible d'affirmer que leur « vocation » est forestière, car ces

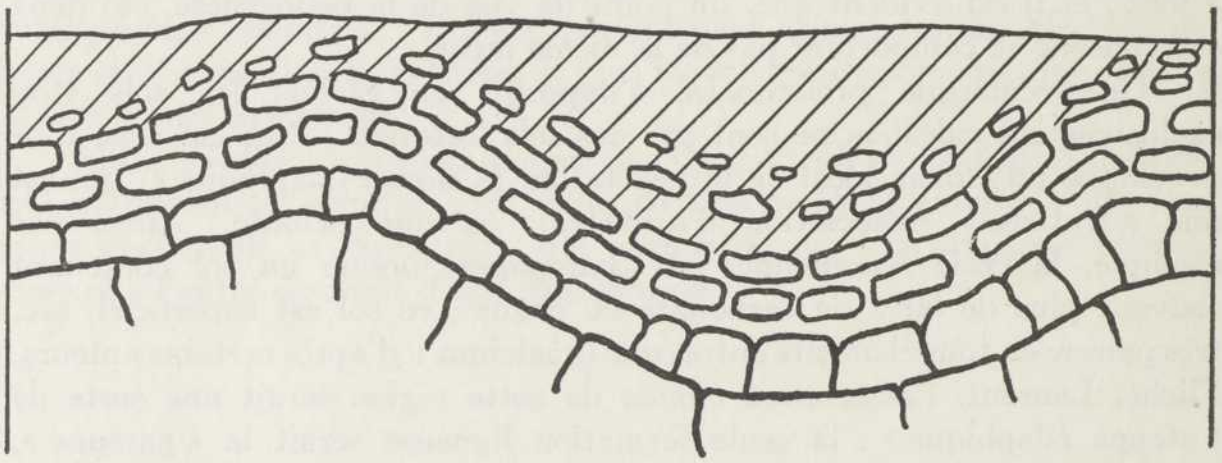


FIGURE III. — Coupe schématique montrant l'aspect des poches de *Terra fusca* sur calcaire.

sols sont trop secs, trop superficiels, pour la culture ou la prairie ; non pour l'arbre, dont les racines pénètrent profondément dans les fissures remplies de *Terra fusca*, qui contient des réserves d'eau.

Je passerai en revue trois profils climaciques, formés dans trois domaines climatiques différents : domaine de la Chênaie atlantique, domaine de la forêt méditerranéenne, domaine de la forêt résineuse de montagne.

1° « *Climax* » *du sol dans le domaine atlantique :*

Le profil, formé sur *Terra fusca*, a été déjà brièvement décrit à propos des sols analogues : c'est un profil de sol brun, entièrement décarbonaté dans les horizons supérieurs, à *Mull* riche en calcium échangeable (pH 5,8 à 6). L'horizon profond contient des carbonates, résultant du mélange de *Terra fusca* et de fragments de calcaire : c'est un sol brun forestier calcimorphe.

2° « *Climax* » *du sol dans le domaine méditerranéen* (*forêt de Chêne vert*) :

Le profil est semblable, mais les argiles de décalcification, formées en climat plus chaud encore, ont une couleur rouge, provenant de la déshydratation plus ou moins complète des oxydes de fer (*Terra rossa*) ; le profil climacique est néanmoins un sol « brun », de type un peu particulier (sol brun méditerranéen) ; les oxydes de fer sont, en effet, partiellement réhydratés en surface, en raison du microclimat forestier plus humide, et adsorbés par le complexe argilo-humique ; la couleur rouge se retrouve à une quarantaine de centimètres de profondeur.

3° « *Climax* » *du sol en montagne :*

Là encore, la forêt résineuse imprime au sol une évolution très particulière ; sur les pentes de montagne, la manteau d'argile de décalcification est peu épais, il a même le plus souvent disparu par érosion ; il en résulte que la roche calcaire est le matériau presque exclusif, qui sert de base à l'édification du sol : mais la forêt résineuse engendre une grande quantité de matière organique très noire, qui se décompose lentement, en raison du climat montagnard, s'accumule dans les fissures du calcaire, où elle dissout le calcaire actif, et acidifie le sol au moins en surface. On se trouve en présence d'un sol humique carbonaté « brunifié », ou même « acidifié » en surface, par formation d'un véritable humus brut, favorable à la vie des mycorhizes et à la nutrition des Résineux.

On voit que la forêt joue un rôle essentiel dans la constitution de son sol, sur roche-mère calcaire ; elle maintient un microclimat frais, favorable à la vie biologique de l'humus, elle freine l'érosion et l'enlèvement de la *Terra fusca* ou de la *Terra rossa*, enfin et surtout elle provoque une dissolution lente des carbonates, par les composés organiques acides qu'elle produit, donc une décarbonatation, une « brunification » de son sol.

III. La dégradation des sols forestiers sur roche calcaire

Les phases de la dégradation de la végétation forestière présentent de grandes analogies, quel que soit le secteur climatique considéré : À la forêt, succède la « Fruticée », composée d'arbustes calcicoles variés avec, parfois, quelques arbres épars : Érable champêtre, Chêne pubescent en climat chaud, Chêne kermès d'ailleurs buissonnant, dans le Midi, où il caractérise la « Garrigue ». Peu à peu, la Fruticée fait place à une « Pelouse » xérophile.

Cependant, dans les montagnes humides, la dégradation s'arrête le plus souvent au stade de la « Fruticée » ; peu à peu, la forêt résineuse reprend le dessus et se réinstalle (Jura) ; il n'en est pas de même dans les montagnes plus sèches (Alpes méridionales), où les réserves humiques

sont insuffisantes et où l'érosion sévit gravement ; la dégradation peut alors se poursuivre jusqu'au « lithosol ».

Je n'étudierai ici, en détail, que la dégradation des sols en climat tempéré froid et en climat méditerranéen.

1° *Dégradation des sols calcaires, dans le domaine atlantique* (*figure IV*) :

À mesure que la forêt se clairière, l'érosion sévit avec plus d'intensité et le *Mull* forestier, légèrement acide, disparaît : le sol devient de plus en plus superficiel, les fragments de calcaire, plus nombreux et plus proches

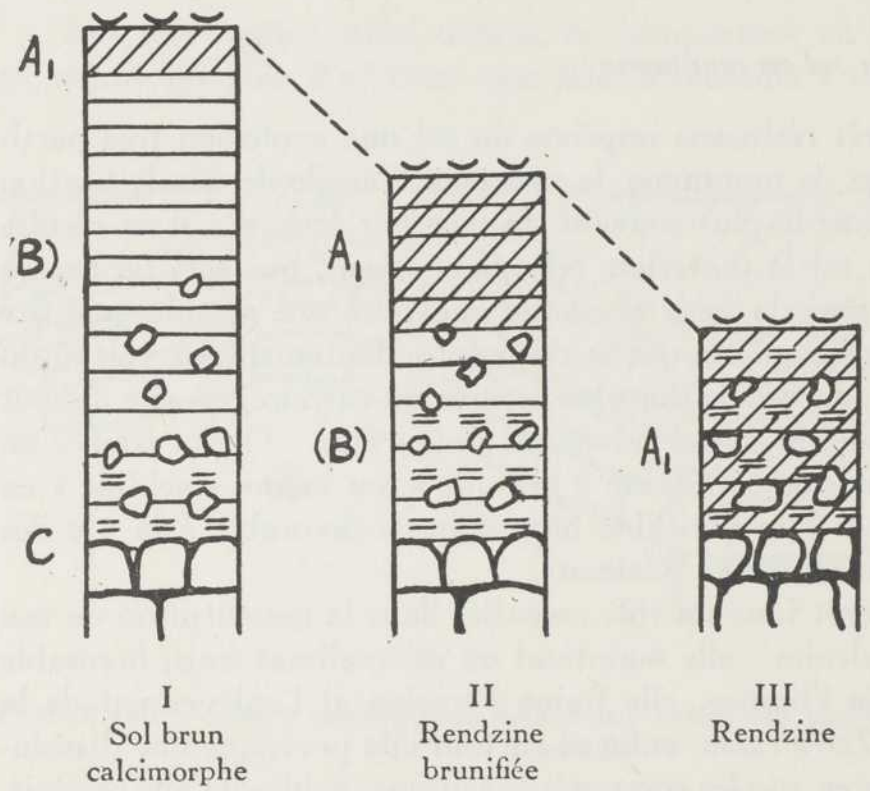


FIGURE IV. — Schéma de la dégradation des sols forestiers sur roche calcaire et *Terra fusca*.

Mull grumeleux

Carbonate de chaux.

Argile et oxyde de fer adsorbé.

de la surface, s'altèrent sous l'effet des variations de température et d'humidité plus brutales : le sol s'enrichit ainsi peu à peu en carbonates actifs.

La Fruticée, puis la Pelouse, donnent naissance à un nouvel humus, le *Mull* calcique, légèrement alcalin, formant avec l'argile des grumeaux très stables. Le sol devient une « Rendzine », à profil A/C superficiel, riche en carbonates actifs, parsemé de fragments de calcaire et contenant une grande quantité d'humus, masquant plus ou moins le fer ; cette rendzine est grise ou gris-brunâtre.

Il existe une phase de transition entre le sol brun forestier et la rendzine ; c'est la rendzine « brunifiée », qui présente des caractères mixtes : notons que, souvent, l'évolution régressive s'arrête à ce stade.

Cette dégradation donne lieu, là encore, à un nouvel équilibre sol-végétation, assez stable : la rendzine n'est plus à proprement parler un sol forestier, c'est une sorte de steppe édaphique, d'origine anthropomorphique ou biotique, sur calcaire : l'ensemble constitue encore un « *paraclimax* ».

2° *Dégradation des sols calcaires, en climat méditerranéen :*

Elle est plus brutale encore qu'en climat atlantique : l'humus forestier, moins abondant, disparaît totalement, de sorte que la structure est détruite ; l'érosion, intense sous ces climats, décape en général les horizons *brunifiés*, laissant à nu la roche-mère, la *Terra rossa* ; celle-ci peut être érodée à son tour ; très souvent elle ne subsiste plus que sous forme de poches, s'accumulant dans les creux ou dans les fissures corrodées du calcaire. La végétation de la formation dégradée qui a remplacé la forêt, la « Guarrigue », comprenant des buissons de Chêne kermès, de Cistes et une maigre pelouse à *Brachypodium ramosum*, est insuffisamment dense pour reconstituer un humus, sous ce climat : le sol est un sol « rouge » dégradé, sur *Terra rossa*.

IV. Une exception : les rendzines forestières

Ces lois d'évolution des sols forestiers comportent une exception : il existe, en effet, des forêts non dégradées en équilibre avec des rendzines d'un type spécial, les rendzines forestières. Ces forêts sur rendzines forestières sont toujours étroitement localisées dans des stations particulières : les sols appartiennent alors à la catégorie des sols « intrazonaux », selon une ancienne terminologie. Ils sont liés à un *climax* forestier très local et ne s'observent que dans des stations en pente, sur roche-mère meuble (éboulis, dépôts de pente plus fins, résultant d'ancienne cryoturbation). Dans ce cas, toute évolution vers le sol brun est freinée ; il se produit, en effet, un brassage constant des horizons avec certains éléments de la roche-mère, par voie mécanique (érosion) ou biologique (activité animale). Cette rendzine forestière, de couleur noire, exceptionnellement riche en humus, se comporte en bon sol forestier, car les défauts du profil sont corrigés : 1° la roche-mère meuble est profondément pénétrée par les racines, ce qui remédie à l'insuffisance de profondeur du sol ; 2° l'excès de carbonate actif est compensé par l'abondance de l'humus incorporé au sol minéral, jusqu'à 12 à 15% en surface, ce qui amène le pH à 7 ou 7,5, et favorise des conditions de nutrition bien meilleures.

