



HAL
open science

Humus actif et Humus inerte - Recherches expérimentales sur la minéralisation de l'humus forestier

Philippe Duchaufour

► **To cite this version:**

Philippe Duchaufour. Humus actif et Humus inerte - Recherches expérimentales sur la minéralisation de l'humus forestier. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences Forestières*, 1953, 13 (2), pp.401-454. hal-03483729

HAL Id: hal-03483729

<https://hal.science/hal-03483729>

Submitted on 16 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HUMUS ACTIF ET HUMUS INERTE

Recherches expérimentales
sur la minéralisation de l'humus forestier

PAR

Ph. DUCHAUFOUR

Docteur ès Sciences
Ingénieur des Eaux et Forêts

AVANT-PROPOS

La matière organique constitue l'élément fondamental du sol forestier, celui qui conditionne non seulement la nutrition azotée et aussi la nutrition minérale (CHAMINADE, 1952) des arbres, mais encore l'évolution pédologique future: l'*Humus calcique* donne aux rendzines leurs propriétés essentielles, le *Mull* caractérise le sol brun lessivé, enfin le *Mor* est l'agent actif de la podzolisation. En ce sens, on peut dire qu'une connaissance approfondie de l'humus et de ses propriétés est la clé de la pédologie forestière.

Malheureusement, l'humus est un mélange extraordinairement complexe d'éléments organiques très variés et mal définis; une multitude de microorganismes concourent à sa formation ou à sa destruction; leur identification est encore incomplète et leur rôle respectif, le plus souvent, très mal connu. Une étude détaillée de la microbiologie du sol devrait donc être le complément de l'analyse précise des complexes organiques formés, au cours de la transformation de l'humus. Mais avant d'entreprendre une œuvre aussi considérable — qui ne pourra être menée à bien que par un travail en équipe, poursuivi avec des moyens d'investigations très puissants — il paraissait possible de mettre en évidence, par des méthodes simples, le *résultat global de l'activité microbienne sur l'humus, placé dans des conditions de milieu très précises*; c'est ce que nous avons essayé de réaliser par des expériences poursuivies simultanément au laboratoire et sur le terrain. Sans doute, de telles recherches ne paraissent pas susceptibles de projeter une lumière nouvelle sur les processus chimiques et biologiques intimes, qui président à l'évolution de la matière organique; peut-être pourront-elles néanmoins donner des *informations d'ordre pratique*, à ceux qui s'intéressent à l'évolution du sol forestier, en particulier aux sylviculteurs et aux reboiseurs: c'est le but que nous nous sommes proposé.

Je tiens à remercier ici tous ceux qui m'ont aidé, avec le plus parfait désintéressement et la plus grande complaisance, dans l'accomplissement de cette tâche: M. DROUINEAU, Directeur du laboratoire agronomique d'Antibes, et M. BARBIER, Directeur de laboratoire à la Station centrale d'Agronomie, m'ont donné d'utiles conseils pour la poursuite des expériences de minéralisation au

laboratoire. MM. les Ingénieurs des Eaux et Forêts GUINAUDEAU, Chef de l'annexe de la Station de Recherches de Bordeaux, et PRAX, Chef de service à Béziers, ont bien voulu participer aux recherches sur l'incinération de l'humus et effectuer des prélèvements, en temps voulu. Enfin, je n'oublie pas mes camarades de la Station de Recherches de Nancy, MM. FOURCHY et VENET, qui m'ont donné de multiples renseignements et fréquemment accompagné en tournée. D'autre part, j'ai trouvé, auprès des secrétaire et aides-techniques de mon laboratoire, un dévouement et un esprit de collaboration particulièrement précieux.

Ph. D.

I. — INTRODUCTION: DEFINITIONS ET METHODES

1° Tests de l'activité de l'humus

Les débris végétaux de toute nature, feuilles, rameaux, etc. ... qui tombent sur le sol forestier, sont plus ou moins rapidement décomposés par l'activité biologique: sous son influence, la matière organique fraîche se transforme progressivement et elle donne naissance, d'une part, à des éléments minéraux solubles ou gazeux, tels que l'ammoniaque, l'acide nitrique, le gaz carbonique — c'est le phénomène de *minéralisation* — d'autre part, à des complexes colloïdaux (complexes humiques, humus au sens strict), qui semblent plus résistants à l'action microbienne que la matière organique fraîche: ils se minéralisent à leur tour, mais plus lentement.

Cette *minéralisation* de la matière organique dépend essentiellement de son activité biologique. S'il est possible de mesurer, d'une façon ou d'une autre, *sa vitesse*, on aura une idée précise de l'activité de l'humus: on peut, dans ce but, recourir à plusieurs procédés:

a) *L'observation simple* de l'épaisseur et de l'aspect des horizons humiques, complétée par le dosage de la matière organique totale (par l'intermédiaire de celui du carbone organique, méthode ANNE, 1945), donne des renseignements très utiles, quoique incomplets: il est classique d'opposer le MOR (humus brut) à minéralisation lente, au MULL (humus doux), à minéralisation rapide (MULLER, 1880; ROMMEL, 1935). Dans le cas du MOR, les étapes de la transformation de la matière organique sont nettement visibles sur le profil: on observe en surface un horizon dit A_0 , épais et de couleur noire, presque exclusivement organique, qui repose sur un sol minéral, plus ou moins mélangé d'humus au sommet: l'horizon A_1 (T).

En ce qui concerne le Mull (humus doux peu acide), les phases de décomposition sont rapides et elles se matérialisent difficilement dans l'espace: l'horizon A_0 est réduit à une mince litière de feuilles mortes; l'horizon A_1 , seul bien visible, est formé par un mélange intime d'acides humiques de synthèse et d'éléments minéraux.

b) *Le dosage direct des produits formés par la minéralisation de l'humus*, notamment de ceux qui sont utiles à la nutrition des

(1) HESSELMAN (1926) a distingué, dans l'horizon A_0 , 3 zones successives, de plus en plus transformées de haut en bas: la litière en surface, puis la couche de fermentation (F) et, enfin, la couche humifiée (H).

plantes, en l'espèce l'acide nitrique et l'ammoniaque, donne des renseignements beaucoup plus précis; il est possible de doser ces deux éléments globalement, en mesurant le taux d'azote minéral du sol, c'est-à-dire d'azote assimilable par les plantes, par opposition à l'azote organique, encore inassimilable (méthode utilisée par DROUINEAU et LEFEVRE, 1949). Cette méthode permet de se rendre compte de l'évolution dans le temps, d'un humus placé dans des conditions déterminées, donc de définir son activité: il suffit de mesurer, à intervalles réguliers, la quantité d'azote minéral qu'il libère et de la comparer à l'azote total (taux de minéralisation).

2° Historique, résultats d'études antérieures

Les auteurs suédois, en particulier HESSELMAN (1926) puis TAMM (1950), ont été les premiers à effectuer des recherches sur l'activité de l'humus, déterminée d'après la rapidité de sa minéralisation: leur méthode expérimentale consistait à laisser, pendant 3 mois, dans une chambre à 20-25° à humidité optima, un poids d'humus donné dans un bocal; on dosait l'azote ammoniacal avant et après l'expérience, ce qui permettait de définir le coefficient d'ammonisation

$$\frac{\text{NH}_3 \text{ avant} - \text{NH}_3 \text{ après}}{\text{N total}} \%$$

De la même façon était déterminé un coefficient de nitrification.

Ces auteurs ont pu alors constater que si le Mull se comporte toujours en humus actif, il n'en est pas de même du Mor. Dans certains cas, celui-ci reste inactif, même dans les conditions favorables de l'expérience: c'est ce que HESSELMAN et TAMM ont appelé le *Mor inactif*, par opposition au *Mor actif*, qui libère de fortes quantités d'azote minéral en cours d'expérience. Ainsi, un humus, primitivement inactif à l'état naturel, peut être activé artificiellement au laboratoire. Il semble, en effet, qu'on puisse attribuer l'inactivité de l'humus en forêt à deux séries de causes: des causes extérieures défavorables (climat froid et humide) et dans ce cas l'humus peut être activé artificiellement; des causes internes, dues à la composition et aux propriétés de l'humus, et dans ce cas toute activation est impossible.

D'après les deux auteurs suédois, le Mor actif (ou plus exactement « activable »), proviendrait de peuplements jeunes et de peuplements mélangés résineux-feuillus; le Mor inactif (c'est-à-dire inactivable) proviendrait, au contraire, de peuplements purs de résineux âgés: le premier se minéralise rapidement au moment des coupes, s'il est soumis brutalement aux radiations solaires; le se-

cond, qui caractérise les vieilles clairières, reste insensible aux variations d'éclairement.

Plus récemment, des *expériences de minéralisation en étuve, à température constante (30°)*, ont été entreprises par divers auteurs, aux U.S.A., PRITCHETT, BLACK et NELSON (1947), en Hollande, HARMSSEN et LINDENBERGH (1949). En France, les recherches effectuées par DROUINEAU et LEFFEVRE (1949), à la Station agronomique d'Antibes, et par BEL, DENIZOT et MATHIEU (1952), à celle de Dijon, ont surtout porté sur la minéralisation dans les sols agricoles. Ces derniers auteurs ont noté un maximum d'activité minéralisatrice pour des sols non calcaires à pH 5,3 et à rapport C/N 16, résultats qui, nous le verrons, se rapprochent beaucoup des nôtres.

Il était intéressant d'appliquer cette fructueuse méthode d'étude de l'humus aux sols forestiers: c'est ce que nous avons fait dans les années 1951 et 1952. Nous exposons ci-après les résultats essentiels de ces recherches.

3° Méthodes d'étude de la minéralisation de l'humus

Nous nous proposons, d'une part, de définir les critères chimiques utilisés pour différencier entre eux les types d'humus; d'autre part, de décrire les méthodes expérimentales employées.

CRITÈRES CHIMIQUES CARACTÉRISANT LES TYPES D'HUMUS

Le *pH* est un index précieux, bien qu'il soit insuffisant: il donne, en effet, une idée du taux de saturation du complexe absorbant par les bases échangeables (calcium et magnésium), le sol étant d'autant plus acide qu'il est plus éloigné de la saturation.

On trouvera dans le tableau I la série des principaux sols des environs de Nancy, qui ont été étudiés en 1951 (forêts de Haye et de Blainville), avec indication de leur *pH* et du taux de saturation du complexe absorbant: soulignons que la capacité totale d'échange et les bases échangeables ont été dosées à *pH* 7, par percolation lente à l'acétate d'Am. N.

Ce tableau montre une décroissance régulière de ce taux de saturation (V), à mesure que le *pH* diminue.

Le rapport C/N (carbone/azote) renseigne sur la teneur en azote de l'humus, le carbone représentant une fraction sensiblement constante (58 %) du taux de matière organique. Ce rapport est d'autant plus faible que la matière organique est plus riche en azote; or, si les microorganismes du sol ont leur activité ralentie par un excès de carbone de l'humus, celle-ci est au contraire accélérée par un taux d'azote élevé: le rapport C/N est donc un bon indice de l'activité biologique de l'humus et nous avons pu montrer, dans un travail antérieur (D., 1950), une nette corrélation entre sa valeur

TABLEAU I. — CARACTÈRES DES TYPES D'HUMUS

Sols	Provenance	pH	Type	C/N	CO ₂ Ca % ou bases échangeables S	Capacité totale d'échange T	Taux de saturation V
+ 1	Forêt de Haye	7,5	Humus calcique	12,3	21 % CO ₂ Ca	} saturation presque complète par l'ion calcium	82 %
+ 2	»	7,2	»	14,9	6 % CO ₂ Ca		
3	»	6,5	Mull	12,8	37,5 m.é. Ca ⁺⁺	46 m.é.	82 %
4	»	6,2	»	13,9	30,2 »	35 »	82 %
5	»	5,5	»	14,5	11 »	20 »	60 %
6	For. de Blainville	5	Mull de transit.	19,2	1,4 »	7,5 »	19 %
7	»	4,7	Mor	19	1,7 »	14 »	12 %
8	»	4,1	»	39	1,2 »	12 »	10 %

+ sols contenant des carbonates.

N. B. — La somme des bases échangeables S (Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺), la capacité totale d'échange T, sont exprimées en milliequivalents pour 100 gr. Le taux de saturation V est le rapport $\frac{S}{T}$ %.

et le taux de matière organique du sol. Celle-ci s'accumule, dans le profil, quand C/N augmente: les Mor, très acides, à minéralisation très lente, offrent un rapport C/N toujours très élevé, alors que le Mull, peu acide et dont l'activité est maximum, donne les rapports C/N les plus faibles; le pH 5 correspond à une « zone de transition » entre Mor et Mull, pour laquelle on peut trouver des rapports C/N très variables (D., 1950).

Taux d'acides humiques, dans la matière organique.

On peut se faire une idée du degré d'humification de la matière organique en extrayant les acides humiques colloïdaux, par une solution de soude étendue, et en les dosant à l'aide de $MnO_4K N/10$. Dans les sols acides, on constate que le taux d'acides humiques, c'est-à-dire le rapport: humus soluble dans NaOH/matière organique totale, augmente progressivement avec la profondeur, pour atteindre 70 à 100 % dans l'horizon B des podzols.

Dans les sols riches en calcium, le taux d'humus soluble dans la soude est toujours très faible (D., 1950). Il est un peu plus élevé, si on effectue le dosage après décalcification préalable. Mais, de toutes façons, la différence entre les horizons de surface et les horizons profonds est minime, comme en témoignent les chiffres suivants, donnant le taux d'humus soluble dans la soude:

		Sans décalcification préalable	Après décalcification
		—	—
Sol n° 1	Surface	10	14
	Profondeur (— 20 cm) ..	12	24

Rappelons, à ce sujet, que l'humus colloïdal formé en milieu calcaire est peu soluble dans la plupart des solvants habituels des acides humiques. Ce fait a été constaté par plusieurs auteurs, notamment BORDAS (1948) et BARBIER (1951), pour la soude et l'oxalate d'ammonium.

Certains auteurs allemands distinguent les « acides humiques bruns », formés en milieu acide, des « acides humiques gris », qui caractérisent les sols calcaires: la solubilité des premiers dans l'oxalate de soude est dix fois plus élevée que celle des seconds (SPRINGER, 1952). En outre, ils s'opposent par plusieurs de leurs propriétés, notamment leur richesse en azote. Il semble hors de doute que les acides humiques sont de nature différente suivant qu'ils prennent naissance en milieu acide ou calcaire: nous reviendrons ultérieurement sur cette question.

MÉTHODES D'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
DE LA MINÉRALISATION

Nous avons cherché à préciser les modalités de l'activation de l'humus, par deux séries d'expériences: 1° des expériences effectuées au laboratoire, portant sur la minéralisation à l'étuve à 30°: 2° des expériences sur le terrain, destinées à mettre en évidence l'influence des variations d'insolation du sol et de l'incinération provoquée, sur la décomposition de l'humus forestier.

Les recherches portant sur la minéralisation au laboratoire ont été effectuées dans les conditions suivantes:

Les échantillons de terre, bien homogénéisés, sont disposés sur une faible épaisseur (2 cm environ), dans des paniers en toile métallique, eux-mêmes posés sur des claies, *de façon que l'aération soit parfaite*. L'humidité du sol est maintenue à environ 60-70 % de l'humidité équivalente, par adjonction d'une petite quantité d'eau chaque semaine, si nécessaire.

Les sols sont alors placés dans l'étuve, à température relativement constante (28 à 30°), en atmosphère saturée d'humidité, pendant une durée de 6 semaines.

L'azote total et l'azote minéral (ammoniacal et nitrique) sont dosés initialement. Pendant la période de séjour à l'étuve, on procède au dosage de l'azote minéral, chaque semaine, le même jour; l'azote minéralisé pendant la période correspondante est obtenu par différence avec le taux initial d'azote minéral.

L'azote total est dosé par la méthode de KJELDAHL, l'azote minéral par la méthode décrite par DROUINEAU et LEFEVRE (1949). La quantité d'azote minéralisée, rapportée à l'azote total, permet de définir l'activité de l'humus des sols étudiés; pour la chiffrer, on utilise le *taux de minéralisation maximum* des terres, qui est la *quantité maxima d'azote minéralisée pour mille d'azote total*: elle est pratiquement acquise en cinq semaines, rarement six.

On construit, en outre, des *courbes de minéralisation*, en fonction du temps: il suffit de porter, en abscisses, les temps et, en ordonnées, les différents taux de minéralisation successifs. Le taux de minéralisation maximum, qui caractérise les sols, correspond donc au sommet de la courbe ainsi obtenue.

Les recherches effectuées sur le terrain

Il était nécessaire de compléter l'étude de la minéralisation de l'humus au laboratoire, par des recherches effectuées sur le terrain.

Deux procédés d'activation de l'humus, utilisant la chaleur ou les radiations solaires, sont en effet à la disposition du sylviculteur: d'une part, les *coupes éclairant brusquement* un sol antérieurement protégé par le couvert du peuplement; d'autre part, l'*incinération*

de la végétation et de l'humus, pratiquée couramment sur les sols podzoliques des Landes de Gascogne; cette méthode, qui a été mise au point de façon minutieuse en Suède (TAMM, 1950), a pour but, en provoquant une *combustion incomplète* de l'humus, de relever le pH et de stimuler considérablement l'activité microbienne, qui minéralise rapidement la partie d'humus qui n'a pas été brûlée.

Il nous a paru utile d'essayer de préciser, par des observations et des expériences, l'effet de ces deux méthodes sur l'évolution de l'humus forestier.

En ce qui concerne l'*action des coupes*, remarquons d'abord que, dans les peuplements denses de montagne, les conditions microclimatiques sont souvent peu favorables à l'activité biologique: l'humus, se minéralisant très lentement, s'accumule dans le sol; lorsqu'une trouée est pratiquée dans le peuplement — soit par suite d'une coupe, soit trouée de chablis — ces conditions sont brusquement modifiées dans un sens favorable et les radiations solaires, qui parviennent au sol, activent considérablement la minéralisation: *une véritable expérience naturelle est ainsi réalisée* et elle présente l'avantage, sur l'expérimentation au laboratoire, de se dérouler dans les conditions que peut obtenir le sylviculteur lui-même, en dosant l'intensité de ses coupes: il n'est pas sûr, en effet, que l'activation de l'humus obtenue en étuve, à l'obscurité et par la chaleur, ait des effets semblables à ceux de l'activation naturelle par les radiations solaires.

Il suffit de comparer les différents états de l'humus, dans une trouée datée et qui s'est agrandie peu à peu, au sein d'un peuplement dense et très homogène, pour avoir une idée de son évolution dans le temps; on comparera, à l'humus du vieux peuplement (état primitif), l'humus du centre de la trouée (le plus anciennement découvert) et celui de la bordure de la trouée (le plus récemment découvert); *les étapes de la minéralisation de l'humus dans le temps sont ainsi matérialisées dans l'espace*.

En ce qui concerne l'activation par l'*incinération*, on a comparé l'évolution de la matière organique, dans des placettes incinérées récemment, à des lots témoins non incinérés; ces expériences ont été réalisées dans les Landes (en Gironde) et dans les Cévennes (Hérault); on a, en outre, procédé à des essais de minéralisation à l'étuve d'échantillons provenant de la zone brûlée et du lot témoin.

II. - EXPERIMENTATION AU LABORATOIRE

Les recherches, concernant la minéralisation à l'étuve à 30°, ont eu pour but de mettre en évidence l'action de certains facteurs, sur l'activité de l'humus.

1. — *Nature de l'humus* des horizons de surface (profondeur 0-5 cm). On a comparé trois grands types: *Mor* (*humus brut, très acide*), *Mull* (*humus doux, moyennement acide*), enfin *humus calcaïque*, formé en milieu calcaire, donc neutre et saturé en ions calcium absorbés.

2. — *Influence de la saison*. Des essais ont été effectués, sur les mêmes sols, ou sur des sols très voisins, prélevés au printemps (avril ou mai) et en été (juillet), des années 1951 et 1952. Nous pourrions ainsi confronter les résultats de 4 séries d'expérimentation en étuve, d'une durée de 5 semaines.

3. — *Influence de la profondeur du prélèvement*: comparaison de l'activation obtenue pour un prélèvement de surface (0-5 cm) et pour un prélèvement effectué en profondeur; cette expérience est réalisable, lorsqu'une notable quantité de matière organique est mélangée à la masse du profil, soit par suite d'un brassage des horizons par la microfaune (rendzines), soit par suite de migrations (podzols). Par contre, elle n'est pas applicable aux sols à Mull (sols bruns forestiers), car la matière organique n'existe qu'à l'état de traces, en dessous de 8 à 10 cm de profondeur.

1° Minéralisation des horizons de surface (A₀ - A₁)

a) RÉSULTATS D'ENSEMBLE DE QUATRE SÉRIES D'EXPÉRIENCES

Les recherches ont porté sur des types d'humus prélevés dans les environs de Nancy, ainsi que sur quelques échantillons d'origine landaise (Gironde). Les sols n^{os} 1 à 5 et 9 à 12 proviennent de la forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle) et reposent sur le calcaire bajocien fissuré; les n^{os} 1, 2, 9, 10 sont des rendzines typiques, contenant du calcaire actif; alors que les n^{os} 3, 4 et 11 correspondent à des rendzines dégradées, à complexe absorbant presque saturé en calcium échangeable, mais dépourvues de calcaire actif; les n^{os} 5 et 12 ont été prélevés également en forêt de Haye, mais sur des alluvions limoneuses de la Moselle; il s'agit de sols bruns lessivés à Mull.

TABLEAU 2. — MINÉRALISATION DE PRINTEMPS ET ÉTÉ 1951

N° du sol	Origine	Type d'humus (1)	Horizon	pH	Mat. org. %	N total %	C/N	Taux de minéralisation (2) printemps	Taux de minéralisation (2) été
+ 1	Haye	Humus Ca ⁺⁺	A ₁	7.5	12.4	0.59	12.3	19.3	11
+ 2	»	»	A ₁	7.2	18	0.71	14.9	23.8	6,1
3	»	Mull	A ₁	6.5	7.6	0.35	12.8	31,3	11,8
4	»	»	A ₁	6.2	7.8	0.33	13.9	26	17,1
5	»	»	A ₁	5.5	6	0.24	14.5	63,6	20
6	Blainville	Mull de transition	A ₁	5	4.6	0.14	19.2	80	20
7	»	Mer	A ₁ (— 10)	4.7	9.7	0.30	19	65	5,9
8	»	»	A ₁ (— 10)	4.1	7.1	0.11	38	46,4	12.4

(1) Tous les échantillons ont été prélevés dans les 5 premiers centimètres, sauf 7 et 8 prélevés à la partie supérieure de A₁.
 (2) Rapport Az. minéralisé/Az. total $\frac{0}{100}$.
 + Sols contenant des carbonates actifs.

Les sols n^{os} 6 à 8 et 14 à 16 proviennent de la forêt de Blainville et ont pour roche-mère les alluvions anciennes, très caillouteuses, de la Meurthe; les n^{os} 6 et 14, prélevés sous feuillus, sont des sols lessivés, dont l'humus est en voie d'acidification; alors que les n^{os} 7, 8, 15, 16 correspondent à des sols podzoliques, se trouvant sous peuplement de Pin sylvestre, avec sous-bois de *Calluna vulgaris*.

Quant au sol n^o 13, il s'agit d'un horizon d'humus brut, prélevé dans les Landes de Gascogne, au voisinage de l'aérodrome de Mérignac (Gironde). Enfin, le sol n^o 17 est un podzol type, formé sous un peuplement de pins sylvestres et reposant sur une pente de grès vosgien, dans les Basses Vosges (forêt de Taintrux).

Dans la majorité des cas, on a obtenu des taux de minéralisation (azote minéralisé, depuis l'origine de l'expérience, rapporté à l'azote total) croissant régulièrement chaque semaine, avec un maximum atteint, soit au bout de 4 semaines, soit de 5 semaines (rarement, pour quelques sols, 6 semaines). La régularité des courbes présente cependant quelques exceptions, dont nous reparlerons. Pour beaucoup d'échantillons, au début de l'expérience, on observe, non pas une minéralisation, mais au contraire une diminution de l'azote minéral initial: il s'agit d'une phase de protéogénèse microbienne, due à une intense multiplication de microorganismes. Cette phase ne dépasse pas 8 jours en général, mais pour certains sols elle peut se poursuivre deux semaines.

Le tableau 2 donne les taux de minéralisation maxima obtenus, au cours des 2 expériences de l'année 1951 (printemps et été).

La figure 1 donne le détail de 4 courbes de minéralisation (sols 1, 4, 5, 7), de printemps.

Les expériences de printemps de 1952 ont porté sur les mêmes sols, que celles de 1951, les prélèvements ayant été effectués dans le courant de mai; en outre, un horizon A₀, provenant d'un podzol vosgien (échantillon n^o 17), a été étudié en même temps que l'horizon B profond du même sol. (Voir ci-dessous comparaison des horizons de surface et des horizons profonds).

Les résultats obtenus ont été les suivants:

N ^o du sol	Taux de minéralisation (printemps 1952)
2	11,8
5	25,3
6	30
7	39
8	35
17	25

Pour les caractéristiques des différents humus, se reporter aux tableaux 2 (sols 2 - 8) et 3 (sol 17).

Pour les expériences d'été de 1952, on a prélevé certains échantillons d'humus au voisinage des stations précédentes; en outre, de nouveaux prélèvements ont été effectués, dans le but de comparer l'humus de surface et l'humus de profondeur (voir ci-dessous). En ce qui concerne les horizons de surface, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 3.

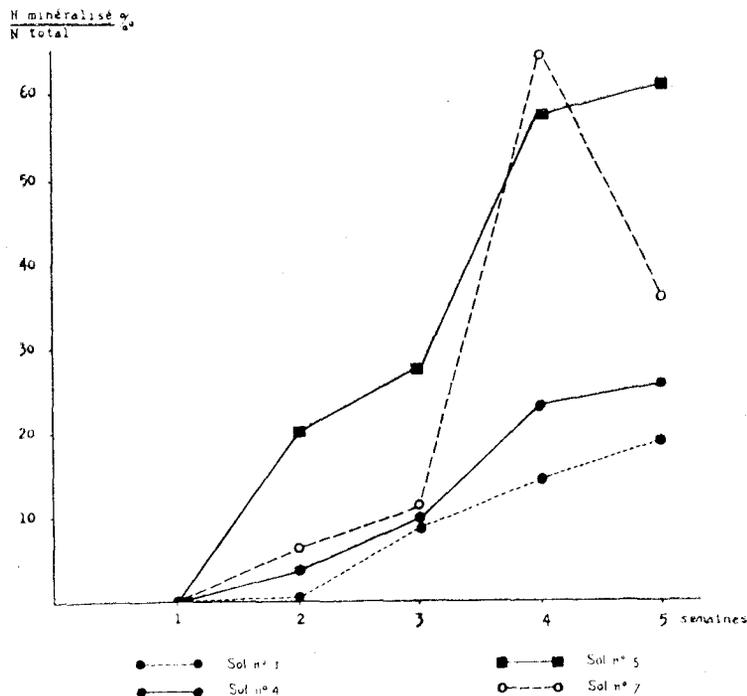


FIG. 1.