V. Conclusions

Nulle part ailleurs que sur roche-mère calcaire, n'apparaît avec plus de netteté l'action édificatrice de la forêt, vis-à-vis de son sol ; elle conserve, plus encore elle « crée » le milieu qui lui est favorable.

Nulle part aussi les phénomènes de dégradation, lorsqu'ils sont poussés à l'extrême, ne sont suivis de conséquences plus tragiques ; sans doute, en climat assez humide, la dégradation aboutit, comme sur roche siliceuse, à un nouvel équilibre sol-végétation, qui remplace l'équilibre primitif ; mais, si le climat est trop sec, il arrive fréquemment que l'érosion progresse plus rapidement que la pédogénèse et freine l'apparition d'un nouvel équilibre stable ; dans ce cas, les dépôts meubles, *Terra fusca* ou *Terra rossa*, sont emportés, laissant le calcaire à nu. Ce n'est plus seulement le sol qui a été ainsi enlevé, mais une partie intégrante de la roche-mère ; l'évolution est alors strictement irréversible ; le reboisement de certaines stations, dans la moitié méridionale de la France, est presque impossible, faute de terre fine ; au contraire, lorsqu'il reste encore un rudiment de « sol », la reconstitution d'une forêt artificielle, à l'aide de certains Résineux xérophiles (Pin noir d'Autriche), est encore réalisable.

VII. ÉVOLUTION DES SOLS FORESTIERS SUR ROCHE-MÈRE IMPERMÉABLE

GLEY ET PSEUDOGLEY

I. Introduction

Dans l'Ouest de la France, beaucoup de forêts occupent des affleurements de roches-mères peu perméables : il s'agit, en général, de sédiments à granulométrie défavorable, soit argilo-limoneux, soit limoneux, donc riches en éléments fins et pauvres en sables ; les roches-mères contenant beaucoup de « limons » (*silt*) [1] sont particulièrement défavorables (plus encore que les roches-mères argileuses), parce que les limons, n'étant pas colloïdaux, n'ont pas la possibilité de constituer un « ciment » formant des agrégats : s'ils sont abondants, ils donnent une structure massive ou « fondue », dans laquelle les pores sont trop fins pour assurer l'écoulement de l'eau de gravité ; ainsi, sur ce type de roche-mère, il faut une grande quantité de matière organique, formant un complexe argilo-humique stable, pour assurer une bonne structure : toute disparition ou dégradation de la matière organique provoque rapidement une destruction de la structure, suivie d'un tassement du sol, qui devient asphyxiant et imperméable.

Or, beaucoup d'affleurements tertiaire de l'Ouest de la France (argiles à silex, sables et argiles de l'Orléanais et de la Sologne, etc. . . .) comprennent, comme je l'ai déjà signalé, plusieurs couches successives de granulométrie différente : en général, une couche assez sableuse en surface et une plus compacte en profondeur. Si la couche sableuse est très peu épaisse, l'évolution du sol est dominée par son imperméabilisation et il se forme un « *pseudogley* » ; si, au contraire, la couche sableuse est d'épaisseur moyenne (0,50 m à 1 m), la forme de dégradation est mixte : podzolisation en surface, pseudo*gley* en profondeur : il existe donc toute une gamme de sols intermédiaires, qu'on peut désigner par l'expression « sol podzolique à *pseudogley* ».

1. On entend par limons, la fraction 2 à 20 μ ; mais, actuellement, on tend à rattacher à cette fraction la fraction 20 à 50 μ, qui s'en rapproche par ses propriétés (« limons grossiers ») ; ainsi, dans le sol, les éléments fins constituent l'ensemble de la fraction $< 50\,\mu$.

II. Comparaison des profils du *Gley* et du *Pseudogley*

Ces deux sols offrent une morphologie assez voisine, à première vue, et ils ont été longtemps confondus. C'est le mérite de l'École allemande et autrichienne (Krauss, Kubiena, Mückenhausen) d'avoir montré la nécessité d'en faire la distinction. Ils ont en commun leur caractère « hydromorphe » et le phénomène de réduction des sels ferriques, en sels ferreux, provoquant une décoloration partielle et localisée du profil. Mais les différences sont importantes : le *Gley* se forme sous l'influence d'une « nappe phréatique » permanente, provoquant une réduction presque complète du fer, qui migre partiellement vers la surface, où il précipite à nouveau par oxydation, ce qui détermine l'apparition de taches ou de concrétions rouille.

Le *Pseudogley*, au contraire, doit son origine à la présence d'une « nappe perchée » temporaire, résultant d'un défaut d'infiltration des eaux pluviales ; le fer réduit subit un « lessivage » localisé, et il se concentre, sous forme ferrique, en certains points du profil, qui prend également un aspect « bariolé ».

Le *Gley* est un sol typiquement « intrazonal », caractéristique (comme les rendzines noires forestières) de certaines stations particulières : ces stations sont caractérisées par une nappe souterraine permanente, dont l'eau est insuffisamment renouvelée et aérée, pour présenter des propriétés réductrices ; en outre, les oscillations d'une telle nappe sont, en général, peu marquées et ne dépassent pas 1 m (Mückenhausen) ; sous son influence, le fer, réduit à l'état ferreux, subsiste sous cette forme dans les horizons profonds, auxquels il imprime une couleur gris verdâtre, presque uniforme ; l'horizon intermédiaire, par contre, est caractérisé par la présence de taches rouilles ou de concrétions, provenant de la précipitation à l'état ferrique du fer ferreux soluble, qui a migré par voie ascendante.

Enfin, la matière organique est, le plus souvent, un humus de marais ou *Anmoor*, parfois un *hydromull* grumeleux, lorsque la zone saturée par l'eau n'atteint jamais la surface, ce qui permet la vie des lombrics.

La végétation, qui caractérise les sols à *Gley*, est très spéciale et profondément différente de celle des *pseudogley* : elle est constituée par des espèces hygromorphes : Grands Carex (*Gley* à *Anmoor*), Prairie humide ou Aulnaie (*Gley* à *hydromull*, Lafond).

À la différence du *Gley*, le *Pseudogley* n'est pas un sol intrazonal, lié à certaines stations bien définies, il résulte de la dégradation d'un sol forestier. C'est donc en étudiant les phases de cette dégradation qu'il sera possible de mettre en évidence les particularités de son profil : Nous verrons qu'elles sont bien différentes de celles des vrais *Gley*.[1]

---

1. Je ne parlerai pas ici d'un type strictement intermédiaire : il s'agit du sol formé sous l'influence d'une nappe « perchée », dont la durée, pour des raisons climatiques, est presque permanente ; le profil se rapproche alors de celui d'un vrai *Gley*, c'est un « *stagnogley* ».

III. Processus de la dégradation du sol forestier sur roche-mère peu filtrante

Il convient d'étudier d'abord le point de départ : c'est-à-dire le profil du sol « analogue » initial, caractéristique de la Chênaie en bon état, sur ces roches-mères.

Ce profil présente les mêmes horizons superficiels que les autres sols analogues de la Chênaie, déjà décrits : humus de type *Mull*, à décomposition rapide ; horizon A2, brun clair ou beige.

Mais l'horizon profond (B) présente presque toujours certaines particularités, notamment l'accumulation de fer ferrique n'est pas uniforme : elle forme des taches ocre (parsemées de concrétions noires), alternant avec des taches grisâtres ou beige clair : cet horizon est dit « marmorisé », l'emploi d'un adjectif se justifiant par le fait que l'évolution est orientée vers le « *pseudogley* », les caractères étant moins accentués que dans le type : si l'on veut, il s'agit du « *β-Gley* » de Wilde, mais encore incomplètement développé. Le profil peut être désigné comme : un sol brun lessivé, ou un sol lessivé « marmorisé ». (Cette dénomination sous-entend aussi, bien entendu, que le phénomène de marmorisation est localisé en profondeur).

Les causes de la « dégradation » de ce profil *climax* sont les mêmes que les causes générales, étudiées à propos de la podzolisation : coupe brutales, dénudation du sol, par exemple, provoquant : 1° une disparition de l'humus, donc un tassement des horizons de surface ; 2° une diminution ou un arrêt du drainage naturel par le peuplement et, par voie de conséquence, le maintien, pendant une durée plus ou moins longue, d'une *nappe perchée temporaire*. Dans l'état antérieur d'un peuplement fermé, au contraire, de telles nappes ne pouvaient avoir qu'une durée éphémère, en raison de la forte consommation d'eau par les racines des arbres.

La végétation se modifie et, à la flore caractéristique du *Mull*, succède une végétation composée d'espèces sociales, de Graminées, résistant au tassement et à l'asphyxie : *Agrostis alba, Molinia cœrulea* ; peu à peu, les arbres disparaissent et sont remplacés par une lande dite « humide », à Molinie.

Sous l'influence du défaut d'aération, l'humus évolue vers un *Moder* hydromorphe, sans structure : les composés organiques solubles augmentent, ils provoquent une libération des oxydes de fer, sous forme de taches rouille, et leur réduction partielle, favorisant un lessivage plus intense ; la première phase est donc assez analogue à celle qui a été décrite à propos du lessivage, au moins en ce qui concerne la partie superficielle du profil.

Pour bien comprendre les phases suivantes, il importe d'étudier préalablement l'économie de l'eau, dans les différents horizons : Rappelons, à ce propos, que les horizons de surface (A1A2) sont plus riches en éléments grossiers que l'horizon profond (B), soit en raison des particularités de la roche-mère (qui comprend presque toujours deux niveaux de granulométrie différente), soit par suite des phénomènes antérieurs d'entraînement de l'argile. Pour cette raison, les horizons de surface contiennent

encore des pores grossiers (porosité non capillaire), alors que les horizons profonds n'offrent plus que des « pores capillaires », qui se saturent d'eau de rétention : dans ces conditions, aucun écoulement d'eau de gravité n'est possible et l'horizon profond s'imperméabilise totalement ; l'eau « libre », qui occupe les horizons A de surface, ne peut alors s'écouler et devient « stagnante » : elle constitue la « nappe perchée », qui repose sur la partie supérieure de l'horizon B.