Courbes de minéralisation de 4 sols prélevés au printemps 1951.

Les courbes de minéralisation de quatre de ces sols (10, 12, 13, 17) sont dessinées sur la figure 2.

Le graphique de la figure 3 permet de récapituler les résultats de ces quatre séries d'expériences; en ordonnées sont portés les taux de minéralisation maxima et en abscisses les pH; l'aspect de ces graphiques permet de mettre en évidence, d'une part, l'influence de la saison du prélèvement sur la minéralisation, d'autre part, celle de la nature de l'humus (matérialisée par le pH).

TABLEAU 3. — MINÉRALISATION D'ÉTÉ 1952

N° du sol	Origine	Type d'humus	Horizon	PEI	Mat. org. %	N total %	C/N	Taux de minéralisation 0/00
+	—	—	—	—	—	—	—	—
9	Haye	Humus Ca++	A ₁	7,5	15,6	0,64	14,3	21
+	»	»	A ₁	7	18,9	0,67	16,5	18
11	»	»	A ₁	6,6	11,6	0,37	15	20
12	»	Mfull	A ₁	5,6	8	0,28	16	30
13	Mérignac (Gironde)	Mor	A ₀	4,8	32	0,74	26	22,5
14	Blainville	Mor feuillus	A ₀ - A ₁	4,5	13,4	0,33	24	13,7
15	»	Mor Callune	A ₀	4,2	12,7	0,25	27,6	18,2
16	»	Mor pins	A ₀	4	26	0,44	35	12,5
17	Vosges (Taintrux)	»	A ₀	3,8	38,5	0,85	27	11,7

+ Sols contenant des carbonates actifs.

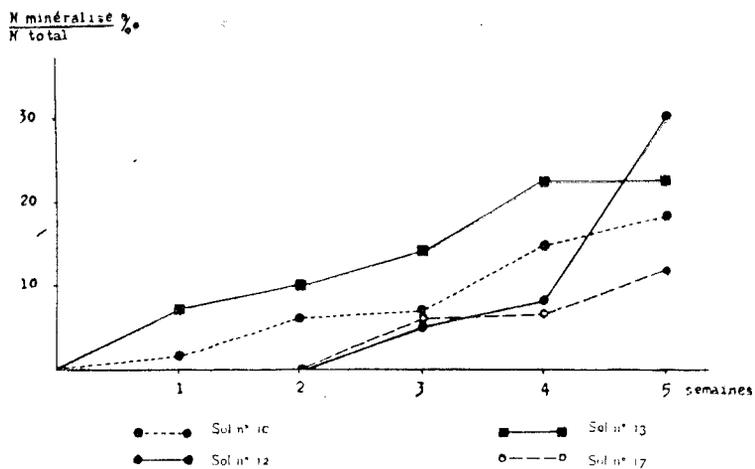


FIG. 2.
Courbes de minéralisation de 4 sols prélevés en été 1952.

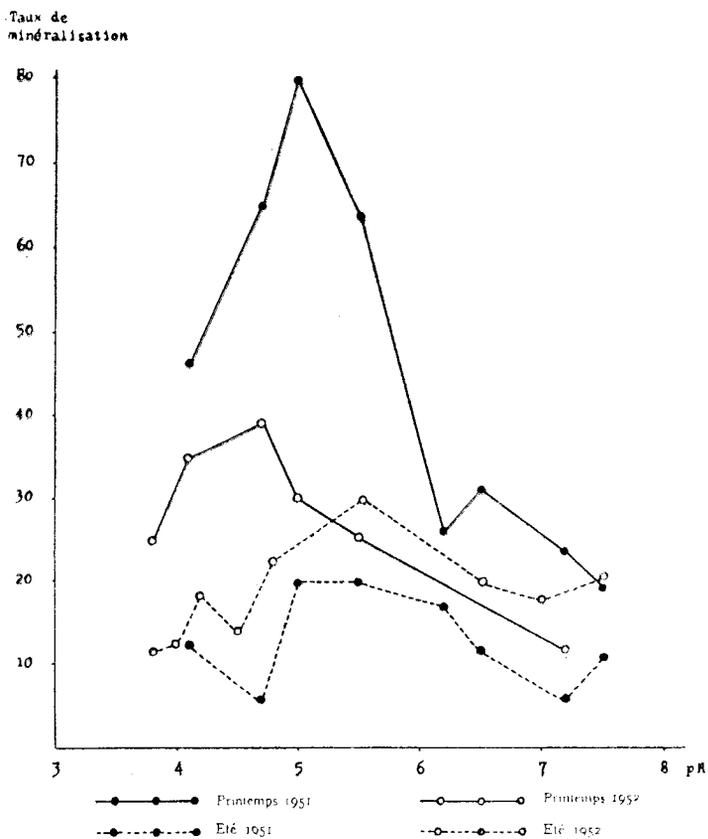


FIG. 3.
Graphiques indiquant les taux de minéralisation obtenus, en fonction du pH, au cours des 4 expériences poursuivies.

b) INTERPRÉTATIONS

Une remarque préliminaire s'impose: les taux de minéralisation obtenus ne donnent pas nécessairement une idée exacte de l'activité relative des différents types d'humus, *dans les conditions naturelles*: il semble, au contraire, que certaines catégories d'humus, les plus acides en particulier, soient plus favorisées que d'autres par les conditions très favorables de la minéralisation à l'étuve. Mais les résultats obtenus renseignent surtout sur *les possibilités de stimulation de la décomposition de la matière organique, par une modification des conditions extérieures dans un sens favorable*, notamment une augmentation de la chaleur reçue.

Il ressort nettement, de l'examen de la figure 3, que l'allure des graphiques est très différente, suivant qu'il s'agit de prélèvements de printemps ou d'été; au contraire, pour une saison donnée, les graphiques des années 1951 et 1952 ont sensiblement la même allure d'ensemble, les différences pouvant être attribuées aux variations de la répartition des pluies et des températures, d'une année à l'autre: il semble que le printemps 1951 se soit montré exceptionnellement favorable à l'activation consécutive de l'humus par la chaleur.

Au printemps, le taux de minéralisation maximum est atteint pour les sols à pH compris entre 4,5 et 5, et à rapport C/N oscillant autour de 20 à 25, donc des humus de type Mor, à caractères moyennement accentués.

En été, au contraire, l'activité maxima — d'ailleurs nettement plus basse — s'observe dans les humus de type Mull, assez acides et assez décalcifiés, à pH compris entre 5 et 5,5; et à rapport C/N de l'ordre de 15 à 20.

On ne note aucune différence appréciable d'activité de minéralisation entre les saisons, pour les humus neutres ou presque neutres, donc à pH supérieur à 6 et à rapport C/N compris entre 12 et 16.

Si maintenant on envisage successivement les différents types d'humus, on constate les faits suivants:

1. *Les Mor très acides*, donc très désaturés (pH inférieur à 4,5) et à rapport C/N supérieur à 25 dans l'horizon A₀, se sont montrés peu actifs, au cours de l'essai de minéralisation d'été. Ils sont, par contre, nettement activés au printemps, quoique dans une proportion moindre que les Mor du type suivant.

2. *Les Mor acides*, moins désaturés (pH 4,5 à 5) et à rapport C/N de l'ordre de 20 à 25, présentent les mêmes caractéristiques d'ensemble, mais ils sont très fortement activés au printemps et ils libèrent alors les quantités maxima d'azote minéral: en 1951, les

taux de minéralisation ont atteint des valeurs remarquablement élevées, pour ces sols. Notons la concordance de ces résultats, avec ceux obtenus en Suède par HESSELMAN (1926).

3. *Les Mull assez acides*, donc assez fortement désaturés (pH 5 à 5,5) et à rapport C/N voisin de 15 à 20, donnent en été les taux de minéralisation les plus élevés; certains peuvent, en outre, manifester une activité accrue, au cours de l'expérience de printemps (1951, n° 5), et atteindre des taux de minéralisation du même ordre que le type précédent.

4. *Enfin les Mull peu acides* et les humus presque saturés de calcium (en présence de calcaire actif), donc à pH supérieur à 6, sont peu actifs à l'étuve, quelle que soit la saison du prélèvement.

Il semble bien que la minéralisation intense de l'humus très acide, qu'on observe dans l'atmosphère chaude et humide de l'étuve, puisse être attribuée à la prolifération de certaines moisissures et d'Actinomycètes aux dépens des bactéries, qui, elles, ne peuvent se développer en milieu très acide: ce phénomène expliquerait la décomposition très rapide de la matière organique en climat équatorial.

La conclusion qui s'impose est alors la suivante: *l'humus brut, au moins lorsque son pH dépasse 4, peut être facilement activé par la chaleur, notamment au printemps*: nous verrons que les résultats des recherches effectuées sur le terrain confirment nettement ce point de vue.

Par contre, l'humus calcique, neutre ou légèrement alcalin, paraît beaucoup moins sensible à l'action stimulante de la chaleur.

Ainsi, *les humus acides sont les plus sensibles aux influences extérieures* et cette sensibilité varie suivant la saison: en outre, l'activité de leur minéralisation paraît être stimulée par une alternance de conditions climatiques défavorables, puis favorables, notamment par une alternance de froid et de chaleur: c'est le phénomène de *thermopériodisme*, que nous avons décrit dans une note antérieure (D., 1951). Au contraire, l'activité des humus calciques n'est que faiblement affectée par les variations brutales de température.

2° Comparaison des horizons de surface et des horizons profonds

Pour certains sols, il nous a paru intéressant de comparer l'activité des horizons de surface à celle des horizons profonds: cette question ne pouvait se poser pour le *Mull* qui, par suite de sa minéralisation très active, se localise toujours dans la partie tout à fait superficielle du profil (5 à 8 cm au maximum); par contre, l'expérience pouvait être tentée pour les deux autres catégories d'humus:

TABLEAU 4. — COMPARAISON DE L'ACTIVITÉ
DES HORIZONS DE SURFACE ET DES HORIZONS PROFONDS

N° du sol	Origine	Type d'humus	Horizon	pH	Mat. org. %	N total %	C/N	Taux ac. humiques sol. soude (1)	Taux de minéralisation printemps	Taux de minéralisation été
9	Forêt de Haye	Humus calcique	A ₁	7,5	15,6	0,64	14,3	14,5 %	—	21
			A ₂ (— 20)	7,5	3,4	0,20	10	24	—	—
13	Gironde	Mor	A ₀	4,8	3,2	0,74	26	16	—	22,5
18	»	Alios	B	5,4	2	0,07	16	98	—	6
17	Podzol des Vosges	Mor	A ₀	3,8	38,5	0,85	27	20	25	11,7
			B ₁	4,5	12	0,29	20	65	8,4	6,2

(1) La valeur indiquée exprime le rapport ac. humiques/mat. organique totale %; pour le sol n° 9, le dosage a été effectué après décalcification préalable avec HCl dilué.

1. Pour l'*humus calcique* des rendzines, en comparant l'activité de l'horizon A₁, prélevé dans les 3 premiers centimètres, à celle d'un prélèvement effectué à une profondeur de 20 cm: dans ces sols, en effet, la matière organique se trouve être mélangée au sol minéral jusqu'à une profondeur notable, grâce à au brassage causé par l'activité animale intense.

2. Pour le *Mor*, dans les sols de type podzol: il est, en effet, possible de comparer la minéralisation de l'horizon A₀ de surface avec celle d'un horizon d'accumulation B, enrichi en humus, par migration depuis la surface.

Les sols qui ont été utilisés sont, d'une part, un sol de rendzine de la forêt de Haye (sol n° 9), d'autre part, un podzol vosgien (sol n° 17), ainsi qu'un *alios* landais, provenant du domaine de Devinas (commune de Carcans), qui a été comparé à l'horizon A₀ du sol n° 13 et qui a été affecté du n° 18. Les essais de minéralisation ont été effectués dans les mêmes conditions que les précédents.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.

Signalons que le taux obtenu pour l'*alios* n° 18 n'est pas significatif, en raison des quantités très faibles d'azote mis en jeu: de toute façon, son activité ne peut être que très faible, car seules des traces d'azote minéral ont été libérées, en cours de minéralisation.

Les courbes de minéralisation correspondantes sont portées sur les figures n° 4 (sol n° 9) et n° 5 (sol n° 17).

Il ressort de l'examen du tableau 4 que l'activité de l'humus des horizons profonds apparaît toujours beaucoup plus faible que celle des horizons de surface correspondants, quel que soit le type d'humus mis en jeu.

Or, si on compare les caractéristiques de l'humus des horizons profonds à celles de l'humus de surface, il est possible de faire une double constatation: 1° En profondeur, le rapport C/N est plus bas, ce qui indique une richesse en azote plus élevée qu'en surface: il descend à 10 en milieu calcaire, alors qu'il oscille entre 16 et 20 en milieu acide (voir, à ce sujet, le résultat des recherches sur le terrain à Grand et à Mont-de-la-Croix). 2° La fraction de la matière organique soluble dans la soude, donc la fraction humifiée, est plus importante. Cette dernière observation s'applique bien aux horizons B des podzols, beaucoup moins nettement, par contre, aux sols calcaires, tels que le n° 9, même s'ils ont subi une décalcification préalable; mais il ne faut pas oublier que les complexes humiques, formés en présence de calcaire, sont peu solubles dans la soude ou dans l'oxalate d'ammonium. Bien qu'ils constituent le *ciment* des gros agrégats caractéristiques des rendzines, ils sont difficiles à mettre en évidence par voie chimique.