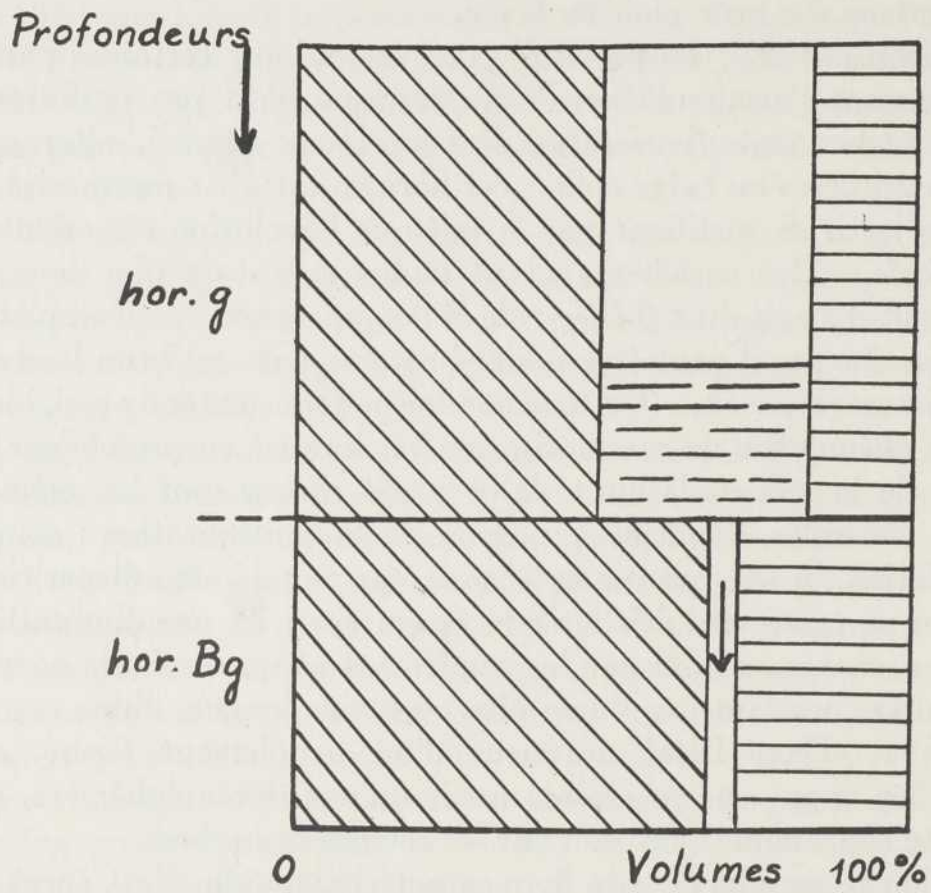


FIGURE V. — Schéma montrant l'origine de la nappe stagnante dans un pseudogley.

volume du solide

pores grossiers : eau de gravité, air

pores fins : eau capillaire

nappe stagnante

En réalité, il subsiste, en profondeur, des zones où un drainage très réduit est encore possible, mais elles sont strictement localisées : il s'agit soit de vieilles racines décomposées, soit d'anciennes fentes de retrait résultant des périodes sèches et incomplètement refermées ; ces zones sont donc à orientation verticale ; en résumé, *le drainage ne s'effectue que localement, suivant des zones préférentielles, orientées verticalement* (figure V).

Ainsi, la nappe s'épuise de deux façons : 1° par évaporation ; 2° par écoulement très lent, suivant ces zones à drainage préférentiel ; en période sèche, elle s'épuise plus rapidement qu'elle n'est alimentée par les pluies et elle disparaît.

Il est possible de déduire de ces faits quelle sera l'orientation de l'évolution du profil : l'ancien horizon A2 de la Chênaie, occupé par la nappe perchée, et l'ancien horizon B plus compact, qui correspond au « plancher » de la nappe, vont évoluer très différemment ; nous les étudierons successivement.

1° L'ancien horizon A2 : pendant la période de stagnation de l'eau (période humide), les oxydes de fer sont réduits et ils se solubilisent. En période sèche, lorsque la nappe disparaît, ils se concentrent autour des radicelles, qui absorbent les dernières traces d'eau libre, et précipitent sous forme ferrique, donnant naissance à des taches rouille ou à des concrétions : ils ne migrent donc que *localement*, sur des distances de quelques centimètres.

L'horizon A2 prend alors un aspect bariolé, il devient l'horizon *g* de *pseudogley*.

2° L'horizon B, plus compact, n'évolue qu'en période humide, lorsque la nappe existe : dans les zones verticales à drainage préférentiel, le fer est réduit et totalement lessivé, et il précipite latéralement, en bordure de ces zones : il en résulte un profil très contrasté, formé de traînées verticales blanches — complètement dépourvues de fer dans les cas extrêmes — bordées latéralement par des bandes rouille.

Il est, dès lors, facile de saisir les différences entre le *pseudogley* et le vrai *Gley* ; elles portent sur les points suivants :

1° L'humus est toujours un *Moder* hydromorphe dans le *pseudogley* (parfois un *Mor*, dans les sols à *pseudogley* un peu podzolisés en surface), alors que cet humus peut être de type très varié dans les *Gley* : *hydromull*, *Anmoor*, suivant l'importance des oscillations de la nappe.

2° Les horizons intermédiaires se ressemblent dans les deux types, car ils sont caractérisés par des taches rouilles et des concrétions, sur un fond plus clair.

3° Les horizons profonds s'opposent au contraire entièrement, dans les deux types : riches en fer ferreux dans le *Gley*, ils n'en contiennent pas du tout dans le *Pseudogley*, où les parties verticales blanches sont presque totalement dépourvues de fer libre.

En outre, l'horizon B*g* du *pseudogley* est plus riche en fer que l'horizon *g* intermédiaire, alors que dans le *Gley*, au contraire, A2G est enrichi en fer par rapport à l'horizon G de profondeur, par suite des phénomènes de migration ascendante. Ces différences, ainsi que la pédogénèse des *pseudogley*, sont schématisées par la figure VI.

IV. Propriétés des sols à *pseudogley*

Les différences de propriétés entre les *Gley* et les *pseudogley* sont considérables : les sols à *Gley* sont parfois asphyxiants, mais ils ne sont *jamais*

secs. Il n'en est pas de même des *pseudogley,* dont les propriétés physiques sont plus défavorables encore que celles des *Gley* : ils se comportent, en effet, alternativement en sols asphyxiants (périodes où la nappe existe), ou en sols secs (périodes d'absence de la nappe).

Pendant les phases asphyxiantes, la profondeur utile du sol est souvent limitée par la nappe : en période de croissance des racines, celles-ci doivent se localiser au-dessus de la nappe, donc tout à fait en surface.

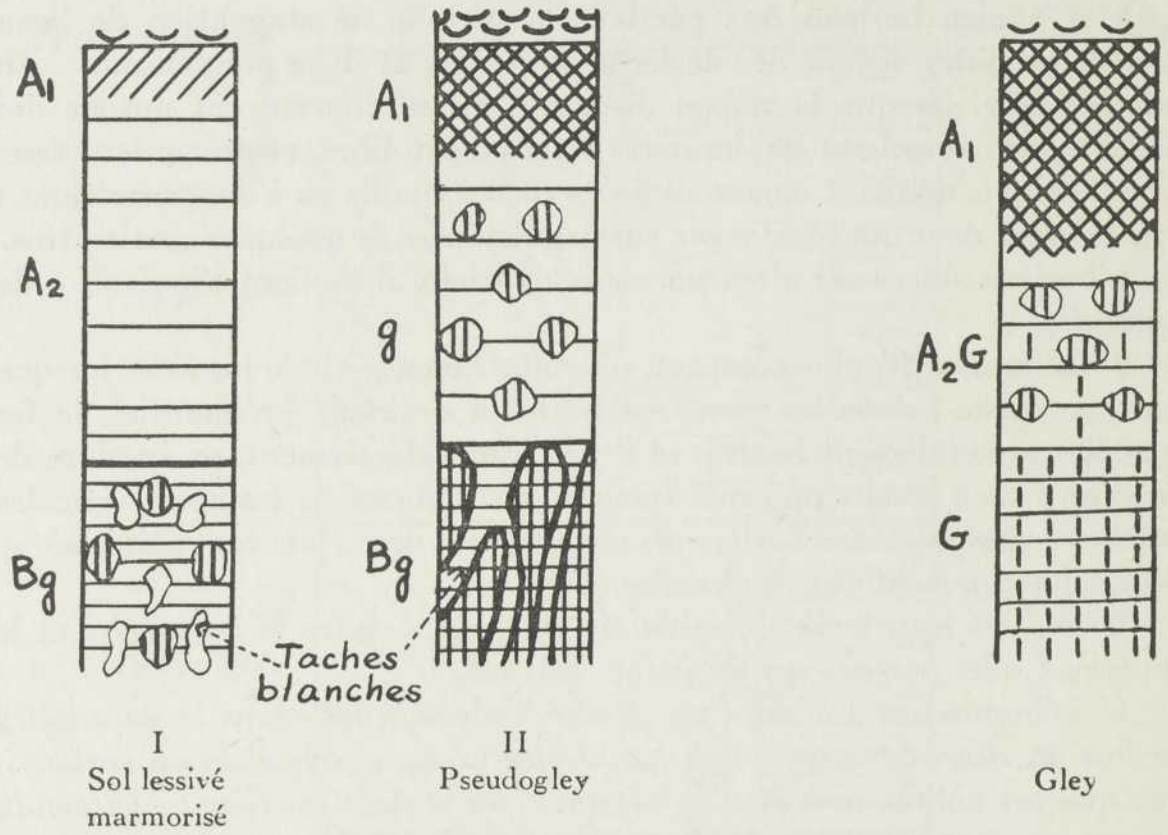


FIGURE VI. — Dégradation des sols forestiers sur roche-mère peu perméable. Comparaison Pseudogley et Gley.

Mull grumeleux

Moder ou *Anmoor* sans structure

Argile

Fer ferreux

Accumulation de fer ferrique.

Pendant la phase d'absence de la nappe (périodes sèches), les pluies s'infiltrent mal, par suite du tassement et de l'insuffisance de structure des horizons de surface ; l'horizon de *Moder* seul se gorge d'eau ; il ne se constitue pas alors de réserves profondes et les pertes d'eau par évaporation sont considérables.

Seules subsistent les réserves capillaires existant encore dans l'horizon B*g* ; mais elles sont, le plus souvent, hors de portée des racines localisées trop superficiellement.

Il est significatif que les plantes qui caractérisent les *pseudogley* ne sont pas véritablement des hygrophiles, comme dans les sols à *Gley* : ce sont des plantes résistantes à l'asphyxie, telles *Molinia cærulea, Rhamnus frangula,* mais qui supportent parfaitement des phases de sécheresse accentuée.

V. Conclusion

La lande dite à tort « humide », sur les sols à *pseudogley,* est une fois de plus une formation relativement stable, en équilibre avec un nouveau type de sol, très différent du profil climacique initial.

Cet équilibre — encore du type que nous avons appelé « paraclimacique » — est particulièrement stable et difficile à modifier : en effet, il résulte de modifications physiques, plutôt que biochimiques, du profil : or, il est plus facile de corriger des défauts chimiques que de remédier à des propriétés physiques défavorables.

Étant donné les surfaces considérables, occupées en France par les forêts dégradées sur sol imperméable, on conçoit que le problème de leur reconstitution soit l'un des plus graves et des plus délicats à résoudre, qui se posent au reboiseur et au sylviculteur.