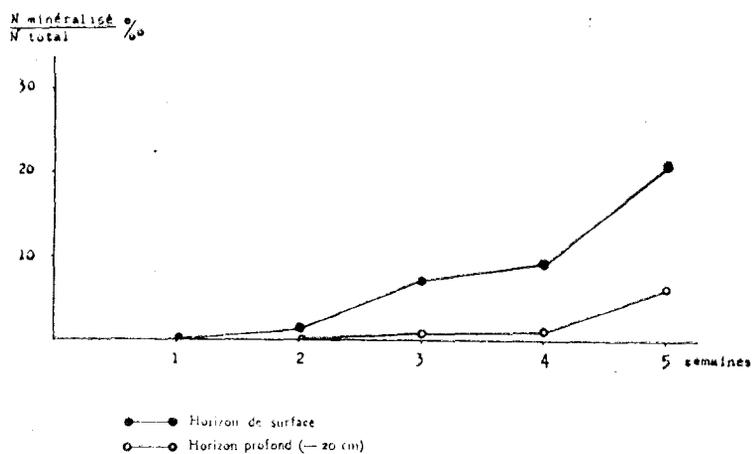


FIG. 4.

Courbes de minéralisation du sol n° 9 (été 1952).

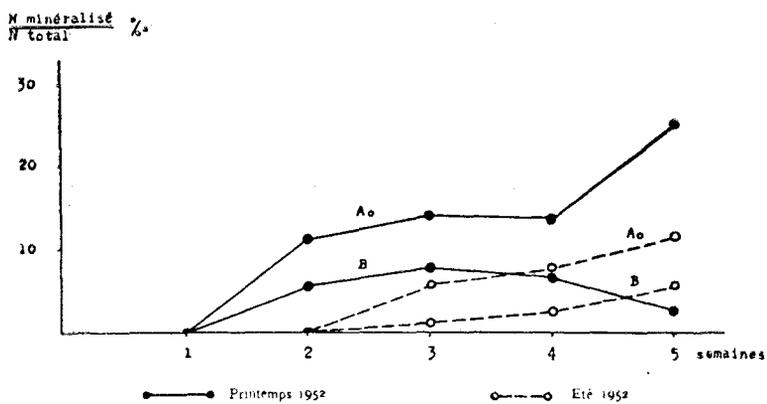


FIG. 5.

Courbes de minéralisation obtenues pour le sol n° 17 (horizons A₀ et B).

Malgré les différences de propriétés — sur lesquelles nous reviendrons — qui apparaissent entre les humus profonds des sols acides ou des sols calcaires, on peut admettre qu'ils offrent en commun un caractère essentiel, qui ressort nettement des considérations précédentes : si on les compare à la matière organique de surface, ils sont beaucoup plus riches en produits colloïdaux, beaucoup plus pauvres, par contre, en éléments incomplètement décomposés et en débris encore organisés. Ainsi, *l'humus des horizons profonds, essentiellement constitué par des complexes colloïdaux de néoformation ou résiduels, offre une minéralisation plus lente que celle de la matière organique peu décomposée, qui domine dans les horizons de surface* (WITTICH, 1952) : *la matière organique profonde est presque inerte et difficilement activable par les actions stimulantes, telles que la chaleur : elle est comparable à la matière organique ancienne, ayant déjà subi une évolution lente dans les sols, que BARBIER (1949, 1951) oppose à la matière organique fraîche, beaucoup plus active.*

Dans le même esprit, certains auteurs allemands (SPRINGER, 1952) désignent l'humus peu décomposé de surface sous le vocable d'*humus nourricier* (Nährhumus), alors qu'ils appliquent le terme d'*humus durable* (Dauerhumus) aux composés colloïdaux incorporés à la masse du sol et liés intimement aux complexes argileux.

III. — RECHERCHES EFFECTUÉES SUR LE TERRAIN

Comme nous l'avons annoncé plus haut, ces recherches ont pour but de montrer, d'une part, l'influence des coupes, donc des radiations solaires, d'autre part, celle de l'incinération de l'humus brut, sur l'activation de la minéralisation.

1^o Influence des coupes pratiquées dans un peuplement dense

L'étude de l'action des coupes et, par voie de conséquence, de l'insolation, a été menée dans la région de Grand, dans les Vosges, et dans la forêt de Mont-de-la-Croix, dans le Doubs; dans les deux cas, les conditions écologiques des peuplements se prêtaient particulièrement bien à cette entreprise. Le climat est, en effet, à Grand, de type très continental et à Mont-de-la-Croix franchement montagnard, ce qui accentue les contrastes de microclimat, provoqués par une exposition brutale du sol à la lumière. Malgré la roche-mère calcaire, l'humus des peuplements âgés et serrés est très nettement de type *humus brut* à décomposition lente, en raison du climat humide et froid qui ralentit sa décomposition à l'ombre et aussi parce que, dans les deux cas, il s'agit de peuplements purs de résineux (épicéas). Enfin, l'existence de trouées de chablis, datées avec précision et qui se sont progressivement agrandies sur leur bordure en découvrant de nouvelles surfaces de sol, a permis de reconstituer l'évolution de l'humus, en comparant entre eux des prélèvements effectués en différents points des trouées et des peuplements.

A Grand, dans la forêt particulière du Béhaut (altitude 380 m), le sol se trouvant sous une plantation dense d'épicéas, d'une cinquantaine d'années, est une rendzine dégradée tout à fait typique, caractérisée par une couche épaisse de Mor reposant sur un sol brun foncé à gros cailloux calcaires.

Le profil est le suivant :

- 0 - 10 cm A_0 — humus brut d'épicéas à structure feuilletée; pH 5,2.
 10 - 25 cm A_1 — sol à gros grumeaux anguleux de terre fine, de couleur brun-noir, alternant avec de nombreux cailloux calcaires de petite dimension; pH 7.
 — 25 cm C — roche-mère: calcaire bajocien fissuré.

Au Mont-de-la-Croix, le peuplement étudié est un vieux peuplement d'épicéas comportant, en outre, d'assez nombreux sapins — altitude 980 m — parcelle E.

Le sol est un *sol humique carbonaté*, analogue au type décrit par BACH (1950) dans les Alpes suisses.

Le profil est le suivant:

- A_0 — humus brut de mousses et d'épicéas, de 2 cm.
 A_1 — sol noir, très humifère, à structure en gros grumeaux anguleux, remplissant les fentes séparant de gros blocs de calcaire; pH 6,4.

a) FAITS OBSERVÉS

On a pu constater que les caractères de la végétation et du sol, dans les trouées, différaient profondément de ceux du peuplement primitif, et cela d'autant plus que la trouée était plus ancienne.

En ce qui concerne la végétation, les mousses, les saprophytes de l'humus (*Listera ovata*, *Cephalanthera pallens*, *Pirola secunda*, etc...) et même parfois les acidiphiles (*Prenanthes purpurea*, *Maianthemum bifolium* à Mont-de-la-Croix), qui constituent la végétation exclusive du vieux peuplement, font place à une flore exubérante de neutrophiles (*Mercurialis perennis*, *Brachypodium sylvaticum*) et même de *nitratophiles* (Framboisier, Epilobes diverses, *Galeopsis Tetrahit*, etc...); dans le centre de la trouée, au Mont-de-la-Croix, le sol est en outre envahi par une végétation très dense d'arbustes.

Quant au sol, il subit lui aussi des transformations importantes. L'horizon A_0 d'humus brut disparaît totalement: en bordure des trouées, dans les zones découvertes récemment, il en subsiste encore des traces, notamment à Grand (A_0 de 1 à 2 cm); mais dans le centre des trouées, la couche de Mor est inexistante; au Mont-de-la-Croix, le sol humique carbonaté primitif se modifie considérablement, par disparition progressive de l'humus, et prend l'aspect d'un sol rendzini-forme de couleur brune, dans lequel l'horizon de surface, seul, contient un peu d'humus mélangé au sol minéral, sur 3 à 4 cm. Ainsi, le simple examen du profil montre une minéralisation très active de l'humus, sous l'influence des radiations solaires.

Le tableau 5 confirme cette observation fondamentale : la quantité totale de matière organique diminue considérablement, lorsqu'on passe du sol du vieux peuplement à celui de la trouée la plus ancienne. De plus, les chiffres analytiques obtenus, interprétés à la lumière des modifications du profil, permettent de retracer, de manière plus précise, les étapes de l'évolution de la matière organique.

b) INTERPRÉTATIONS

Plusieurs constatations se dégagent, en effet, des données du tableau 5 :

— *Diminution de la matière organique totale et de l'azote total.*

A Grand, cette diminution n'apparaît pas immédiatement, car il se produit d'abord une légère augmentation du taux d'acides humiques de l'horizon A_1 , causée par la *minéralisation complète* de l'horizon A_0 .

— *Baisse du rapport C/N.*

La baisse du rapport C/N est considérable, au début : elle correspond à la minéralisation de l'horizon A_0 , qui libère des quantités de CO_2 , relativement beaucoup plus importantes que celles d'azote minéral : c'est aussi la raison pour laquelle la diminution du taux d'azote total est plus faible que celle du taux de matière organique.

Puis, le rapport C/N se stabilise aux environs de 8 à 10 : cette phase correspond, semble-t-il, à un net ralentissement de la minéralisation, qui affecte surtout les acides humiques, formés au cours de la première phase : ils sont, en effet, plus résistants que la matière organique fraîche à l'action des microorganismes : cette constatation confirme le résultat des expériences de minéralisation des horizons profonds, comparées à celles des horizons de surface.

— *Augmentation, puis baisse du taux d'azote minéral.*

On constate que la quantité d'azote minéral passe par un maximum dans la trouée récente, puis diminue dans la trouée ancienne ; cela tient à la consommation massive de cet élément par la végétation nitratophile luxuriante qui se développe dans la trouée et qui épuise rapidement la réserve d'azote assimilable, formée au début de la minéralisation, alors que la végétation était encore peu développée. Le rapport N minéral/N total atteint des chiffres élevés, de l'ordre de 1.4 à 3, alors que ce rapport est de l'ordre de 0.3 à 0.5 dans un humus brut inactif.

Ainsi, l'influence immédiate des coupes, éclairant brusquement un humus formé lentement à l'ombre d'un vieux peuplement, se traduit par une disparition totale de l'horizon A_0 , accompagnée d'une libération massive d'azote minéral.

2° Etude des effets de l'incinération

Deux surfaces récemment incendiées — l'une dans les Landes (route de Blagon au Temple, au voisinage du grand collecteur, en Gironde) — l'autre dans les Cévennes (la Salvetat-sur-Agout, Hérault) ont été l'objet de cette étude: leur sol a été comparé à celui de la lande non brûlée, se trouvant au voisinage immédiat de la limite de l'incendie.

Dans les Landes, l'incendie a eu lieu en juillet 1952; un premier prélèvement (n° 1) a été effectué en septembre 1952; le prélèvement n° 2, en vue de la minéralisation à l'étuve, date d'octobre 1952. La lande témoin comprend essentiellement des Ericacées (*Calluna vulgaris*, *Erica scoparia*, *E. ciliaris*) avec, en outre, *Avena Thorci*, *Agrostis setacea*: elle est caractérisée par un Mor peu épais, mélangé de sable quartzeux (prélèvement n° 3). La zone parcourue par l'incendie est recouverte de placages irréguliers d'humus très noir, charbonneux, de structure fine.

Dans les Cévennes, il s'agit d'une incinération provoquée, en vue d'un reboisement — donc plus modérée — et effectuée le 1^{er} septembre 1952; le sol était un sol podzolique à Mor assez épais, sur gneiss et micaschiste, situé à 900 m d'altitude; la lande était formée par un mélange des espèces suivantes: *Sarothamnus scoparius*, *Pteridium aquilinum*, *Calluna vulgaris*, *Erica cinerea*; les placeaux n° 1 et 2 ont été incinérés, alors que le plateau n° 3 constitue le témoin. Les prélèvements ont été effectués au début de décembre, soit 3 mois après l'incendie, comme dans le cas précédent.

Pour tous ces sols, on a déterminé l'azote total et l'azote minéral. En outre, pour les échantillons 2 et 3 du sol landais, on a procédé à une expérience de minéralisation à l'étuve, dans le courant des mois d'octobre et novembre. Les résultats sont consignés dans le tableau 6.

On peut tirer de l'examen de ces chiffres les conclusions suivantes:

a) SOLS PROVENANT DES LANDES (incendie, été 1952).

La combustion de l'humus, quoique partielle, a été relativement intense, comme le montrent, d'une part, la perte importante d'azote total à l'état gazeux (de moitié pour le lot n° 2), d'autre part, la libération de carbone au cours de la combustion, qui rend l'humus charbonneux et élève artificiellement le rapport C/N.

Les effets de l'incinération sont doubles: le pH est plus élevé que dans le lot témoin, par suite de la libération de bases; en outre, le taux d'azote minéral augmente considérablement, ce qui prouve que la portion d'humus non brûlé a été nettement activée: les valeurs du rapport N minéral/N total, de l'ordre de 3 % dans la zone

TABLEAU 6. — EFFETS DE L'INCINÉRATION

Localisation	N°	pH	Carbone organique %	N total %	C/N	N minéral en mg/100 g	$\frac{\text{N minéral}}{\text{N total}}$ %	Taux de minéralisation $\frac{0}{100}$
I. LANDES (été 1932)								
Zone incinérée	1	7,4	4,7	0,25	19	7,8	3,1	
Zone incinérée	2	5,8	3,8	0,15	25	4,5	3	23
Lande témoin	3	4,9	4,8	0,39	16	1,4	0,46	14
II. CÉVENNES (automne 1952)								
Zone incinérée	1	5,8	11,7	0,87	13,4	11,7	1,34	
Zone incinérée	2	5,8	14,9	1,09	13,6	13,6	1,24	
Lande témoin	3	4,6	14,8	0,84	17,9	5,1	0,6	

incendiée, montrent que les effets de l'incinération sont très comparables à ceux obtenus par le moyen des coupes.

On pouvait penser qu'un humus, qui a été ainsi le siège d'une minéralisation intense pendant 3 mois (juillet à octobre), serait ensuite entré dans une phase de stabilité et aurait perdu la majeure partie de son activité; l'expérience de minéralisation à l'étuve montre qu'il n'en est rien: elle met en évidence, pour cet humus, *une activité double de celle de l'humus de la lande témoin*. On peut en déduire que l'influence stimulante de la combustion sur le sol est susceptible de se prolonger, pendant une durée dépassant sensiblement celle de la période de végétation.

b) SOLS PROVENANT DES CÉVENNES (incinération, automne 1952).

Certains faits montrent clairement que la combustion a été plus superficielle que celle des humus landais étudiés ci-dessus: l'humus est à peine plus noir que celui du témoin et il n'est pas charbonneux; de plus, on ne constate *aucune perte d'azote total*; enfin, les quantités de carbone sont peu modifiées. Cette différence s'explique par le fait qu'il s'agissait d'une incinération provoquée, donc surveillée, non d'un incendie comme dans les Landes.

On voit que le rapport N minéral/N total obtenu, s'il est plus que doublé par rapport à la lande témoin, est sensiblement moins élevé que dans le cas précédent: cela s'explique aisément par deux facteurs, qui, sans aucun doute, ont freiné l'activité minéralisatrice: 1° la combustion a été particulièrement superficielle, comme nous venons de le signaler, elle n'a donc pu activer toute la masse de l'humus; 2° elle a été pratiquée en septembre, au début d'un automne froid et pluvieux, donc à une époque très peu propice à l'activité microbienne.

En résumé, on constate que les incinérations les plus efficaces sont celles qui sont pratiquées au début ou en cours de la période chaude. Les incinérations légères paraissent stimuler l'activité minéralisatrice, de manière plus modérée que les combustions brutales; mais, en contrepartie, elles ne provoquent pas de pertes d'azote à l'état gazeux et laissent à peu près intacte la « réserve » d'azote total. D'autres expériences sont projetées, dans le but de suivre dans le temps, de manière plus précise, les étapes de l'évolution de la matière organique, sous l'action du feu.

IV. — ESSAI D'INTERPRÉTATION D'ENSEMBLE

1° Le processus de la décomposition des humus forestiers

Il convient de souligner, d'abord, l'extrême complexité de ce phénomène biologique qui est, en réalité, la résultante de deux processus antagonistes fondamentaux: 1° un processus de destruction des molécules organiques, qui aboutit précisément à leur *minéralisation* totale; 2° un processus de synthèse, sous l'action des microorganismes, d'éléments colloïdaux complexes, les *acides humiques* (DROUINEAU et LEFÈVRE 1949 — WAKSMAN 1936 — WITTICH 1952). Cette activité de synthèse, lorsqu'elle est favorisée, réutilise l'azote minéralisé et le fait rétrograder vers la forme organique.

Certaines particularités des courbes de minéralisation obtenues, dans les expériences décrites précédemment, mettent en évidence l'opposition de ces deux processus: nous avons souvent noté, au début de la minéralisation à l'étuve, une phase initiale de diminution de la quantité d'azote minéral, par suite d'une protéogénèse intense: en raison de la multiplication bactérienne initialement favorisée par la chaleur, la synthèse l'emporte sur la minéralisation.

En outre, certaines courbes de minéralisation, à la suite d'un accident fortuit — par exemple ensemencement en moisissures développées dans l'étuve sur un objet en bois — ont montré une chute brutale du taux d'azote minéral, provoquée par la multiplication des moisissures, puis, à nouveau, un dégagement important d'azote minéral.

La matière organique du sol est, en effet, un mélange hétérogène et complexe; en schématisant, on peut admettre qu'elle contient les éléments suivants (WITTICH 1952):

1° des éléments incomplètement décomposés, à structure encore organisée;

2° des produits intermédiaires: tels que la lignine, libérée par décomposition de la cellulose;

3° des produits colloïdaux complexes: les acides humiques, dont nous avons dit qu'ils résultent — pour la plus grande partie — de phénomènes de synthèse d'origine biologique (milieu peu acide): d'autres, au contraire, peuvent être considérés comme un résidu de la minéralisation (milieu très acide: complexes lignine-protéine).

Ces différents éléments sont en proportion variable, suivant les types d'humus et aussi suivant l'horizon du profil. Comme le mon-

trent les déterminations du taux d'acides humiques, celui-ci croît de la surface vers la profondeur, notamment dans les sols acides, les podzols. Par exemple, pour ce dernier type de sol, la composition des horizons humiques paraît être la suivante (WITTICH 1952) :

A₀: débris organiques, éléments à structure organisée dominants.

A₁: les débris organisés et produits intermédiaires équilibrent à peu près les acides humiques.

B: acides humiques nettement dominants.

Dans un sol de rendzine, ce phénomène est plus difficile à mettre en évidence par voie chimique, puisque les acides humiques formés en milieu calcaire sont peu solubles, dans les réactifs habituellement utilisés (soude, méthode DEMOLON — oxalate d'Am., méthode CHAMINADE). Cependant, le simple examen du sol montre que l'humus incorporé des rendzines constitue le ciment colloïdal des gros grumeaux, tantôt arrondis, tantôt anguleux, qui caractérisent la structure de ces sols.

Ainsi, quel que soit le sol, l'humus apparaît comme d'autant plus transformé, d'autant plus riche en éléments colloïdaux, qu'il est plus profond.

Si maintenant nous résumons les conclusions essentielles, qui découlent des recherches précédemment exposées, on peut constater les faits suivants :

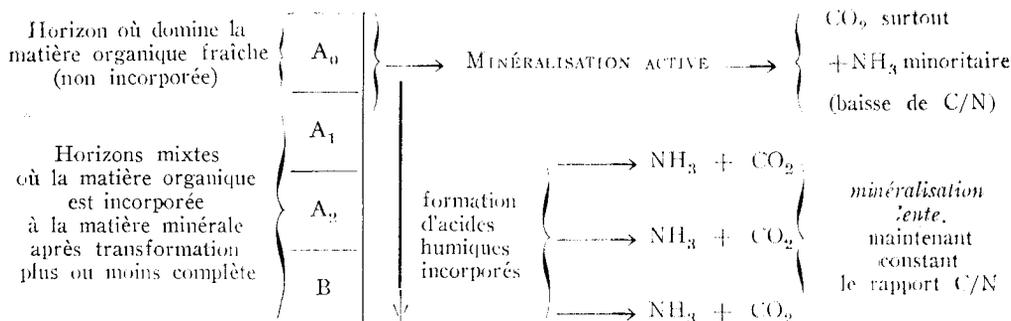
1° Dans les expériences de minéralisation à l'étuve, les horizons de surface, riches en éléments peu décomposés, apparaissent comme beaucoup plus actifs que les horizons profonds: donc, les débris organiques peu transformés se minéralisent plus vite que l'humus colloïdal.

2° Dans les recherches effectuées sur le terrain, nous avons pu noter l'existence de deux phases: une phase de disparition totale de l'horizon A₀ du Mor superficiel, qui semble très rapide; puis, une phase de minéralisation plus lente des acides humiques formés.

La conclusion qui s'impose est la suivante: La matière organique fraîche est plus active — ou tout au moins plus facile à activer — que la matière organique ancienne très transformée, celle où dominent les complexes humiques de synthèse. Cette conclusion est conforme à celle d'autres auteurs, notamment BARRIER (1951) et HENIX et DUPUIS (1945); ces derniers, en particulier, ont montré que la matière organique fraîche, incorporée au sol, perdait 60 % de son poids en deux ans. Le résidu humique se minéralise ensuite très lentement (1,5 à 2 % par an).

Ces considérations vont nous permettre de dresser le schéma très général suivant, relatif à la décomposition de l'humus dans les sols forestiers.

SCHEMA GÉNÉRAL DE LA DÉCOMPOSITION DES HUMUS



Ce schéma montre nettement les deux phases de la décomposition de l'humus :

1^o phase de minéralisation (plus ou moins) active de la matière organique fraîche, non incorporée, ou incomplètement incorporée au sol (horizons A₀ et A₁) ; en même temps, baisse du rapport C/N par libération de CO₂ plus importante que celle de NH₃ et synthèse d'acides humiques ;

2^o phase de minéralisation beaucoup plus lente des acides humiques formés ; ceux-ci, étant colloïdaux, se mélangent au sol minéral.

En réalité, il existe, suivant les types d'humus, de grandes variations dans la rapidité de la première phase : Lorsque toutes les conditions, tant internes (C/N des débris élevés) qu'externes (microclimat froid et humide) sont défavorables, elle peut être considérablement freinée, comme c'est le cas de la plupart des *Mor*. Mais nos recherches ont montré qu'il était presque toujours possible de l'accélérer artificiellement ; il n'en est pas de même de l'humus incorporé, qui apparaît d'autant plus inerte qu'il est plus profond.

2^o Comparaison des types d'humus forestiers et de leur activité

Il semble que les types d'humus forestiers diffèrent entre eux par deux facteurs fondamentaux :

1^o d'une part, par la vitesse de minéralisation, de la matière organique fraîche ; elle peut d'ailleurs être modifiée, dans la majorité des cas, par les actions stimulantes, telles que la chaleur et les radiations, ainsi que nous l'avons montré ;

2^o d'autre part, par la nature et la quantité d'acides humiques synthétisés : alors que le Mull est caractérisé par la formation d'une petite quantité d'acides humiques, l'humus calcique est beaucoup

plus riche en complexes de néoformation. Les acides humiques provenant du Mor sont au contraire des complexes résiduels, pauvres en azote.

On peut alors définir les caractères fondamentaux des 3 grands types d'humus forestiers, de la façon suivante :

a) L'HUMUS CALCIQUE (formé en milieu riche en calcium) ; c'est le « Mull type pelouse » des auteurs américains (PIERCE 1951) ; le « Kalkinull » de HARTMANN (1952).

Dans les conditions naturelles, la matière organique fraîche, sur substratum calcaire, est en général active, elle se minéralise très vite ; on n'observe pas d'horizon A₀ exclusivement organique en surface (sauf exception étudiée ci-dessous). Par contre, l'humus calcaire est peu sensible à l'activation par la chaleur, comme le prouvent les essais de minéralisation à l'étuve. En outre, au cours de la minéralisation, on observe la *production, par synthèse microbienne, d'une grande abondance d'acides humiques riches en azote*, qui, sous l'influence du brassage exercé par l'activité animale intense, imprègnent la totalité du profil des rendzines, jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 20 à 30 cm ; ces acides humiques, saturés de calcium, sont peu activables et ils se minéralisent lentement, malgré leur faible rapport C/N (8 à 10). Mais ils jouent un rôle important par leurs propriétés absorbantes des ions ; en outre, ils constituent le ciment des agrégats, très stables, caractéristiques des rendzines, et confèrent au sol une très bonne structure ; ils sont, en effet, beaucoup moins « mobiles » que les complexes résiduels formés par la décomposition du Mor.

b) LE MULL OU HUMUS DOUX : Humus faiblement acide et partiellement désaturé, à rapport C/N faible. Ce type d'humus se minéralise de façon satisfaisante, même si les conditions extérieures ne sont pas très favorables ; *la rapidité de la minéralisation, dans les conditions naturelles, est un des caractères essentiels du Mull.*

En outre, le Mull fabrique peu d'acides humiques : le taux de matière organique des horizons minéraux du profil reste faible : seul l'horizon A₁ contient 4 à 5 % de matière organique, sur une épaisseur de quelques centimètres ; en dessous, on n'observe que des traces de matière organique. Les sols bruns forestiers à Mull sont donc des sols dont un des caractères est la pauvreté en matière organique du profil, si l'on excepte quelques centimètres en surface.

Ces acides humiques paraissent être floclés de façon instable et toute influence extérieure nuisible (hydratation brutale, diminution d'activité biologique, etc...) favorise leur dispersion. Etant peu abondants, ils ne provoquent pas la podzolisation, mais un entraînement modéré des colloïdes, argile et fer : c'est le phénomène de lessivage.

c) LE MOR OU HUMUS BRUT: Humus très acide, à rapport C/N élevé. Cet humus est normalement peu actif et sa minéralisation est peu intense; il doit précisément ses caractères physico-chimiques essentiels à la lenteur de sa décomposition (horizon A₀, exclusivement organique, épais, non mélangé au sol minéral); *mais il est presque toujours possible de l'activer*, en modifiant les conditions extérieures dans un sens favorable, par l'intervention de la chaleur et des radiations solaires.

Le Mor donne naissance à des acides humiques d'origine résiduelle, pauvres en azote, tout à fait inertes et résistants aux actions stimulantes; leur rapport C/N oscille entre 16 et 20: ce sont les complexes lignine-protéine (WAKSMAN 1936) très dispersés, qui migrent en profondeur, en entraînant les oxydes de fer et d'aluminium, et en provoquant ainsi le phénomène de podzolisation (D. 1948 — HENIN et BETREMIEUX 1950 — BETREMIEUX 1951).

Entre ces différents types fondamentaux, il existe évidemment des intermédiaires: à un pH 5, on trouve des types d'humus à C/N très variable, se rapprochant tantôt du Mor, tantôt du Mull (*Duff Mull* — LAFOND 1950 et WILDE 1951 et 52; *Sauermull* de HARTMANN 1952).

Sur les sols calcaires ayant subi une décarbonatation par lessivage, à pH compris entre 6 et 7, les propriétés du Mull se rapprochent de celles de l'humus calcique: cet humus est caractérisé par d'abondants acides humiques presque saturés, qui conservent au sol la structure de la rendzine (sols rendziniformes — D. 1950).