VIII. LES PROCÉDÉS D'AMÉLIORATION ET DE FERTILISATION DES SOLS FORESTIERS DÉGRADÉS

I. Introduction

Le service forestier français se trouve devant une tâche considérable : la mise en valeur de plusieurs millions d'hectares de forêts dégradées, ou de landes improductives ; le problème se résume de la façon suivante : il s'agit de reconstituer un équilibre sol-forêt stable, proche de l'équilibre climacique, qui a été défini précédemment ; autrement dit, de renverser la tendance évolutive, qui a prévalu au cours des siècles antérieurs, et de favoriser à nouveau l'évolution progressive. Mais il faut aussi créer, dans l'immédiat, un peuplement « productif » et ces deux impératifs ne sont pas toujours faciles à concilier. Un Service spécial a été créé dans ce but, au sein de l'Administration forestière française, le Service de la « forêt privée », alimenté par le « Fonds forestier national », en vue de favoriser le reboisement par les particuliers, qu'il conseille techniquement et aide financièrement. Ce Service est aidé dans sa tâche, par une commission de spécialistes, le « Comité consultatif du reboisement », qui se réunit périodiquement.

Depuis la dernière guerre, les techniques mises en œuvre ont fait de rapides progrès : il semble que, vues dans leur ensemble, elles ont passé par trois phases, que nous passerons en revue successivement : 1° on a d'abord cherché à reconstituer des forêts productives, mais biologiquement équilibrées ; 2° on a ensuite favorisé les reprises des plantations, en mettant en œuvre divers procédés de travail du sol ; 3° enfin, actuellement, on cherche à compléter les techniques d'amélioration physique, par des techniques d'amélioration chimique, en utilisant les engrais.

II. Reconstitution de forêts biologiquement équilibrées

Les études concernant l'évolution des sols et de la végétation forestière, la notion de « *climax* du sol », ont servi de base à l'élaboration des techniques de reconstitution des forêts dégradées. La première idée qui est venue à l'esprit des reboiseurs consistait donc à s'efforcer de reconstituer la forêt climacique primitive, l'évolution progressive du sol devant en résulter tout naturellement ; mais ils se sont heurtés à l'impératif écono-

mique : sur des sols pauvres, une telle forêt n'est pas « rentable » ; force est de s'adresser à des espèces frugales, à croissance rapide même sur un sol pauvre, en l'occurrence à des Résineux : c'est ainsi qu'ont raisonné les forestiers d'il y a 50 ans, qui ont reboisé, en France, de grandes surfaces, à l'aide de peuplements de Résineux, à l'état pur (généralement d'espèces introduites). Dans l'immédiat, les résultats de cette pratique ont été satisfaisants, au point de vue économique ; mais, à longue échéance, ses conséquences ont été une véritable catastrophe : le sol s'est dégradé, la productivité a diminué, les peuplements non équilibrés ont été soumis à la destruction par le feu, les épidémies, etc. . . .

La seule solution valable réside dans une sorte de compromis : il convient de créer un *peuplement mixte*, comprenant un mélange de Résineux et de feuillus, le Résineux constituant l'essence de rapport, le ou les feuillus d'accompagnement étant introduits dans un but purement cultural : celui de reconstituer une ambiance proche de l'ambiance du *climax*, d'activer la vie biologique du sol, en un mot de contrebalancer l'influence néfaste, dégradante du Résineux.

Ce principe étant admis, il faut reconnaître que sa réalisation est loin d'être aisée et les techniques doivent être différentes si le reboiseur se trouve en présence d'une forêt clairiérée, ou au contraire d'un terrain complètement nu, d'une lande par exemple.

1° *Reconstitution d'une forêt dégradée :*

C'est le cas le moins complexe : en effet, l'ambiance forestière y subsiste encore et il faut se garder de la détruire, car elle est précieuse.

La présence de bouquets de feuillus — même dépérissants — permet un « compartimentage » du peuplement, favorable à la conservation du sol : les Résineux sont alors introduits dans les vides ou dans les clairières ; ils bénéficient ainsi d'un abri léger (ou d'un abri latéral, suivant les cas) qui est favorable à leur reprise, à condition qu'on utilise des essences d'ombre ou de demi-ombre : des essences sont facilement introduites, en adoptant la technique de la « coupe d'abri », qui a été mise au point, en France, par Lachaussée et Pourtet.

Lorsque le peuplement est plus âgé, il convient de dégager les cimes des jeunes Résineux, et la technique vise alors à renverser progressivement la succession des « strates » : on introduit le feuillu cette fois en « sous-étage », du peuplement de Résineux.

2° *Le reboisement d'un terrain nu :*

Il est beaucoup plus délicat. En effet, l'équilibre primitif est ici complètement détruit et la dégradation du sol très accentuée ; le nouvel équilibre sol-végétation constitue un « *paraclimax* » assez stable ; il est relativement facile de trouver des Résineux particulièrement frugaux, qui soient adaptés à ces conditions de milieu très défavorables, bien que leur

croissance y soit souvent lente : mais la difficulté est d'y réintroduire les feuillus de la forêt *climax* : leur reprise est aléatoire, leur croissance presque nulle.

Signalons, cependant, l'intérêt essentiel présenté par le Bouleau (*Betula alba*), qui tend à s'installer naturellement sur certaines landes sèches sur podzol, comme Dimbleby l'a démontré, pour les landes du Yorkshire : sous l'influence des peuplements de Bouleau, l'évolution progressive s'amorce ; certaines racines profondes vont puiser les bases, en dessous de l'alios, dans la roche-mère en cours d'altération, et les remontent en surface par les feuilles ; les *Mor* se transforment peu à peu en *Mull*, les horizons bien tranchés du podzol se mélangent à nouveau, grâce au retour progressif des lombrics.

Mais l'usage du Bouleau est encore peu répandu en France : les procédés de son installation par voie artificielle sont actuellement à l'étude ; ne supportant pas l'ombre, il devra être utilisé en bouquets ou en bandes compartimentant le peuplement.

En attendant, on a recours à des espèces telles que les Chênes (Chêne rouge d'Amérique, *Quercus borealis*), les Aulnes, le Châtaignier : mais leur croissance est presque toujours mauvaise, si l'on n'utilise pas d'engrais pour la stimuler, comme nous le verrons ultérieurement.

III. Amélioration des structures par travail du sol

Très rapidement, la nécessité d'« aider la nature », afin d'accélérer et de faciliter l'installation des peuplements artificiels, est apparue : les techniques modernes de travail du sol ont permis d'améliorer considérablement les conditions de « reprise » des plantations et leur croissance initiale ; leur but est double : 1° détruire la végétation concurrente, lande et pelouse, qui a remplacé la forêt ; 2° améliorer les propriétés physiques d'une part, et, souvent même, les propriétés biologiques, en activant les organismes vivants.

Je passerai en revue les trois cas fondamentaux déjà étudiés :

1° *Podzol à « Mor » et à alios :*

Deux problèmes se posent, pour la mise en valeur de ces sols : 1° l'activation de l'humus brut ; 2° l'approfondissement de la partie utile du profil, par la destruction de l'alios, s'il est superficiel.

Un labour profond, à l'aide d'une charrue, n'est pas indiqué, car alors l'humus serait enterré en profondeur et les réserves qu'il contient seraient pratiquement perdues ; le même inconvénient — perte des réserves contenues dans l'humus — résulterait d'un décapage, éliminant cet humus brut : il faut donc se garder d'enlever l'humus brut, mais il convient de *l'activer* biologiquement, afin de mobiliser les réserves abondantes, mais peu assimilables, qu'il contient.

Ce résultat est obtenu par un *travail superficiel* du sol assurant : 1° la destruction de la végétation de la lande ; 2° un mélange, sur une faible profondeur, de l'horizon organique (A_0) avec l'horizon minéral sous-jacent (A_1). Pour les humus suffisamment « actifs », ce travail, effectué à l'aide d'une fraise rotative ou d'une charrue à disques lourde, est extrêmement efficace : on note une augmentation nette de l'activité minéralisante, accompagnée d'une élévation du pH et d'une baisse marquée du rapport C/N. Mais ce procédé est insuffisant, lorsqu'il s'agit d'humus inactifs, pauvres en réserves d'azote et de bases.

Si, en outre, on désire briser l'alios — ce qui est indiqué dans certains cas d'alios très superficiel, non si l'alios est profond — il est indispensable de faire appel à deux instruments différents : une sous-soleuse ou un *rooter*, complétant le travail de surface destiné à améliorer l'humus.

2° *Pelouses sur rendzines :*

Le défaut de ces sols est d'ordre physique plutôt que chimique : ils sont secs et manquent de profondeur ; cette circonstance est aggravée par la concurrence des Graminées.

La technique mise en œuvre fait appel, ici encore, à deux catégories d'outils : 1° une charrue décapeuse à double versoir, permettant de retourner le feutrage des racines et rhizomes des Graminées, sans éliminer les horizons humifères, en raison de l'incorporation parfaite de la matière organique à la matière minérale, dans les rendzines ; 2° une « sous-soleuse », permettant l'approfondissement du sol ; les blocs de pierre sont secouées et plus ou moins ramenées en surface ; la terre fine, au contraire, descend en profondeur et elle est ainsi protégée contre l'insolation et une évaporation excessive : les plants, dont les racines doivent être en contact avec la terre fine, bénéficient d'une meilleure alimentation en eau.

3° *Lande « humide » par pseudogley :*

C'est le cas le plus difficile ; plus encore que dans les cas précédents, il faut se garder d'effectuer un « défoncement » à la charrue, afin de ne pas ramener à la surface l'horizon B*g*, sans structure et très compact.

Dans les landes de l'Ouest, sur « terre lourde », le travail du sol, assez superficiel, à l'aide de fraise rotative ou de charrue à disques particulièrement puissante, donne des résultats favorables : il permet l'introduction par semis du Pin maritime (*Pinus pinaster*), espèce bien adaptée à ces stations et dont la réussite, dans ces conditions, est satisfaisante.

Des recherches sont actuellement en cours, pour déterminer dans quelle mesure le sous-solage de l'horizon B*g* est utile ou non ; il semble être utile dans l'immédiat (il permet alors une meilleure reprise des plants, nettement mieux enracinés), mais défavorable à longue échéance, car la structure ainsi créée est particulièrement instable ; quoi qu'il en soit, ce travail en profondeur, pour être efficace, doit toujours être effectué en période sèche.

Mais ces mesures, si efficaces qu'elles soient, sont très souvent insuffisantes, et il est facile de comprendre pour quelles raisons : la dégradation lente des sols forestiers, dans le domaine atlantique, est toujours accompagnée d'un *appauvrissement chimique*, très progressif, du sol ; cet appauvrissement est lié à deux causes : d'une part, aux phénomènes de lessivage, d'entraînement, des bases notamment, qui précèdent la podzolisation proprement dite ; d'autre part, aux « exportations » d'éléments fertilisants, sous forme de bois exploité pendant des siècles, sans aucune contrepartie ; une forêt exploitée ne vit pas rigoureusement en « circuit fermé », comme une forêt vierge, et le « cycle biologique », défini antérieurement, n'est pas complet ; ces pertes sont particulièrement nocives, si la roche-mère contient insuffisamment de réserves minérales, susceptibles de les compenser par altération lente. Pour ces raisons, le *Mor* atlantique est souvent moins « actif » que le *Mor* boréal : la « podzolisation » atlantique est toujours un phénomène beaucoup plus grave que la podzolisation en climat boréal, j'ai déjà eu l'occasion d'insister sur ce fait.

Plusieurs auteurs ont essayé de chiffrer l'importance de ces pertes pour un peuplement « moyen », sur 1 hectare, pendant 100 ans (Rennie, Mayer – Krapoll, Ehwald). Ils sont arrivés à des résultats concordants : l'exportation due aux exploitations de bois représente en moyenne 1 tonne de calcium, 1 tonne d'azote, 200 à 400 kg de P^2O^5, 200 à 400 kg de K^2O.

Ce déficit s'aggrave considérablement, si le cycle biologique est freiné davantage encore, par des pratiques telles que le fauchage de la couverture vivante, et surtout l'enlèvement de la litière : 50 à 60 kg d'azote par hectare retournent, en effet, annuellement au sol par l'intermédiaire des feuilles et de la litière, sans parler des autres éléments fertilisants.

L'appauvrissement en certains éléments est mis nettement en évidence, d'une part par les analyses de sols, d'autre part par les « analyses foliaires » (pratiquées sur les feuilles des plants en mauvais état de croissance).

Les analyses de sols dégradés montrent souvent un déséquilibre ionique, le potassium échangeable existant alors en plus grande abondance que le calcium échangeable : ceci s'explique par le fait que l'arbre, à l'inverse de la culture, exporte plus de calcium que de potassium (Rennie) ; aussi, les analyses foliaires montrent-elles rarement, en France, des carences en K : celles-ci existent surtout dans les landes du Sud-Ouest, périodiquement fauchées, ce qui cause un déficit en bases, calcium et potassium. Par contre, les plantations d'Épicéa sur *Mor* sont presque toujours carencées en azote, en raison de la lenteur de la minéralisation du *Mor*, qui aboutit à un ralentissement du cycle et à un véritable stockage partiel de cet élément.

Signalons, en passant, que les problèmes qui se posent aux reboiseurs canadiens sont bien différents : ils reboisent, non des forêts dégradées, mais des cultures abandonnées ; pour cette raison, ils ont surtout à lutter

contre des carences en potassium et en magnésium, qui sont plus rares en France (Lafond).

La question qui se pose est alors la suivante : comment le reboiseur peut-il remédier à cet appauvrissement chimique du sol ?

Il convient tout d'abord d'examiner — pour les condamner — certaines pratiques, utilisant de manière trop exclusive un élément déterminé : la chaux (ou les amendements calciques) ; l'azote, sous forme d'ammoniac gazeux injecté dans le sol.

Beaucoup de tentatives ont été faites, en vue d'améliorer les *Mor* à l'aide d'apport massif de chaux, dans le but : 1° de neutraliser l'humus ; 2° d'activer la minéralisation biologique, donc la libération d'azote assimilable. Ces pratiques se sont avérées plus nuisibles qu'utiles, pour de nombreuses raisons : l'optimum biologique de vitalité des Résineux se situe en milieu acide (pH 5 à 5,5), non neutre ; la plupart des mycorhizes se développent mieux en milieu acide ; le chaulage excessif provoque un tassement du sol, une certaine solubilisation de matière organique et, par suite, une aggravation du lessivage et une destruction de la structure ; enfin, si le rapport C/N de l'humus est trop élevé (humus inactif), le chaulage s'avère inopérant, pour activer la minéralisation de l'azote.

L'idée que la carence en azote, dans les humus bruts à C/N élevé, était déterminante, a conduit certains expérimentateurs à traiter ces humus avec l'ammoniac gazeux ; là encore, les résultats ont été décevants ; la matière organique est solubilisée de façon intense ; le traitement donne des résultats inégaux, et l'ammoniac rétrograde rapidement sous forme non échangeable ; enfin, l'humus traité est très défavorable à la croissance des jeunes semis.

La conclusion est la suivante : le sol doit être traité par apport d'une « fumure équilibrée », adaptée aux différents cas et permettant de corriger les carences. D'une façon générale, les éléments qui font défaut sont les suivants : azote – phosphore – calcium ; ce dernier élément devant être apporté, non en vue de « neutraliser » le sol, mais comme aliment pour les plantes ; en aucun cas, le pH ne doit être élevé au-dessus de 5,5. J'insiste sur la nécessité d'un apport initial d'azote assimilable, qui permettra, en donnant un coup de fouet à l'activité biologique, de mobiliser progressivement la grosse réserve d'azote organique, stockée dans l'humus brut ; cet azote complète l'effet favorable : 1° du travail du sol ; 2° d'un chaulage très modéré.

L'apport de potassium doit être également préconisé, dans certains cas particuliers de sols déficients en cet élément, notamment dans des landes périodiquement fauchées.

Ces conclusions s'accordent avec celles formulées par Némec, pour les sols de Bohême, fortement podzolisés par la monoculture de Résineux, et dont il a déjà été question : le chaulage seul s'est avéré totalement insuffisant. Le procédé employé pour la reconstitution de ces sols vise à reformer, non seulement le stock d'éléments fertilisants, mais même le complexe

absorbant, qui a été détruit par la podzolisation ; il consiste à incorporer au sol de la poudre de basalte, compostée avec une matière organique : c'est incontestablement la meilleure méthode (la seule efficace dans les cas graves) ; elle n'offre que l'inconvénient d'être très dispendieuse.

Les méthodes de fertilisation chimique ne s'opposent pas à la méthode biologique, définie antérieurement ; mais, bien au contraire, les deux méthodes se complètent efficacement.

L'apport d'engrais permet, en effet, d'atteindre plusieurs objectifs : il assure aux Résineux une meilleure reprise, une croissance plus rapide ; il accélère l'évolution progressive du sol, par transformation du *Mor* en *Mull*. Mais il vise aussi à permettre l'introduction du feuillu, qui, je l'ai dit au début, est plus exigeant que les Résineux. Inversement, la création d'un peuplement « biologiquement équilibré », c'est-à-dire comprenant une certaine proportion de feuillus, a essentiellement pour effet de favoriser un « cycle » rapide des éléments nutritifs introduits : elle permet donc de limiter l'apport d'engrais, aux phases initiales d'installation des peuplements artificiels ; grâce au cycle favorable ainsi instauré, les éléments introduits sont ensuite constamment remis en circulation ; tout apport tardif d'engrais, généralement peu efficace pour activer la croissance de peuplements déjà âgés, est ainsi évité.

V. Conclusion

En conclusion, il est possible d'affirmer que les trois méthodes préconisées ne s'excluent nullement l'une l'autre ; elles se complètent au contraire et il est nécessaire de les appliquer simultanément.

Jusqu'à une date récente, les forestiers ont pratiqué une sylviculture extensive : son principe était de laisser faire la nature, qu'il fallait seulement guider, orienter . . . L'action du sylviculteur sur le milieu ne s'exerçait que par l'intermédiaire du peuplement : cette méthode était peu sûre et très lente ; si l'on tient compte des nombreux échecs enregistrés, de la perte de temps subie, cette méthode n'est bon marché qu'en apparence, elle est en réalité coûteuse.

Les méthodes de sylviculture intensive, en honneur depuis peu, ont au contraire le vent en poupe ! . . . Sans doute, elles paraissent dispendieuses à un observateur superficiel ; mais il s'agit de dépenses payantes : elles représentent en effet : 1° un gain de temps considérable ; 2° une augmentation de rendement de 10 à 20%, dès la première génération de Résineux (Galoux). Mais le bénéfice le plus important, le plus durable, à savoir la reconstitution de la fertilité à longue échéance du sol forestier, ne peut se traduire par des chiffres !

IX. CARTOGRAPHIE DES SOLS ET DE LA VÉGÉTATION

ÉTUDE DES STATIONS EN MATIÈRE FORESTIÈRE

I. Introduction

Avant d'entreprendre l'étude de la cartographie des stations en matière forestière, il paraît utile de rappeler quelques notions générales, portant sur la cartographie des sols : suivant l'échelle adoptée, son objectif d'une part, la méthode qui préside à sa mise en œuvre d'autre part, seront essentiellement différents.

Les très petites échelles (1/1 000 000e ou 1/500 000e) doivent être réservées aux cartes d'ensemble, à but scientifique et didactique : elles permettent de montrer l'influence des facteurs fondamentaux du milieu : climat général, grandes catégories de roches-mères, sur la pédogénèse.

Les échelles moyennes (1/50 000e à 1/100 000e) permettent de dresser, pour un pays donné, des cartes générales, suffisamment détaillées pour déterminer, de façon pratique, les « vocations » (culture — prairie — forêt) des principaux affleurements, étant bien entendu que les limites doivent être ensuite précisées dans le détail. Ces cartes générales, à échelle moyenne, doivent donc être suffisamment simples, pour utiliser un même mode de représentation des sols, qu'il s'agisse de sols agricoles (plus ou moins transformés par l'homme), ou de sols forestiers, ayant suivi une évolution naturelle ; en conséquence, elles ne représenteront que les grandes familles de sols, sans entrer dans le détail de leur classification.

Au contraire, les cartes à grande échelle (1/5 000e à 1/20 000e) sont destinées à résoudre des problèmes pratiques bien précis : limitées soit à de grands domaines agricoles, soit à des massifs forestiers, elles permettent de renseigner l'agronome ou le forestier sur les meilleures techniques à suivre pour chaque type de sol, plus généralement pour chaque « station » délimitée par la carte.

Le principe de la cartographie à grande échelle devra être alors adapté, de manière plus précise, au problème posé : s'il s'agit d'un problème d'agronomie, il convient surtout de porter l'accent sur les *propriétés physiques* du sol (profondeur, texture, hydromorphie, etc. . . .) et secondaire-

ment sur certaines propriétés chimiques. Si, au contraire, le problème à résoudre est d'ordre forestier, c'est la pédogénèse et le type d'humus, qui doivent en premier lieu être pris en considération, bien qu'il ne faille pas négliger non plus les propriétés physiques et la texture : les cartes de pédologie forestière sont donc souvent plus complexes que les cartes de pédologie agricole, car elles doivent tenir compte d'un ensemble de critères variés. Mais nous verrons que ces critères s'enchaînent mutuellement, ils sont liés par leur interaction, ce qui facilite leur représentation ; en outre, il est toujours possible d'adapter la méthode de cartographie utilisée, au cas particulier étudié : si, par exemple, il n'est pas possible de représenter tous les éléments qui caractérisent les sols, on peut toujours mettre en relief, de préférence, tel ou tel d'entre eux, qui joue un rôle décisif en vue de la solution du problème posé.

II. La cartographie des stations en forêt : le système allemand (*STANDORTSKARTIERUNG*)

Les techniciens allemands ont résolu le problème complexe de la cartographie des stations en forêt, en sériant les difficultés et en poussant très loin le travail analytique. Pour un même massif forestier, une équipe de spécialistes (géologue, pédologue, phytosociologue, sylviculteur) établit en effet 5 cartes différentes : carte géologique, carte des types de texture des sols (*Bodenart*), carte des types pédologiques (*Bodentyp*), carte phytosociologique, carte des stations. La dernière carte, celle des stations, est la plus importante, c'est la carte de synthèse établie par l'ensemble de l'équipe, en s'appuyant sur les données des quatre premières. Le problème est ainsi étudié de façon très complète. Cette méthode, excellente dans son principe, présente cependant quelques inconvénients.