Le cas le plus intéressant est celui du Mor reposant sur un substratum calcaire (rendzine dégradée, cf. sol étudié à Grand): il résulte d'un ensemble de conditions de milieu défavorables à la vie microbienne, ce qui ralentit la décomposition de la matière organique fraîche. Ce type d'humus brut est fréquent en montagne, sous les peuplements de conifères, donnant des débris à rapport C/N élevé. Dans les horizons minéraux, situés sous l'horizon A₀, les acides humiques produits se saturent de calcium, comme dans une rendzine. *L'activation* de cet humus brut, par l'insolation, aboutit à la formation d'un humus calcique incorporé au sol minéral, qui est peu actif.

Pour bien marquer les différences de nature et de propriétés qui existent entre les divers acides humiques, les auteurs allemands (SCIEFFER et WELTE, 1950 — SPRINGER, 1952) les ont désignés par des noms différents.

Les acides humiques formés en milieu calcaire sont les *acides humiques gris*: ils sont, en général, à l'état flocculé en liaison avec l'argile. Ceux, plus dispersés, qui ont pris naissance en milieu acide, sont les *acides humiques bruns*.

En milieu très acide, la lignine, peu transformée, forme les complexes « lu molignine », très mobiles, agents essentiels de la podzolisation.

On peut essayer d'établir, de la façon suivante, la correspondance entre les faits rapportés dans ce mémoire et les résultats des recherches effectuées à l'étranger.

- Humus calcique : acides humiques gris abondants — riches en azote — à l'état floculé.
- Mull : acides humiques bruns peu abondants — moyennement dispersés (floculation instable).
- Mull passant au Mor : acides humiques bruns dispersés, assez abondants
- Mor : complexes à base de lignine, très pauvres en azote et très mobiles (humolignine, complexes lignine-protéine) — ils provoquent la podzolisation.

La conclusion, qui se dégage de ces différentes considérations, est la suivante : la valeur d'un humus forestier n'est pas liée à son abondance dans le sol, bien au contraire ; *elle dépend de la facilité avec laquelle l'azote est rendu assimilable, au cours de la minéralisation de l'humus* ; ainsi, le type d'humus le meilleur est le *Mull*, parce que c'est lui qui est le plus pauvre en complexes humiques inactifs et qui fournit, le plus rapidement, son azote à la nutrition des plantes. On peut rapprocher cette constatation de celle de WILDE (1951) : « Ce n'est pas au taux élevé de matière organique qu'on mesure la richesse du sol, car alors il s'agit le plus souvent de complexes résiduels, mais sans valeur fertilisante ».

V. — LES APPLICATIONS PRATIQUES MÉTHODES D'ACTIVATION ARTIFICIELLE DE L'HUMUS FORESTIER

C'est surtout le problème de l'*activation du Mor* qui se pose au sylviculteur, tout particulièrement à l'occasion des régénérations et des travaux de repeuplement : le Mor constitue, en effet, un obstacle à la germination des essences forestières ou à la reprise des plants : la stimulation de sa minéralisation permet non seulement d'éliminer cet obstacle, mais de fournir aux jeunes semis une alimentation azotée abondante.

Il convient d'envisager deux phases dans l'évolution de l'humus d'un peuplement, telle qu'elle doit se produire sous le contrôle du forestier : la *phase préparatoire*, agissant à longue échéance, aura pour but d'améliorer très progressivement les conditions de l'humus, de façon que, le moment venu, il puisse réagir avec le maximum d'efficacité aux agents stimulants. La *phase d'activation proprement dite* interviendra ensuite, de manière beaucoup plus rapide et plus brutale.

1° Phase préparatoire. — Amélioration progressive de l'humus, à l'ombre du couvert

Cette phase a pour but de modifier lentement les propriétés de l'humus, pendant les périodes d'amélioration (donc le peuplement restant fermé), de façon qu'il puisse acquérir le maximum de sensibilité à l'activation par les coupes : il s'agit également d'éviter que, pendant ces périodes, des acides humiques produits en trop grande abondance ne provoquent la dégradation du sol par podzolisation (D. 1918). L'intervention du forestier s'impose notamment lorsque le Mor présente des caractères défavorables très accentués, qui, nous l'avons vu à propos des expériences de minéralisation à l'étuve, limitent sa réponse à la stimulation par la chaleur : c'est-à-dire, *lorsque le Mor offre un pH inférieur à 4,5 et un rapport C/N supérieur à 25* ; le forestier doit alors s'efforcer, en utilisant des méthodes appropriées, d'élever le pH (c'est-à-dire le taux de saturation en bases échangeables), au moins jusqu'à une valeur voisine de 5, et d'abaisser le rapport C/N jusqu'aux environs de 20.

Dans ce but, il devra agir surtout sur la source de *matières organiques*, c'est-à-dire sur la composition du peuplement lui-même et du sous-bois. Il convient de proscrire à tout prix les *peuplements de résineux à l'état pur*, ou les *peuplements résineux à sous-bois d'Ericacées*, qui sont, dans la généralité des cas, responsables de la formation des Mor, à propriétés très défavorables : en Suède, TAMM (1950) a signalé que l'humus brut, formé dans ces conditions, était difficile à activer par les coupes.

Il existe donc deux moyens d'améliorer l'état de l'humus de résineux : l'un qui consiste à agir sur le peuplement, en favorisant le mélange d'essences résineux-feuillus, notamment par la création de sous-étages feuillus ; l'autre qui a pour but de modifier la végétation herbacée et le sous-bois.

Il est inutile de revenir longuement sur l'effet améliorant des sous-étages de feuillus, ou des peuplements mixtes, à l'égard de l'humus, le problème ayant été traité ailleurs (D. 1948 et 1950) ; qu'il suffise de rappeler que le mélange de débris d'origines variées favorise toujours l'activité microbienne, même si, pris séparément, ces débris sont difficilement décomposables : un exemple caractéristique est celui des sapinières vosgiennes : les sapinières mixtes (à Hêtre) offrent un humus moins acide que celui des sapinières pures et, souvent même, que celui des hêtraies pures.

Il convient également de mentionner les possibilités d'action, par l'intermédiaire de la végétation herbacée et du sous-bois qui couvrent le sol : il faut faire la guerre aux Ericacées. Bruyères en plaine, *Vaccinium* et *Rhododendron* en montagne, car elles acidifient considérablement le sol ; le sous-étage feuillu joue, là encore, un rôle éminemment utile, en interceptant les radiations lumineuses indispensables à l'installation et à la propagation des espèces.

Chaque fois que ce sera possible, on pourra favoriser le développement des Légumineuses, fixatrices d'azote (Lupin, divers Genêts), ou à défaut d'une pelouse composée de Légumineuses et de Graminées en mélange (pelouse pâturée), à l'exclusion, bien entendu, des espèces de Graminées sociales très nuisibles (*Agrostis alba* et *canina*, *Molinia coerulea*). C'est ce qui a été réalisé dans certains « prés-bois » de montagne, dans lesquels l'humus est toujours d'excellente qualité. Nous avons montré, dans une étude antérieure (D. 1952), que les sols de prés-bois de Mélèze des Alpes restent à l'état de sols bruns peu acides, alors que les sols de mélèzeins à tapis d'Ericacées sont caractérisés par une acidification et une podzolisation accentuées. Voici, à titre d'exemple, une comparaison de sols provenant de deux stations très voisines (à 50 m l'une de l'autre), dans la forêt de St-Dalmas-le-Selvage (Alpes-Maritimes), l'une occupée par la pelouse, l'autre par une lande à Rhododendron : les horizons comparés sont les horizons A₁.

TABLEAU 7

Numéro du sol	1	2
Végétation	Ericacées (Rhodo.)	Pelouse
Type de sol	Podzol	Sol lessivé
Type d'humus	Mor épais (A ₀ : 15 cm)	Mull peu épais (pas de A ₀)
pH	(A ₀) 3,8 - (A ₁) 4,5	5,4
C	9,8	4,5
N total	0,31	0,45
C/N (A ₁)	31	10
Indice d'entraînement du fer (B/A ₀)	4,4	2,7

Ainsi, le rapport C/N, sous la pelouse, a été abaissé des 2/3, dans l'horizon A₁, par rapport à celui de la lande voisine. La différence eût été, bien entendu, encore plus forte, si nous avions comparé l'humus du sol n° 2, à l'horizon A₀ du sol n° 1. On constate, en outre, que les acides humiques du sol n° 1 jouent un rôle important dans la podzolisation du profil, comme le montre l'indice d'entraînement du fer libre, qui est très élevé.

Les avantages d'un tapis herbacé, constitué par la pelouse, sont donc incontestables; il comporte cependant l'inconvénient grave d'exercer une concurrence active, pour la nutrition en eau, à l'égard des semis; lors des périodes de régénération, il est souvent nécessaire de le détruire, par décapage ou crochetage (FOURCHY 1952 - D. 1952).

2° Activation du Mor proprement dite

En dehors de l'activation par la chaleur et par les radiations, l'emploi des amendements (chaulage) permet également de relever le pH et de donner un coup de fouet à l'activité bactérienne.

a) ACTIVATION PAR LES COUPES

L'effet stimulant des coupes sur la minéralisation de l'humus est d'autant plus marqué que le contraste microclimatique créé est lui-même plus accentué: il semble qu'il s'agisse là de la conséquence d'un phénomène de *thermopériodisme*, semblable à celui qui a été constaté au cours de certaines expériences de minéralisation à l'étuve (D. 1951). Pour que ce contraste soit maximum, il convient donc de laisser le sol à l'ombre, pendant toute la durée de la période

d'amélioration : dans ce but, le sous-étage feuillu sera soigneusement maintenu, afin de jouer le rôle d'écran, les éclaircies devant être pratiquées surtout dans l'étage dominant. Lors des coupes de régénération, au contraire, l'enlèvement complet du sous-étage et d'une partie de l'étage dominant vient éclairer brusquement un humus, qui s'est édifié lentement à l'ombre, et provoque sa minéralisation très rapide.

Cette phase de minéralisation est éminemment favorable à l'installation du semis, gros consommateur d'azote minéral ; mais il importe de souligner le *caractère éphémère de cette période propice à la régénération* : très rapidement, en effet, si le sol reste dénudé, une *phase défavorable* d'évolution de la végétation et du sol lui succède. Sous l'influence de la grande quantité d'azote minéral fourni, une végétation nitratophile luxuriante envahit le sol et la concurrence pour l'eau devient alors telle qu'aucun semis ne peut plus prendre place : en outre, sur les roches-mères siliceuses et pauvres en bases notamment, la destruction totale de l'humus neut, dans un avenir plus ou moins lointain, déclencher une évolution du sol forestier particulièrement nuisible, si elle n'est pas rapidement freinée : l'humus constituant, en effet, l'essentiel du ciment des agrégats, ceux-ci sont partiellement détruits, ce qui provoque une dégradation de la structure, un tassement du sol : dans les stations drainées, le risque de l'acidification et de la podzolisation est alors grand, tandis que dans les stations mal drainées, c'est le relèvement du plan d'eau et l'évolution vers la formation d'un sol de tourbe et de Gley, qui est à craindre (D. 1948).

Le sylviculteur devra donc s'efforcer d'obtenir la régénération par des moyens naturels ou artificiels — avant que ne débute cette période d'évolution défavorable : *il est donc essentiel que le sol ne reste pas dénudé trop longtemps et que la régénération puisse être acquise le plus rapidement possible.*

Ainsi, l'évolution de l'humus, dans les sols forestiers, doit comporter une sorte de cycle parallèle au cycle d'évolution du peuplement lui-même : à une phase d'édification lente d'un humus épais et faiblement décomposé, se poursuivant à l'ombre, pendant la période de croissance du peuplement, doit succéder une phase de minéralisation intense, consécutive aux coupes de régénération : mais cette période de destruction partielle de l'humus doit faire place, très rapidement, à une nouvelle phase de formation de matière organique, sous peine de voir le sol forestier se détériorer de manière grave.

b) INCINÉRATION DE L'HUMUS BRUT

Nous avons vu que cette méthode était particulièrement efficace et stimulait remarquablement la minéralisation de la partie de l'hu-

mus qui n'est pas brûlée : dans les Landes de Gascogne, les semis de Pin maritime s'installent toujours avec une grande abondance sur les surfaces incendiées. Mais il est évident que la mise en œuvre de cette méthode soulève de graves difficultés et qu'elle n'est applicable qu'à des cas particuliers, landes à Ericacées ou surfaces mises à nu après coupe rase ; en outre, elle est dangereuse et risque de provoquer l'incendie des peuplements environnants. Dès lors, elle ne doit être pratiquée que dans des circonstances de saisons, de météorologie favorables, sous la surveillance d'un personnel spécialisé. De plus, il ne faut pas oublier que la combustion doit nécessairement être incomplète et n'affecter qu'une petite portion de la couche d'humus brut, de façon à limiter les pertes d'azote gazeux. Il importe donc de mettre soigneusement au point la technique de l'incinération, en l'expérimentant dans chaque région où elle doit être pratiquée. Mais, dès maintenant, on peut affirmer le grand intérêt pratique de cette méthode, surtout applicable à la préparation des sols de landes, en vue de leur reboisement.

c) LES AMENDEMENTS ET LE CHAULAGE

Peu utilisé en France, le procédé d'activation de l'humus acide par chaulage a été, par contre, largement employé à l'étranger, notamment en Allemagne. Dans ce pays, des expériences de longue durée (42 ans), faites en placettes d'essais et portant sur l'amélioration de l'humus brut, ont été entreprises par divers expérimentateurs : leur résultat a été récemment rapporté par WITTICH (1952). Le chaulage s'est avéré un procédé très efficace, lorsqu'il est employé conjointement avec d'autres méthodes, principalement l'introduction de sous-étages de feuillus, travail du sol, culture de Légumineuses ; le sous-étage de Hêtre, en particulier, n'a produit aucune amélioration de l'humus de Pin sylvestre, lorsqu'il a été utilisé seul ; après un chaulage initial, au contraire, il a permis la transformation progressive d'un Mor en Mull, après 40 années de croissance des peuplements.