D'abord, elle est très longue à mettre en œuvre et très coûteuse (les pédologues à eux seuls ont en effet à étudier, de manière systématique, 1 à 2 sondages à l'ha). En outre, les limites des types de sols et de végétation, étant établies indépendamment les unes des autres, ne coïncident pas de manière rigoureuse ; en certains points, elles concordent et la liaison entre les deux cartes est manifeste ; l'interprétation est alors aisée ; mais, lorsque les corrélations n'apparaissent pas, on peut se demander si la station doit être définie d'après le sol ou d'après la végétation. Autrement dit, le travail de synthèse final n'est pas exempt d'un certain facteur d'interprétation personnelle et parfois même d'un certain arbitraire. En outre, le passage pour chaque station, de l'étude théorique à la conclusion pratique, est particulièrement délicat ; dans bien des cas, les connaissances actuelles en physiologie des espèces forestières sont encore insuffisantes, pour permettres d'escompter un résultat pratique, qui soit en rapport avec une étude théorique aussi détaillée : celle-ci paraît alors disproportionnée avec le but atteint.

III. Principe de la cartographie des stations utilisé en France

Le système français tend à une simplification des méthodes, permettant un gain de temps considérable. En particulier, le travail initial d'analyse sur le terrain est accéléré dans ce système : chaque spécialiste, dans une discipline donnée — pédologie, phytosociologie, sylviculture (bien souvent, il s'agit d'une seule et même personne !) — s'efforce de tirer parti des renseignements fournis par les autres disciplines : *il existe, en effet, des corrélations entre le peuplement et la végétation forestière d'une part, le milieu et le type de sol d'autre part.* La méthode consiste d'abord à établir soigneusement la nature de ces corrélations, par une reconnaissance détaillée du terrain ; et ensuite, à tirer parti de ces corrélations, pour établir les limites des différentes stations : le pédologue fera ainsi l'économie d'un grand nombre de sondages ; ceux-ci ne seront pas multipliés de manière systématique, mais leur nombre sera juste suffisant, pour permettre de définir en toute sécurité la station et ses principaux aspects.

Cette analyse permet alors de définir, très rapidement, les « types de forêts », qui servent de base à la cartographie des stations. Chaque type de forêt constitue un ensemble qui caractérise une station donnée, car il synthétise à la fois les *conditions de milieu* (climat général, sol, topographie, climat local) et les *conditions de végétation* (état du peuplement, groupements végétaux). Nous passerons en revue quelques exemples de corrélations, caractéristiques de certains types de forêts.

1° *Corrélations sol-peuplement :*

De telles corrélations existent entre les propriétés fondamentales du sol et la nature des essences qui poussent sur le sol : la répartition des espèces d'arbres, exigeantes ou frugales, hygrophiles on xérophiles, etc. . . . donne donc des renseignements précieux au cartographe. Il peut aussi tirer parti des relations visibles entre les qualités du sol et l'aspect, la vitalité, d'une certaine essence : ainsi la hauteur du fût — elle-même proportionnelle au rendement en volume — donne une idée de la fertilité de la station.

2° *Corrélation sol-végétation :*

La Station de recherches de l'École des eaux et forêts utilise le système des « groupes écologiques », c'est-à-dire des groupes de plantes présentant sensiblement les mêmes exigences écologiques, dans un secteur climatique donné. Ces groupes écologiques traduisent très bien : 1° les conditions de micro-climat du sol et l'économie de l'eau ; 2° la richesse chimique, notamment en azote assimilable et en bases.

Mais il convient de se souvenir que le « type d'humus » est lui-même la résultante de ces différents facteurs, qu'il résume et intègre, au même titre

que les groupes écologiques : il est donc relativement simple d'établir une corrélation entre ces groupes écologiques et les types d'humus.

3° *Corrélation sol-topographie :*

Ces corrélations résultant de l'action « directe » de la pente, qui donne naissance aux « chaînes de sol » (*catenas*) : ainsi, au sommet des pentes, on trouve des sols plus superficiels, moins évolués que ceux qui se trouvent au bas des pentes.

Elles sont également la conséquence de l'action indirecte du relief, qui influence l'exposition, donc le climat local : par exemple, les sols des versants exposés au sud sont différents des sols exposés au nord.

IV. Les difficultés du système « simplifié »

Il ne faut pas se dissimuler cependant que les difficultés de ce système son nombreuses ; et si l'on n'y portait pas attention, elles pourraient occasionner de graves erreurs ; il existe, en effet, des exceptions aux règles de « corrélations », qui viennent d'être exposées. Ces exceptions sont de deux ordres :

1° *Différences de sols ne se traduisent pas par des différences de végétation :*

Certaines forêts dégradées sont caractérisées par une uniformisation de la végétation herbacée, qui ne traduit plus de façon satisfaisante les différences de stations : les espèces sociales, peu nombreuses et représentées par un grand nombre d'individus, envahissent le sol, d'une façon parfois trop uniforme : ainsi, une pente d'un affleurement de roche acide pourra être caractérisée, du haut en bas, par une Chênaie dégradée, avec un tapis continu de *Deschampsia flexuosa* : cette uniformité s'explique évidemment par la constance relative du type d'humus (*Moder*), mais la profondeur et le degré d'évolution du sol ne sont pas identiques du haut en bas de la pente : sans doute, lorsqu'il y a un peuplement forestier, la différence de vitalité des arbres, l'élongation des fûts donnent des renseignements utiles. Mais, s'il s'agit d'un terrain nu à reboiser, on conçoit que le cartographe ne parvienne pas à délimiter les stations, par le seul examen de la végétation qui couvre le sol, lorsque celle-ci est peu variée.

2° *Différences dans le peuplement ou la végétation, qui ne traduisent pas des différences profondes du sol :*

Cette difficulté n'existe pas dans les pays neufs comme le Canada ; elle est, au contraire, particulièrement grave, dans les pays où l'intervention ancienne de l'homme a modifié les équilibres sol-végétation, depuis des siècles. Deux cas sont à envisager, suivant que la rupture de cet équilibre

provoquée par l'homme se répercute profondément ou non sur les potentialités du sol.

Si le sol a été fortement « dégradé » par des modifications très profondes et très anciennes de l'ambiance forestière, dans ce cas cette évolution régressive peut aboutir, comme nous l'avons vu tout au long des chapitres précédents, à un nouvel équilibre, suffisamment stable et durable, pour qu'il soit cartographié ; il doit l'être avec d'autant plus de précision que, le plus souvent, le problème de la reconstitution de ces sols dégradés se pose précisément à l'aménagiste.

Mais, bien souvent, ce dernier se trouvera en présence de modifications relativement récentes du peuplement, sur un sol « stable », qui par conséquent n'a pas subi de dégradation profonde.

Par exemple, les coupes rases de forêt résineuse en montagne aboutissent à l'apparition d'un groupe écologique essentiellement transitoire, le groupe à « Hautes herbes nitratophiles » (*Rubus idæus, Epilobium spicatum*, etc. . . .) : le sol n'est pas modifié de façon profonde, seul l'humus a évolué de façon temporaire.

Autre exemple : le mode de traitement peut modifier, de manière complète, l'aspect et la composition des peuplements, sans provoquer la moindre transformation du sol ; ainsi, dans l'Est de la France, le traitement en futaie favorise la Hêtraie (et son cortège d'espèce ombrophiles), alors que le traitement en taillis-sous-futaie provoque l'installation de la Chênaie à Charme (accompagnée d'espèces plus xérophiles et héliophiles), le Hêtre étant alors éliminé.

Dans ces conditions, il convient de discerner si les modifications de végétation ou de peuplement, observées d'une station à l'autre, sont imputables à l'action humaine, ou aux propriétés du sol. La cartographie devient plus délicate : dans certains massifs, où l'action humaine a été particulièrement intense, il convient parfois de dresser deux cartes différentes : une carte des peuplements et une carte des sols. Le travail est évidemment beaucoup plus long et difficile : mais en contrepartie, la comparaison de types de peuplements variés, croissant sur un même sol, donnera à l'aménagiste et au sylviculteur beaucoup de renseignements pratiques.

V. Conclusion : utilité pratique de la cartographie des stations

L'intérêt pratique de la cartographie des stations saute aux yeux, lorsqu'il s'agit de déterminer le choix des techniques et des essences, en vue d'un reboisement : pour s'en convaincre, il suffit de se rappeler les conclusions du chapitre précédent.

Mais, cet intérêt pratique est moins évident, lorsque l'étude des stations doit servir de base à l'*aménagement* de forêts existantes, en plus ou moins bon état : pour le démontrer, nous étudierons sommairement deux exemples, pris l'un en forêt feuillue, l'autre en forêt résineuse.

1° *Forêt feuillue : forêt de Moulières (Vienne)*

L'ensemble de la forêt est une Chênaie « atlantique », présentant des degrés de dégradation variables, vers la lande humide à *pseudogley*.

Les stations reconnues et cartographiées sont les suivantes :

I — Chênaie à *Mull* ; Chênaie en bon état de végétation, sur sol lessivé faiblement marmorisé ; mais ce même type de forêt existe aussi sur un sol bien différent, le *pseudogley* de profondeur moyenne (il représente alors un stade progressif : type I *bis*) ;

II — Chênaie dégradée à Molinie (*Molonia cærulea*), sur *pseudogley* « moyen » : stade régressif, passant à la lande à Molinie ;

III — Lande à Molinie et à Brande (*Erica scoparia*), sur *pseudogley* superficiel : stade ultime de la dégradation, observé sur les roches-mères les moins filtrantes ;

IV — Chênaie dégradée ou Pineraie, sur sol sableux ou caillouteux (podzol) : stade régressif passant à la lande sèche ; le sol étant un podzol.

L'étude des sols a permis de dégager les conclusions pratiques suivantes : La comparaison des types I *bis* et II montre qu'à ce stade intermédiaire, le retour à la Chênaie est parfaitement possible, le Chêne pouvant enfoncer ses racines de façon satisfaisante dans des sols à *pseudogley*, de profondeur moyenne. Au contraire, le sol du type III est trop dégradé, pour que le retour à la Chênaie soit possible : c'est le reboisement à l'aide du Pin maritime (*Pinus pinaster*) qui s'impose, sur ces *pseudogley* très superficiels et très compacts.

L'étude de certains peuplements montre également que le Chêne n'offre aucun avenir dans les stations du type IV, qui, elles aussi, doivent être vouées à une substitution d'essence ; mais, dans ces stations drainées, il conviendra de faire appel au Pin laricio de Corse (*P. laricio corsicana*), plutôt qu'au Pin maritime.

Le détail des techniques à adopter pour chaque station est explicité conformément aux règles exposées dans le précédent chapitre.

2° *Forêt résineuse : Sapinière du Ban d'Étival (Vosges) :*

L'étude écologique de cette petite forêt « pilote » de 150 ha, sur grès vosgien, a permis de définir les types de Sapinière suivants :

I — Sapinière à Hêtre (type hygrophile), sur sol brun à *Mull* ;

II — Sapinière pure, à Mousses et à *Vaccinium myrtillus*, sur sol podzolique à *Moder* ou *Mor* peu épais ; suivant l'exposition et la teneur en argile de la roche-mère, ce type est subdivisé en trois sous-types : II*a* hygrophile, II*b* mésophile, II*c* xérophile.

III — Sapinière-Pineraie, à *Calluna vulgaris* (type très xérophile), sur podzol à alios et à *Mor* épais.

Les renseignements pratiques qui ont été tirés de cette étude sont multiples ; ils ont porté sur les points suivants :

1° Chaque type offre une « productivité » bien déterminée ; ce qui permet d'établir, par simple mesure des surfaces occupées par les différents types, la « possibilité » en volume de la forêt.

Ainsi, le type I offre la productivité maxima : 9 m^3 par hectare et par an ; le type II*a* et *b* produit encore 6 à 7 m^3 ; alors que le type II*c* ne rend plus que 5 m^3 par hectare et par an, le type III environ 3 m^3.

Cette productivité pourra être améliorée pour le type I, qui comprend du Hêtre, à la proportion excessive de 50% ; cette proportion trop élevée aboutit à une diminution de rendement en volume et plus encore en argent ; on peut espérer augmenter la production globale jusqu'à 11 m^3, en abaissant la proportion de Hêtre à 10 à 20%, suffisante pour le maintien de l'équilibre biologique de la forêt. Inversement, la proportion de feuillu est nettement insuffisante, dans les types II et à plus forte raison III.

2° Les techniques de la régénération naturelle doivent être adaptées à la station : la régénération du Sapin réussit plus mal sur les *Mull* que sur les *Moder*, ce qui explique l'invasion du Hêtre dans le type I. La technique consiste à ouvrir plus brutalement le peuplement, ce qui provoque une disparition (momentanée) de la flore du *Mull*, et un tassement des horizons humifères, propice à l'installation des semis de Sapin. Bien entendu, cette technique doit être pratiquée avec prudence et ne doit pas être poussée trop loin : il convient de revenir très rapidement à un peuplement fermé, permettant la reconstitution du *Mull*, qui assure à la station sa productivité maxima.

La régénération naturelle est satisfaisante dans les types II*a* et *b*, mauvaise dans les types II*c* et III, par suite d'un excès de sécheresse. Il convient de maintenir au maximum le couvert dans ces stations et d'introduire, à bref délai, un feuillu en mélange avec le Résineux : un compartimentage du peuplement, à l'aide de bouquets ou de bandes de Bouleaux serait souhaitable.

C'est évidemment dans les pays neufs, comme le Canada, où la surface de la forêt est immense, en regard de la population, que cette méthode s'impose de manière particulièrement efficace : mis en pratique dans votre pays par d'éminents spécialistes, elle y a fait largement ses preuves.

Son application est certainement plus délicate, plus sujette à caution, dans les pays très peuplés, à sylviculture ancienne ; cependant, les exemples étudiés montrent qu'elle est d'ores et déjà susceptible de rendre de très grands services ; en outre, il ne faut pas oublier que cette méthode ne manquera pas de se perfectionner, à mesure que les incessants progrès scientifiques et techniques permettront d'en élargir les applications : dès maintenant, on peut prévoir qu'elle est appelée à servir de base à la sylviculture, dans un très proche avenir.

DYNAMICS OF FOREST SOILS UNDER THE ATLANTIC CLIMATE

SUMMARY

In a series of lectures given at the Faculty of Surveying and Forest Engineering of Laval University under the auspices of l'*Institut scientifique franco-canadien,* the Author has endeavoured to deal anew with certain chapters of his book on pedology published at Nancy in 1956, and to summarize the most recent results obtained in this field by European researchers.

I. The first lecture deals with fundamental principles of the classification of humus types and discusses their basic characteristics in the light of the latest results obtained by French, German and Russian research workers.

II. The forest is characterized by the cycle of nutrients which it takes from the soil and largely returns to it. This cycle is more or less rapid according to the humus type, and it is influenced by external factors and by the physico-chemical nature of the litter.

III. To a given climax forest corresponds a stable soil which, being in equilibrium with the climate and the vegetation is called a pedoclimax. Its upper horizon possesses similar properties, whatever the type of its parent material. However, under human influence, this soil may undergo degradation and form very different types according to the nature of the parent material.

IV. The northern podzol is a climax in opposition to the atlantic podzol which is a degraded soil, each type exhibiting different properties. In the plains of western France, podzolisation follows a clay and iron leaching phase, whereas, under a northern climate and on mountain slopes, podzolisation proceeds directly from the parent material or from poorly developed brown earth.

V. Field investigations and laboratory experiments have demonstrated that leaching and podzolisation are two entirely different physico-chemical phenomena. A rational pedogenetic classification should clearly distinguish between these two processes of soil formation.

VI. On fissured calcereous parent material, the presence of a layer of decalcification clay or « terra fusca », induces the formation of good forest soils of the calcareous brown type. Under human influence, the forest regresses into a shrub association, or, upon rendzina, into a grass association.

VII. The brown forest soils formed upon compact and impervious clay or loam are « marmorized » in depth. They are degraded into either very humid or dry pseudogleys which differ from the true gley soils.

VIII. Successful reforestoration of degraded soils can be obtained only by the simultaneous application of the three following methods :

1. Improvement of the physical properties and elimination of plant competition through the use of disk-harrows or rooters ;
2. Improvement of the nutrient level through fertilization after careful soil and leaf analyses ;
3. Creation of biologically stable stands.

IX. Site type mapping as a basis to forest management is of the greatest practical interest. It should be preceeded by a study of the relations between the stand, the natural vegetation and the soil, leading to the synthetic concept of forest types which is the basis of site type mapping.

DIE DYNAMIK DES WALDBODENS UNTER ATLANTISCHEN KLIMAVERHALTNISSEN

ZUSSAMMENFASSUNG

In mehrerem Vorlesungen über Bodenkunde, die im September und Oktober 1958 in der Hochschule für Feldmess- und Waldkunde (Faculté d'arpentage et de génie forestier) gehalten wurden, bemühte sich der Verfasser, die 1956 in Nancy veröffentlichte Abhandlung über Bodenkunde zu ergänzen ; dabei gab er eine Gesamtübersicht über die neuesten Forscherarbeiten, die in den verschiedenen Ländern Europas auf diesem Gebiet durchgeführt wurden.

Folgende Grundgedanken wurden in den neun Vorlesungen erörtert :

I. — Die erste Vorlesung gibt die Grundlage zu einer Klassifizierung der Humustypen an und bringt deren Haupteigenschaften in Erinnerung, unter Berücksichtigung der letzten in Frankreich, Deutschland und Russland erfolgten Versuchen.

II. — Der Wald ist durch einen Nährstoffkreislauf gekennzeichnet : er stattet dem Boden den grössten Teil der entnommenen Elemente zurück. Dieser Kreislauf verläuft mehr oder weniger rasch je nach den Humustypen : das Einwirken der äusseren Verhältnisse und die physikalisch- chemische Beschaffenheit der Abfallsubstanz bedingen ihn.

III. — Einer gegebenen Waldklimax entspricht ein sich gleichbleibender Boden, im Gleichgewicht mit dem Klima und der Vegetation, den man Bodenklimax nennt ; sein oberflächlicher Horizont weist ähnliche Eigenschaften auf, welches der Typ des Muttergesteins sei. Unter Einwirkung der Menschen degradiert sich jedoch dieser Boden und gibt einen je nach dem Muttergestein sehr verschiedenen Bodentyp.

IV — Der nördliche Podsolboden ist eine Klimax, im Gegensatz zu dem atlantischen Podsolboden, der ein degradierter Boden ist : diese beiden Bodentypen weisen verschiedene Eigenschaften auf ; in den Westebenen Frankreichs geht der Podsolierung eine Ton- und Eisenauswaschungsphase voraus, während sie im nördlichen Klima und auf den

Bergabhängen das Muttergestein oder eine wenig entwickelte Braunerde sofort in Angriff nimmt.

V. — Auswaschung und Podsolierung sind ganz und gar verschiedene physikalisch-chemische Vorgänge, wie es sowohl die Untersuchungen auf dem Gelände als auch die Forschungen im Laboratorium nachweisen ; eine genetisch rationelle Klassifizierung muss diese beiden Prozesse in der Bodenbildung klar unterscheiden.

VI. — Auf dem spaltigen Kalkgestein ermöglicht das Vorhandensein einer Schicht Entkalkungston oder « Terra fusca » die Bildung guter Waldböden, vom Kalkbraunerdetyp : unter menschlicher Einwirkung degradiert sich der Wald zu einer Strauchgesellschaft oder einer Rasengesellschaft über Rendzina.

VII. — Die Waldbraunerden, die sich auf verdichtetem und undurchdringlichem Ton und Lehm gebildet haben, sind in der Tiefe « marmorisiert », sie degradieren sich zu bald vernässerten bald trockenen « Pseudogley », die sich von den echten Gley unterscheiden.

VIII. — Die Wiederbepflanzung auf degradiertem Boden kann nur durch Verknüpfung dreier Methoden gelingen :

1. Verbesserung der physikalischen Eigenschaften und Ausscheidung des Pflanzenwettbewerbs, durch Bearbeitung des Bodens ;
2. Chemische Verbesserung durch Hinzufuhr von Düngemitteln, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Boden- und Blattanalyse ;
3. Erschaffung im biologischen Gleichgewicht stehender Bestände.

IX. — Die Standortskartierung als Grundlage zur Forsteinrichtung ist von grossem praktischen Interesse : sie wird durch das vorhergehende Studium der Verbindungen zwischen Bestand, Vegetation und Bodentyp erleichtert ; daraus entsteht der synthetische Begriff von « Waldtypen », welcher dieser Standortskartierung als Grundlage dient.

BIBLIOGRAPHIE DES TRAVAUX CITÉS

ANSTETT, A. Considérations nouvelles sur les substances humiques. *Bull. Ass. franç. Étude du sol,* janvier 1953.

AUBERT, G., et DUCHAUFOUR, Ph. Projet de classification des sols. *6e Congrès intern. Sc. du sol,* Paris, 1956.

AVERY, B. W. A sequence of beechwood soils on the Chiltern Hills, England. *Journal of Soil Sci.,* vol. 9, n° 2, septembre 1958, pp. 210-224.

BERNIER, B. The production of polysaccharides by fungi active in the decomposition of wood and forest litter. *Can. J. Microbiol.,* 4, 1958, pp. 195-204.

BETREMIEUX, R. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agr.,* 3, 1951, pp. 193-295.

BLOOMFIELD, C. Translocation of iron in podzol formation. *Nature Land,* 170, 1952.

BLOOMFIELD, C. Le déplacement des sesquioxydes et de l'argile dans les sols. *African Soils,* 4, vol. III, octobre-décembre 1955, pp. 488-506.

DE LONG, W. A., et SCHNITZER, M. Investigations on the mobilization and transport of iron in forested soils : I. The capacities of leaf extracts and leachates to react with iron. II. The nature of the reaction of leaf extracts and leachates with iron. *Soil Sct. Soc. of Amer. Proc.,* vol. 19, n° 3, juillet 1955, pp. 360-363 et 363-368.

DIMBLEBY, G. W. Soil regeneration in the north-east Yorkshire Moors. *Jour. of Ecology,* vol. 4, n° 2, 1952, pp. 332-341.