Signalons également que, dans le Yorkshire, DIMBLEBY (1952) a constaté la même influence favorable de la chaux, sur l'évolution d'un sol podzolique de lande à Callune : la couche d'humus brut disparaît et le pH passe de 3,4 à 5,3.

Nous avons comparé la minéralisation à l'étuve, d'échantillons d'humus brut (sol n° 17), additionnés de 5 % de carbonate de chaux très fin, à des échantillons témoins et les résultats se sont montrés nettement positifs en faveur des premiers : ainsi, au printemps de 1952, si le taux de minéralisation maximum obtenu n'a pas sensiblement dépassé celui du témoin (25 %), du moins a-t-il été atteint beaucoup plus rapidement, *dès la première semaine, au lieu de la cinquième semaine pour le témoin*. En été, non seulement le rythme de la minéralisation du sol chaulé a été fortement accéléré,

mais le taux atteint a presque doublé par rapport au témoin (20,5 au lieu de 11,7). Voir, à ce sujet, les courbes de minéralisation de la fig. 6.

On peut donc admettre que la pratique du chaulage est efficace, surtout si elle est employée conjointement avec d'autres méthodes d'amélioration, notamment le *travail du sol* (d'ailleurs nécessaire pour incorporer l'amendement) (BÜRGER 1952). Cependant, ce procédé ne doit pas être mis en œuvre de manière inconsidérée et sans précautions: en effet, *il paraît hors de doute qu'un chaulage excessif peut être nuisible à l'évolution du sol*. En particulier, le relèvement du pH, qu'on peut escompter de cette opération, doit

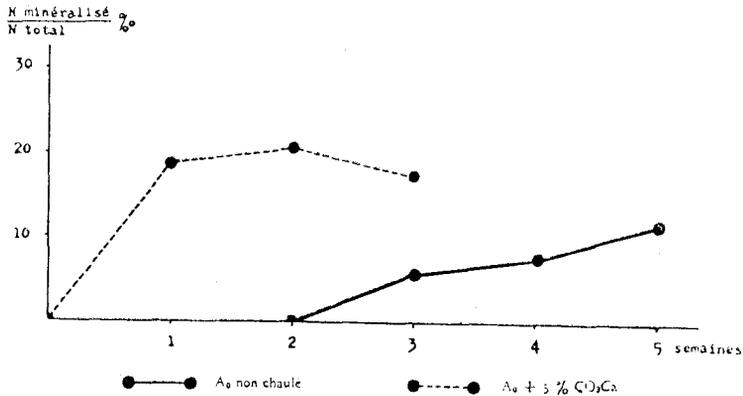


FIG. 6.

Effet du chaulage sur un horizon A₀ de Mor (n° 17).
Courbes de minéralisation - Été 1952.

rester modéré: si la quantité de chaux utilisée excède les possibilités de fixation par le complexe absorbant, le milieu devient rapidement très alcalin. Certains acides humiques peuvent alors se disperser et provoquer une recrudescence de lessivage. Ce phénomène a été nettement mis en évidence par les expériences de MATTSON (1946). En outre, il s'explique aisément, si l'on se rappelle que les acides humiques n'offrent pas les mêmes propriétés, lorsqu'ils sont formés en milieu calcaire (humus calcique des rendzines) ou en milieu acide (acides humiques des sols podzoliques): nous avons signalé leur différence de solubilité dans la soude. En outre, alors que les premiers se trouvent normalement floculés en milieu alcalin, il n'en est pas de même des seconds, qui peuvent se disperser partiellement, à pH supérieur à 7, même s'ils ont été artificiellement saturés en calcium (MATTSON 1946).

Pour cette raison, il est prudent, lorsqu'on pratique un chaulage, de ne pas dépasser un pH final de 5,5 à 6, qui convient d'ailleurs mieux à la vie bactérienne et à la nutrition des plantes qu'un pH 7. Aussi, les doses et la nature de l'amendement doivent-elles être adaptées au type de sol: par exemple, en milieu très « tamponné », riche en argile et en humus, on peut utiliser la chaux jusqu'à la dose de 8 tonnes à l'ha. En milieu sableux, à faible capacité d'échange, il conviendra de ne pas dépasser la dose de 1,5 tonne à l'ha; pour ces sols légers, il sera, en outre, préférable de remplacer la chaux, dont l'action brutale est toujours dangereuse pour la végétation — surtout lorsqu'elle est insuffisamment incorporée — par un amendement plus doux à *action progressive*, tel que le carbonate pulvérisé ou la marne.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce mémoire a pour but d'exposer les résultats obtenus au cours de recherches comparatives, portant sur les procédés d'activation de l'humus forestier par la chaleur, et effectuées conjointement au laboratoire et sur le terrain. Au laboratoire, la *minéralisation* à l'étuve à 30°, c'est-à-dire la vitesse de formation d'azote ammoniacal et nitrique, a été étudiée pour plusieurs types d'humus forestiers, prélevés à différentes saisons. Sur le terrain, les recherches ont porté, d'une part, sur l'effet des coupes, qui stimulent l'activité microbienne par l'augmentation de l'intensité des radiations ainsi provoquée; d'autre part, sur l'influence d'une incinération partielle de la matière organique d'un sol de landes.

1° MINÉRALISATION A L'ÉTUVE A 30° DES HORIZONS DE SURFACE

Ces expériences ont permis de caractériser chaque échantillon d'humus par le taux de minéralisation, N minéral libéré/N total ‰, obtenu en 5 semaines. L'humus le plus sensible à l'activation par la chaleur n'est pas l'humus neutre ou très peu acide (pH 6-7), donc presque saturé en ions calcium. En ce qui concerne les prélèvements d'été, la minéralisation maxima est obtenue pour le Mull à pH 5,5; pour le prélèvement de printemps, elle est nettement déplacée vers l'acidité et elle s'observe pour les Mor encore modérément acides (pH 4,5 à 5) et à rapport C/N inférieur à 25.

Ainsi, l'humus brut est facilement activable par la chaleur: d'où l'idée d'utiliser, en forêt, deux méthodes d'activation, l'une faisant appel aux radiations solaires, l'autre à l'action du feu par la pratique de l'incinération.

2° MINÉRALISATION DES HORIZONS PROFONDS

Les horizons profonds, toujours plus riches en complexes humiques colloïdaux que les horizons de surface constitués en majeure partie par de la matière organique incomplètement décomposée, se montrent inertes et pratiquement inactivables par la chaleur.

3° RECHERCHES SUR LE TERRAIN, CONCERNANT L'INFLUENCE DES COUPES

Ces recherches ont été effectuées à la faveur de trouées de chablis, permettant de suivre les étapes de la minéralisation de l'hu-

mus, suivant l'ancienneté de la trouée: on constate une disparition totale de l'horizon A_0 de surface, même s'il atteint 10 cm d'épaisseur, à la suite d'une minéralisation intense. Par contre, le taux d'humus colloïdal incorporé, provenant de réactions de synthèse microbienne, diminue très peu ou même augmente légèrement au début: au cours de la minéralisation de l'horizon de Mor, il y a donc production d'acides humiques à minéralisation plus lente.

4° RECHERCHES SUR LE TERRAIN CONCERNANT LES EFFETS DE L'INCINÉRATION

Elles ont été effectuées dans les Landes et dans les Cévennes, sur des surfaces incendiées, et ont mis en évidence une production importante d'azote minéral; seule, une partie de l'azote total est perdue (20 à 50 %), le reste est donc rapidement minéralisé; la comparaison des rapports N minéral/N total montre l'action identique des deux procédés, utilisation des radiations et incinération, sur l'évolution de l'humus.

5° INTERPRÉTATION D'ENSEMBLE

Nous avons pu déduire de ces recherches que la *matière organique fraîche*, constituée en majorité de débris organiques incomplètement décomposés (horizon A_0), était généralement facile à activer par la chaleur, même si dans les conditions naturelles, à l'ombre notamment, elle se décompose très lentement; elle constitue alors une source d'azote assimilable précieuse qu'il convient d'utiliser au maximum au moment des régénérations.

Par contre, les acides humiques, synthétisés par l'activité microbienne (rendzines), ou d'origine résiduelle (complexes lignineprotéine des sols podzoliques), s'incorporent progressivement aux horizons minéraux, s'ils sont abondants, soit par brassage (rendzines), soit par migration (podzols). Bien que ces deux types d'acides humiques manifestent des propriétés physico-chimiques entièrement différentes (les premiers, riches en azote, sont plus faciles à flocculer que les seconds et pratiquement insolubles dans la soude diluée), ils offrent en commun la propriété d'être peu sensibles à la stimulation par la chaleur, donc pratiquement inertes. Rappelons que les premiers constituent d'excellents ciments des agrégats caractéristiques des rendzines, alors qu'au contraire les seconds, beaucoup plus mobiles, favorisent le lessivage du fer et la podzolisation.

6° APPLICATIONS A LA SYLVICULTURE

Les applications de ces recherches sont multiples; elles intéressent le sylviculteur autant que le reboiseur.

En sylviculture, il convient de « préparer » l'humus en favori-

sant, grâce à l'ombre du couvert et à l'apport de débris d'origines variées, l'accumulation en surface d'un humus incomplètement décomposé, pouvant présenter par la suite la sensibilité maxima à l'activation par la chaleur. Les moyens sont variés : sous-étage feuillus, dans les peuplements de résineux, culture de Légumineuses fixant l'azote atmosphérique, dans certains cas particuliers (pré-bois), pelouse constituée par un mélange de Graminées et de Légumineuses ; non seulement l'humus se minéralisera ensuite très vite le moment venu, mais on évitera ainsi toute évolution nuisible du sol (podzolisation).

Ensuite, en période de régénération, la décomposition rapide de l'humus, relativement peu acide ainsi préparé (minimum pH 5), sera obtenue lors des coupes, d'autant plus facilement que le contraste avec l'état ombragé antérieur sera plus marqué.

Pour les reboisements de lande, la pratique de l'incinération est à conseiller, à condition que la technique soit préalablement mise au point et qu'aucune des précautions qui s'imposent ne soit négligée.

Un chaulage modéré et proportionné aux possibilités d'absorption de la capacité d'échange, donc permettant d'élever le pH jusque vers 5,5 à 6 au maximum, est susceptible de compléter utilement ces deux procédés d'activation par la chaleur.

Rappelons pour mémoire que le *Travail du sol*, grâce au mélange des horizons humiques et minéraux qu'il favorise, est aussi un moyen efficace d'accélérer la décomposition de la matière organique.

Janvier 1953.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLISON (F.), SHERMAN (M.), PINCK (L.). — Maintenance of soil organic matter. Inorganic soil colloid as a factor in retention of carbon during retention of humus. *Soil Sc.*, 1949, pp. 463-478.
- ANNE. — Dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann Agr.*, 2, 1945, p. 161 à 172.
- BACH (R.). — Die Standorte jurassischer Buchenwaldgesellschaften mit besonderer Berücksichtigung der Böden (Humuskarbonatböden und Rendzina). *Thèse*. Edit. Buehler, Berne, 1950, 153 p.
- BARBIER (G.). — Essai de mise au point de la question de l'humus. *Bull. Techn. d'information*, 41, 1949, p. 319 à 327.
- Application de nos connaissances sur l'humus à l'amélioration des méthodes culturales. *Bull. Ass. Fr. Etude Sol*, n° 17, janvier 1951.
- BEL (B.), DENIZOT (H.), MATHIEU (G.). — Etude de quelques sols caractéristiques de la région de Dijon. *Ann. Agr.*, n° 2, 1952, p. 191-206.
- BETREMIEUX (R.). — Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agr.*, n° 3, 1951, p. 193 à 295.
- BLACK (C.-A.), NELSON (L.-B.), PRITCHETT (W.-L.). — Nitrogen utilisation by wheat as affected by rate of fertilisation. *Soil Sc. Amer. Proc.*, 1946, p. 393-396.
- BORDAS. — Etat humique des sols calcaires. Utilisation de la méthode de CHAMINADE. *Ann. Agr.*, 3, 1948, p. 314-315.
- BURGER (H.). — Bodenverbesserungsversuche. *Mitt. der schweiz. Anst. für das forstliche Versuchsw.*, p. 11-85, XXVIII, Zurich, 1952.
- CHAMINADE (R.). — Recherches sur le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. Influence de l'humus sur la nutrition minérale des végétaux. *Ann. Agr.*, t. 1, 1952, p. 95 à 104.
- CHAMINADE (R.) et BLANCHET (R.). — Action de l'humus colloïdal sur la nutrition minérale des végétaux. *C. R. Ac. Sciences*: 1, t. 233, 12, 1951, p. 1486-8; 2, t. 234, 2, 1952, p. 878-9.
- DIMBLEBY (G.-W.). — Soil regeneration in the nord-east Yorkshire Moors. *Journal of Ecology*, vol. 40, n° 2, 1952, p. 332-341.
- DROUINEAU (G.) et LEVÈVRE (G.). — Nouvelles conceptions sur la dynamique de l'azote dans les sols. *C. R. Ac. Agr. Fr.*, 4 mai 1949, p. 1 à 3.
- — Première contribution à l'étude de N minéralisable dans les sols. *Ann. Agr.*, n° 4, 1949, p. 518 à 536.
- — Variations saisonnières de la teneur en azote minéral dans un sol calcaire soumis au climat méditerranéen.
- DUCHAUFOUR (Ph.). — Recherches écologiques sur la Chênaie atlantique française. *Ann. Ec. Nat. Eaux et Forêts*, t. XI, fasc. 1, 1948, 322 p.
- L'humus forestier et les facteurs de sa décomposition. *Rev. For. Franç.*, septembre 1950, p. 479-488.
- Recherches sur l'évolution des sols calcaires en Lorraine. *Ann. Ec. Nat. Eaux et Forêts*, t. XII, fasc. 1, 1950, p. 98-153.
- Note sur les types d'humus forestiers et leur rapport carbone/azote. *Trans. of the Intern. Congr. of Soil Sc.*, vol. II, Amsterdam, 1950, p. 108-111.
- Sur la minéralisation de l'azote dans les humus forestiers. *C. R. Ac. Agric. de France*. Séance 21 nov. 1951.