DIMBLEBY, G. W. The root sap of Birch on a podzol. *Plant and Soil,* n° 2, juin 1952, pp. 141-153.

DUCHAUFOUR, Ph. Pédologie. Applications forestières et agricoles. Éd. École nationale des eaux et forêts, Nancy, 1956, 310 pp.

DUCHAUFOUR, Ph. Pédologie. Tableaux descriptifs et analytiques des sols. Éd. École nationale des eaux et forêts, Nancy, 1957, 87 pp.

DUCHAUFOUR, Ph. L'action des divers types d'humus sur les processus d'entraînement dans le sol forestier. *Rev. for. franç.,* n° 12, déc. 1957, pp. 887-897.

DUCHAUFOUR, Ph. Sur la neutralisation des humus acides de forêt par la chaux ou par le gaz ammoniac. *Bull. Soc. franç. Étude du Sol,* fév. 1958, pp. 58-66.

DUCHAUFOUR, Ph. L'utilisation des engrais en forêt. *Rev. for. franç.,* n° 6, juin 1958, pp. 377-392.

DUCHAUFOUR, Ph., et MANGENOT, F. Recherches sur l'évolution expérimentale de certains humus. *Ann. agri.,* n° 2, 1956, pp. 159-181.

DUCHAUFOUR, Ph., et MANGENOT, F. Recherches sur l'évolution expérimentale de certains humus. II. Humification biologique et abiologique. *Ann. agr.,* n° 4, 1957, pp. 573-583.

DUCHAUFOUR, Ph., MILOT, G., MICHAUD, R. Étude des éléments fins de quelques types de sol de climat atlantique. *Ann. Géologie appliquée et Prospection minière,* t. III, 1950, pp. 31-62.

DUCHAUFOUR, Ph., PARDÉ, J., JACAMON, M., et DEBAZAC, E. Un exemple d'utilisation pratique de la cartographie des stations : la forêt du Ban d'Étival (Vosges). *Rev. for. franç.,* n° 10, octobre 1958, pp. 597-630.

EHWALD, E. Über einige Probleme der forstlichen Humusforschung insbesondere die Entstehung und die Einteilung der Waldhumusformen. *Sitzungsberichte der deutsch. Acad. Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin,* t. V. n° 12, 1946, 44 pp.

EHWALD, E. Über den Nährstoffkreislauf des Waldes *Sitzungsberichte der deutsch. Akad. Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin*, t. VI, n° 1, 1957, 56 pp.

FINK Carte des sols d'Autriche.

FLAIG, W. Zur Chemie der Huminsäuren und deren Modellsubstanzen. *6e Congrès intern. Sc. du sol*, Paris, 1956, II, 10, pp. 471-478.

FLAIG, W., SCHOBINGER, U., et STEINMETZ, A. Über die Bildung der Huminstoffe. *Landb.-Forsch.*, 7, 1957, pp. 78-80.

FLICHE. La Champagne crayeuse, étude de géographie botanique. *Mémoires de la Société académique de l'Aube*, LXXII, 1908.

FRANZ, H. Die Verschmelzung von Bodenkunde und Okologie in der wissenschaftlichen Erfassung des Gesamtstandortes. *Angewandte Pflanzensoziologie*, I, 1954, pp. 255-273.

FRIDLAND, V. M. The problems of podzolization and illimerization (en russe). *Pochvovedenie*, n° 1, 1958, pp. 27-38.

GALOUX, A. La Chênaie sessiliflore de Haute Campine. Essai de biosociologie. Station Recher. Grœnendaal, 1954, 235 pp.

GALOUX, A. La fertilisation minérale en sylviculture. Impr. J. de Clercq, rue Fernand-Pire, 22, Jette, 1954, 62 pp.

HARTMANN, F. Forstökologie. G. Fromme, Vienne, 1952, 460 pp.

IARKOV, S. P. Dynamique saisonnière de certains processus dans les sols. *6e Congrès intern. Sc. du Sol*, Paris, 1956, V, 66, pp. 401-405.

KOHL, F. Durchwaschungs- und Durchschlämmungserscheinungen an Böden aus Bayern. *Zeitsch. f. Pflanzenernähr. Düng., Bodenkunde*, 80, 3, 1958, pp. 237-244.

KONONOWA, M. M., et ALEXANDROVA, I. V. La biochimie des processus de formation des matières humiques (en russe). *6e Congrès intern. Sc. du sol*, Paris, 1956, III, 22, pp. 133-137.

KRAUSS, G. Die sogennanten Bodenerkrankungen. *Jahresbericht der D. Forstvereins*, 1928, p. 121.

KUBIENA, W. L. The soils of Europe, illustrated diagnosis and systematics. Edit. anglaise : Thomas Murby, Londres, 1953.

KUNDLER, P. Zur Charakterisierung und Systematik der Braunen Waldböden. *Zeitsch. f. Pflanzenernähr. Düng., Bodenkunde*, 78, 2/3, 1957, pp. 209-232.

LAATSCH, W., HOOPS, L., et BAUER, I. Über Huminsäuren mit Aminostickstoff. *Zeitsch. f. Pflanzenernähr. Düng., Bodenkunde*, 53, 1, 1951, pp. 20-29.

LAATSCH, W., HOOPS, L., et BIENECK. Über Huminsäuren des Pilzes *Spicaria elegans*. *Zeitsch. f. Pflanzenernähr. Düng., Bodenkunde*, 58, 3, 1952, pp. 258-268.

LACHAUSSÉE. Conversion du tailis-sous-futaie du premier plateau du Jura en futaie mélangé de Sapin pectiné et Hêtre. Paris, 1931.

LAFOND, A. La conservation de l'humus. *C. R. de l'Ass. can. de conservation*, 1952, pp. 23-30.

LAFOND, A. Les déficiences en potassium et magnésium de quelques plantations de *Pinus strobus*, *Pinus resinosa* et *Picea glauca* dans la province de Québec. *Contribution n° 1, Fonds Rech. for. Univ. Laval*, Québec, 1958, 24 pp.

LAURENT. La végétation de la Champagne crayeuse. T. 1er, Paris, 1921.

LEMÉE, G., LOSSAINT, P., METTAUER, H., et WEISSBECKER, R. Recherches préliminaires sur les caractères bio-chimiques de l'humus dans quelques groupements forestiers de la plaine d'Alsace. *Angewandte Pflanzensoziologie*, n° 15, 1958, pp. 93-101.

LOSSAINT, P. Étude comparative de la solubilisation des oxydes de fer d'un sol par lex extraits aqueux stériles de litières forestières. *C. R. Ac. Sc.*, t. 242, fév. 1956, pp. 1052,1054.

LOSSAINT, P. Sur le pouvoir complexant vis-à-vis du fer ferrique et du fer ferreux des extraits de quelques litières forestières fraîches et décomposées. *C. R. Ac. Sc.*, t. 247, juillet 1958, pp. 106-109.

LUDI, W. Besiedlung und Vegetations entwicklung auf den jungen Seitenmoränen des grossen Aletschgletschers. Inst. Rübel, Zurich, 1945, 77 pp.

MANIL, G., COLLIN, E., ÉVRARD, R., et GRUBER, R. Les sols forestiers de l'Ardenne — Le plateau de Saint-Hubert Nassogne (1re étude) — 1re partie : Étude pédologique. *Bull. Inst. agron, de Gembloux*, n° 3-4, 1953, pp. 43-68.

MAYER-KRAPOLL, H. Nährstoffversorgung und Normaldungung bei landwirtschaftlichen und forstlichen Boden. *Allgemeine Forstzeitschrift*, n° 10, mars 1958, pp. 137-138.

MÜCKENHAUSEN, E. Die Beurteilung des Faktors Wasser bei der bodenkundlichen Kartierrung. *Forstarchiv.*, 12, 1954, pp. 269-273.

NEMEC, A. The improvement of stunted forest stands on ortstein podzols by covering the soil with heather and fertilizing with a basic rock. *Prace vyzkum. Ust. lesn.* CSR 4, 1954, pp. 5-34. (en tchèque).

PALLMANN, H., RICHARD, F., et BACH, R. Über die Zusammenarbeit von Bodenkunde und Pflanzensoziologie. *10e Congrès Union intern. Inst. rech. forest.*, 1949, pp. 57-95.

PÉCROT, A., et AVRIL, P. Les sols ardennais — Étude morphologique et génétique des sols bruns acides et des sols podzoliques de Saint-Hubert. *Bull. Inst. agron. de Gembloux*, t. XXII, nos 1-2, 1954.

POURTET, J. Les repeuplements artificiels. Éd. École nationale des eaux et forêts, Nancy, 1951, 242 pp.

RENNIE, P. J. Uptake of nutrients by mature forest growth. *Plant and Soils*, VII, n° 1, novembre 1955, pp. 49-95.

RÜHL, A. Eine Auswertung von Streuanalysen aus norddeutschen Mittelgebirgen. *Forstw. Centralblatt*, 11/12, novembre-décembre 1957, pp. 364-376.

SCHEFFER, F. Humus und dessen Bildung durch die Mikroorganismen. *6e Congrès intern. microbiologie*, septembre 1953, p. 141-142.

SCHEFFER, F., et WELTE, E. Probleme der Humusforschung. *Die Naturwissenschafter*, 14, 1950, pp. 321-329.

SCHNITZER, M. Mobilization of iron in podzol soils by aqueous leaf extracts. *Chem. & Ind.*, n° 49, 1954.

SPRINGER, U. Der heutige Stand der Humusuntersuchungsmethodik mit besonderer Berücksichtigung der Trennung, Bestimmung und Charakterisierung der Huminsäuretypen und ihre Anwendung auf charakteristische Humusformen. *Zeitsch. f. Pflanzenernähr. Düng., Bodenkunde*, t. 6, 1958, pp. 312-373.

SPRINGER, U. Humus und Bodenfruchtbarkeit. *Zeitsch. f. Pflanzenbau u. Pflanzenschutz*, 1952, pp. 58-63.

TAMM, O. Studier over jordmanstyper och deras forhallande till markens hydrologi i nordsvenska skogsterranger. *Medd. fr. statens skogsforsoksant.*, 26, Stockholm, 1930-31, pp. 163-408.

TIURIN, I. V. Vers une méthode d'analyse pour l'étude comparative des constituants de l'humus du sol. *Trav. de l'Inst. des sols Dokutchaiev*, t. XXXVIII, 1951, 32 pp. (en russe).

WILDE, S. A. Forest soils. Their properties and relation to silviculture. Ronald Press Co., New-York, 1958, 537 pp.

WITTICH, W. Der heutige Stand unseres Wissens vom Humus und neue Wege zur Lösung des Rohhumusproblems im Walde. *Schriftenreihe der forst.* Fakultät der Univ. Göttingen. J. D. Sauerlander's Verlag, Frankfurt a/Main, vol. 4, 1952, 106 pp.

ZÖTTL, H. Die Bestimmung der Stickstoffmineralisation im Waldhumus durch den Brutversuch. *Zeitsch. f. Pflanzenernähr. Düng., Bodenkunde*, 81, 1, 1958, pp. 35-50.

IMPRIMÉ AU CANADA
PRINTED IN CANADA