- Recherches sur l'écologie et la sylviculture du Mélèze. II. Pédologie et facteurs biotiques. *Ann. Ec. Nat. Eaux et Forêts*, t. XIII, 1952, p. 132-203.
- De l'influence de la chaleur et des radiations sur l'activation de l'humus forestier. *Rev. For. Franç.*, mars 1953, p. 204-212.
- FORSYTH (W.-G.). — The characterization of the humic complexes of soil organic matter. *J. Agric. Sci.*, 37, 1947, p. 132-138.
- FOURCHY (P.). — Recherches sur l'écologie et la sylviculture du Mélèze. I. — Ecologie du Mélèze. *Ann. Ec. Nat. Eaux et Forêts*, t. XIII, 1952, p. 1-132.
- FREI (E.). — Morphologische, chemische und kolloid — chemische untersuchung subalpiner Weide, und Waldböden der Rendzina und der Podzolserie. Mitt. aus dem Agrikultur-chemisch. *Inst. des eidgen. techn. Hochsch.*, Zürich, 1944, p. 267 à 346.
- GROSS (R.-A.). — The composition and classification of forest floors and related soil profiles in Saskatchewan. *Scientif. Agric.*, vol. 26, n° 12, déc. 1946.
- HARMSSEN et LINDENBERGH. — Investigations on the nitrogen nutrition of plants. *Plant and Soil*, vol. II, 1949.
- HARTMANN (F.). — Forstökologie. *Verlag Fromme*, Vienne, 1952, 460 p.
- HENIN (S.) et BETREMIEUX (R.). — Essai de pédologie expérimentale. *Fourth Intern. Congress of Soil Sc. Transactions*, vol. 1, 1950, p. 149-151.
- HENIN (S.) et DUPUIS (J.). — Bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agr.*, t. 15, 1945, p. 17-29.
- HESSELMAN (H.). — Studier over barrskogens humusstacke dess egenskaper och beroende av Skogsvarden. *Meddel. fran Statens Skogsforsöksanst.*, fasc. 22, n° 5, Stockholm, 1926.
- LAFOND (A.). — Morphology and specific conductance of forest humus and their relation to the rate of forest growth in Wisconsin. *Transactions of the Wisconsin. Ac. of Sc., Arts and Letters*, vol. X, part. I, 1950, p. 207-211.
- MATTSON (S.). — Effets d'un chaulage excessif sur les sols lessivés acides. *Lantbrukshögsk. Ann. Sverige*, 13, 1946.
- MICHAEL et WILBERG. — Bedeutung des Stickstoffs in Humifizierung Vorgang. *Zeitschrift f. Pflanzenernährung*, t. 51, 2, Berlin, 1950, p. 97-102.
- MULLER (P.-E.). — Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur la végétation et le sol (traduit par GRANDEAU, Nancy, 1889).
- ODIN (A.), AUBERT (G.), DUCHAUFOUR (Ph.). — Notice de la carte pédologique de France, quart N.-O. Nancy, 1952.
- PIERCE (R.-S.). — Prairie like Mull Humus, its physico-chemical and microbiological properties (A contribution to the classification of forest humus). *Soil Sc. Soc. of Amer. Proc.*, vol. 15, 1951, p. 362-364.
- PINCK (L.), ALLISON (F.), SHERMAN (M.). — Maintenance of soil organic matter. Losses of carbon and nitrogen from young and mature plant materials during decomposition in soil. *Soil Sc.*, 1950, p. 391-403.
- FRITCHETT (W.-L.), BLACK (C.-A.), NELSON (L.-B.). — Mineralizable nitrogen in soils in relation to the response of oats to nitrogen fertilisation. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 1947, p. 327-331.
- RICHARD (F.). — Die biologische Abbau von Zellulose und Eiweiss Testschnüren im Boden von Wald und Rasengesellschaften. *Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchsw.*, XXIV, 1945, p. 295 à 397.
- ROMMEL (L.-G.). — Ecological problems of the humus layer in the forest. *Ithaca N. Y. University*, M. 170, 1935.
- SCHAEFFER et WELTE. — Die Anwendung der Absorptions-spektrographie in der Humusforschung. *Zeitschrift für Pflanzenern.*, 48, 1950, p. 250-263.

- SCHMUTZIGER (A.). — Über die Verteilung und den Chemismus der Humusstoffe in den Profilen einiger schweizerischen Bodentypen. *Diss. B. T. H.*, 1935.
- SPRINGER (U.) et LEHNER (A.). — Stoffabbau und Humusaufbau bei der aeroben und anaeroben Zersetzung landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich wichtiger organischer Stoffe I et II. *Zeitsc. f. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*. Berlin, 1952, p. 1-27 et 193-231.
- SPRINGER (U.). — Humus und Bodenfruchtbarkeit. *Zeitsc. f. Pflanzenbau u. Pflanzenschutz*, 1952, p. 58-63.
- TAMM (O.). — Northern coniferous forest soils. *The Scrivener Press, Oxford*, 1950, 253 p.
- TROCME (S.) et BARBIER (G.). — Observations sur les propriétés colloïdales d'acides humiques d'origine diverse. *Ann. Agr.*, t. XVII, 1947, p. 346 à 363.
- WAKSMAN (S.-A.). — Humus. (Edit. Williams and Willkins Baltimore, 1930, 526 p.).
- WILDE (S.-A.). — Crypto-Mull humus: its properties and growth effects. (A contribution to the classification of forest humus). *Soil Sc. Soc. of Amer. Proc.*, vol. 15, 1951, p. 360-362.
- Classification of forest humus on a genetical basis. Technical notes. Wisconsin State Department, Soils Department College of Agriculture, Madison, janv. 1952.
- WITTICH. — Der heutige Stand unseres Wissens vom Humus und neue Wege zur Lösung des Rohhumusproblems im Walde. *Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Univ. Göttingen*, B. 4. Sauerlanders Verlag Frankfurt-a-M., 106 p., 1952.
- ZINECKER. — Die dynamische Auffassung der forstlichen Bodenkunde. *Allg. forstl. u. Jagdzeitung*, 5, 1950, p. 139-144.
-

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erforschungen betreffend die Mineralisierung des Waldhumus wurden gleichzeitig im Laboratorium und im Gelände ausgeführt.

— Im Laboratorium: Mineralisierungsversuche im Trockenofen bei 30° C.

— Im Gelände: Forschungen nach den Wirkungen der Belichtung auf den Waldboden und der Teilverbrennung des Auflagehumus.

1° Mineralisierung im Trockenofen des Oberflächenhumus.

Der Mineralisierungsprozent, d. h. das Verhältnis: befreiter mineralischer N / gesamt N ‰ nach 5 Wochen im Trockenofen bei 30° C, nützte zur Bestimmung der Mineralisierungswirksamkeit des Bodens. Der kalkreicher Mull (pH 6-7) ist wenig empfindlich zu dieser Erregung durch Hitze. Die am leichtesten erregbaren Humus sind: im Sommer der Mildermull (pH 5,5), im Frühjahr der leichtsaure Rohhumus (pH 4,5-5).

2° Mineralisierung der tieferen Horizonte.

In gewissen Böden sind die tieferen Schichten durch einen verhältnismässig wenig erregbaren, durch Umwühlen oder Wanderung mit den Mineralstoffen gemischten Kolloidalhumustoff gekennzeichnet. Seine Mineralisierung bleibt immer langsam, handelt es sich um einen kalkhaltigen Humus (Rendzina) oder im Gegenteil um einen saueren (B-Horizont des Podsols).

3° Einfluss der Holzfälle und der Belichtung.

Der Rohhumus A₀, wenn vorhanden, verschwindet schnell nach den Holzfällen, besonders auf Kalkmuttergestein und gibt eine grosse Menge von mineral N; aber der Prozent des mit dem Mineralboden gemischten Kolloidalhumusstoffes vermindert sich wenig oder nimmt sogar auf (A₁-Horizont). Also eine plötzliche Belichtung bewirkt eine starke Mineralisierung der frischen organischen Substanz mit Erzeugung von Huminsäuren die sich langsam mineralisieren.

4° *Versuche betreffend die Wirkungen der Verbrennung und des Einkalkens.*

Ein Teil des gesamt N geht verloren (20 - 50 %). Der übrige Teil mineralisiert sich schnell. Das Verhältnis mineral N / gesamt N steigt stark in Beziehung auf den ursprünglichen Boden. Auch das Einkalken erregt eifrig die Mineralisierung eines sauren Humus.

5° *Gesamt Auslegung.*

Der frische organische Stoff mineralisiert sich eifrig unter Einfluss der Wärme und der Strahlungen und befreit grössere Menge von mineral N. Während dieser Mineralisierung entstehen Huminsäure, gewöhnlich durch einen mikrobischen Aufbau, in verschiedenen Mengen je nach der Bodenart. Diese Huminsäure mineralisieren sich immer langsam und sind unempfindlich auf äusserliche Einflüsse.

Ausserdem sind ihre Eigenschaften verschieden je nach dem Ursprung und dem Medium in dem sie entstehen: In den kalkhaltigen Böden sind die kolloidhumusstoffe, meistens geflockt, reich an N und wenig löslich in NaOH; in saurem Medium im Gegenteil sind sie arm an N und sehr löslich in NaOH; das Bodengefüge ist dann zerstört und diese Huminsäure begünstigen die Auswaschung des Eisens.

6° *Anwendungen.*

Die praktische Anwendungen sind zahlreich; in dem Leben eines Waldes kann man zwei Stadien unterscheiden:

1 — Ein Stadium des Veraltens des Bestandes in dem ein Humus mit günstigsten Eigenschaften sich bilden muss; der Forstwirt kann zu diesem Zweck verschiedene Verfahren anwenden; das meistbekannte ist die Holzartenmischung.

2 — Ein Stadium der hohen Tätigkeit des Humus, von kurzen Dauer, in dem er sich schnell mineralisiert. Dieses Stadium trifft mit den Verjüngungsfällen zusammen; das Einkalken und die Verbrennung können in gewissen ungünstigen Fällen (Rohhumus) nützlich die Wirkung der Holzfälle ergänzen.

Trad. M. A. ARBOR.

SUMMARY

Research work on the mineralization of forest humus has been conducted simultaneously in the laboratory and in the field. In the laboratory, tests were made on the mineralization in the kiln at 30°; in the field, research was carried out on the effect of sunlight on forest soils and on partial burning of humus.

1° Mineralization in the kiln of the humus of the upper horizons.

The « mineralization ratio », that is the N released mineral / N total ratio obtained in 5 weeks in the kiln at 30°, served to characterize the mineralizing activity of the soils. Humus saturated with calcium is not very sensible to this activation by heat. Those humus which are the most readily subjected to activation are, in Summer, the Mull (pH 5,5) and in Spring, the moderately acid Mor (pH 4,5 to 5).

2° Mineralization of the lower horizons.

In certain soils, the lower horizons are characterized by a colloidal humus mixed with the mineral soil, either by mixing action or eluviation, relatively inert and not very activable. Its mineralization is always slow whether it is a calcic humus (rendzina), or, on the contrary an acid one (B horizon of the podzols).

3° Research on the influence of cuttings and of the effect of sunlight on the soil.

After cuttings, leaving the soil denuded, the A₀ horizon of raw humus, when it exists, disappears rapidly, particularly on the calcareous parent-material, releasing an important quantity of mineral nitrogen. But the quantity of colloidal humus incorporated in the mineral soil is not much reduced, it is even slightly increased. Therefore a sudden insolation induces an intense mineralization of the fresh organic matter, which results in a production of slowly mineralized humic acids.

4° Research on the effect of burning and liming.

One part of the total nitrogen is lost (20 to 50 %). The remaining part is rapidly mineralized; the N mineral / N total ratio is rising

strongly as compared to the check soil. Likewise liming considerably increases the mineralization of an acid humus.

5° *General conclusions.*

Fresh organic matter is actively mineralized under the influence of heat and its radiations, releasing important quantities of mineral nitrogen. This mineralization gives rise to humic acids, generally by a process of microbial synthesis: their quantity is variable, according to the type of soil. These humic acids are always slowly mineralized and are not sensible to activation by outer influences.

Besides, their properties are different according to their origin and the environment in which they appear. In calcareous soils, the humic colloids, generally flocculated, are rich in nitrogen and not very soluble in soda. On the contrary, in acid soils, they are poor in nitrogen and very soluble in soda; then their structure is peptized and they favour the leaching of iron.

6° *Applications.*

The practical applications are numerous. Two distinct phases can be distinguished in the life of a forest:

1 — A phase during which the stand is growing old and will develop a humus with favourable properties. For this purpose, the silviculturist can use different methods; the best known being the mixture of species.

2 — A short phase during which humus is activated. This corresponds to its rapid mineralization and occurs at the same time as that of the regeneration fellings. Liming, and burning, in certain unfavourable cases (raw humus) may be advantageously used in addition to the fellings.

Trad. M. GROSDIDIER.

