

FACULTÉ DES SCIENCES DE DIJON

1965

LES SOLS A MARBRURES DE LA FORÊT DE CHAUX

**Contribution à l'étude de la genèse des caractères,
de l'évolution et des traitements des sols
à sous-sols marmorisés sous couvert forestier**

THÈSE

présentée pour le diplôme de
DOCTEUR-INGENIEUR
et soutenue le 2 juillet 1965

PAR

Georges PLAISANCE

Ingénieur Principal des Eaux et Forêts

Président: M. CIRY, doyen

NANCY
Imprimerie Georges THOMAS
1966

UNIVERSITÉ DE DIJON - FACULTE DES SCIENCES

Doyen: R. CIRY

Assesseur: J. BOUCHARD

Doyen honoraire: G. SIMON

PROFESSEURS

Mathématiques	MM. F. LAGRANGE
Géologie	R. CIRY
Chimie-Appiquée	J. DECOMBE
Mécanique	B. d'ORGEVAL-DUBOUCHET
Radio-Électricité	J. BOUCHARD
Botanique	C. ARNAL
Biologie générale et animale	R. HUSSON
Chimie	J. TIROUFLET
Physique	L. MARIOT
Mathématiques	J. ARBAULT
Chimie	P. BARRET
Physiologie animale	G. CLEMENT
Chimie biologique	C. BARON
Zoologie	C. NOIROT
Botanique appliquée	P. HENRY
Chimie-physique	R. AMIOT
Géologie	P. RAT
Physique	P. VERNIER
Biologie animale	J. CHAUDONNERET
Biologie végétale	F. BUGNON
Géologie	J.-P. MANGIN
Chimie	Mme WATELLE
Mathématiques	MM. P. PIGEAUD
Chimie	P. FOURNARI

MAITRES DE CONFERENCES

Physique	MM. J. MORET-BAILLY
Physique	P. CACHON
Electronique	L. GODEFROY
Mathématiques	A. HANEN
Géologie	H. TINTANT
Biologie végétale	M. GUYOT
Physique	Mme G. GODEFROY

PROFESSEUR HONORAIRE

M. R. DENIS

CONSEILLER ADMINISTRATIF

C. CHABIN

PREAMBULE

Ayant eu à gérer la forêt de Chaux dès 1943, nous fûmes rapidement amené à rechercher l'explication de certains phénomènes troublants relatifs à la végétation et aux sols. Dès que les perturbations de l'après-guerre se terminèrent, nous nous mîmes au travail. Nous n'oublierons pas l'aide initiale que nous a donné M. BOISCHOT.

Notre Chef, M. le Conservateur LACHAUSSÉE, nous invita à faire effort pour découvrir les mécanismes de la dégradation de cette forêt. Dès le début, M. l'Ingénieur DUCHAUFOR, devenu depuis Professeur de Faculté, nous donna son appui, nous aida de ses conseils et fit faire de nombreuses analyses dans son laboratoire. M. le Directeur OUDIN suivit avec bienveillance nos travaux et accepta notre communication au Congrès de l'A.I.S.S. en 1956; nous fûmes encouragé également par M. le Professeur CIRY, Professeur de Géologie de la Faculté des Sciences de Dijon.

C'est M. Philippe FRANC de FERRIÈRE qui éveilla notre goût pour la pédologie; c'est lui qui, dès le début, nous ouvrit les voies les plus fécondes lors de tournées sur le terrain, en particulier en nous aidant à diagnostiquer l'influence du relief. M. G. MATHIEU, Directeur de la Station Agronomique de Dijon, nous apporta son concours, ainsi que son dévoué collaborateur M. DENIZOT et, plus tard, Mme MÉRIAUX, l'actuelle Directrice de la Station de Recherches Agronomiques. MM. JOURNAUX et CAILLEUX, géomorphologues, nous apportèrent des lumières multiples. MM. HÉNIN et BÉTRÉMIEUX sont venus voir la forêt et nous ont ouvert des pistes de recherches. MM. QUANTIN et MATHON nous aidèrent au point de vue botanique. Le Lieutenant DESLORIEUX, du Laboratoire de l'Armée de l'Air de Dijon, ainsi que les agents du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Dole nous ont beaucoup aidé en ce qui concerne la géotechnique. M. FLON prêta son concours pour des analyses de sols et concrétions.

M. VAN der MAREL, qui s'intéressait aux argiles, n'a pas ménagé sa peine pour nous aider et nous a fait profiter des laboratoires hollandais; nous pûmes rédiger avec lui un article « Contribution... » dans les Annales Agronomiques.

Un spécialiste allemand, M. SCHÖNHALS, est venu examiner les sols étudiés et nous a montré des profils en Allemagne.

M. DUCHÉ d'une part, M. POUCHON et Mlle de BARJAC d'autre part, ont tenté l'étude microbiologique.

Plus tard, nous avons eu recours à MM. MILLOT, Professeur à Strasbourg et à ses collaborateurs ainsi que, de nouveau, à M. FRANC de FERRIÈRE pour les argiles, à M. l'Ingénieur BONNEAU (Station de Recherches de l'École des Eaux et Forêts de Nancy) pour des analyses. Nous nous sommes inspiré quelque peu des travaux de MM. CAVAILLÉ, J. DUPUIS.

De nombreux correspondants : MM. MÜCKENHAUSEN, SCHÖNHALS, ZAKOSEK, G. SMITH nous ont aidé dans notre tâche.

Nous n'aurons garde d'oublier les Préposés de l'Inspection de Dole et, parmi eux, les Agents techniques TOURNOUX (depuis Chef de District), BUIRET, PALLAUD... qui ont mesuré de très nombreux niveaux d'eau et effectué des sondages indispensables pour la cartographie.

Que tous ces guides et collaborateurs soient remerciés comme il convient. Jamais sans eux nous n'aurions pu rédiger le présent travail et tirer des conclusions pratiques. Sans eux nous n'aurions jamais pu réaliser notre étude, découvrir certains faits, émettre certaines hypothèses que l'avenir permettra, nous l'espérons, de confirmer et qui, en tout cas, auront servi à faire découvrir la vérité.

INTRODUCTION

Pour vraiment comprendre l'état d'une forêt et supputer son avenir, il faut étudier son passé et son sol.

Dans le cas de la forêt de Chaux — un des plus importants massifs feuillus de France (*) avec ses 20 000 ha — cette étude a montré l'importance des traitements passés, en particulier l'effet des abus multiples dont elle a été victime depuis le Moyen Age (et peut-être même avant), abus bien constatés aux XVII^e et XVIII^e siècles.

Elle a amené aussi à analyser les propriétés d'une catégorie de sols mal étudiés jusqu'ici, celle des sols limoneux compacts à sous-sols d'aspect plus ou moins marbré. Ils portent la forêt, conjointement avec des sols de limons des pentes, des sols caillouteux et des mélanges des deux.

L'intérêt de cette étude n'est pas seulement relatif à cette forêt, mais aussi à bien d'autres analogues qui posent les mêmes problèmes non résolus.

Cette forêt est dans un état médiocre; on y voyait autrefois de grands vides dénommés « plaines »; on en voit encore les restes sous forme de zones dégradées.

Son sol est, sur plus de la moitié de sa surface, envahi par une graminée grande et agressive, la molinie, qui lui donne un aspect de « savane forestière ».

Pourquoi est-elle dans cet état médiocre? Peut-on y remédier? Par quelle méthode? Telles sont les questions qui se posent à son sujet.

La forêt est un monde complexe. Elle est, certes, le fruit du sol, mais elle est profondément transformée par l'homme, volontairement et involontairement. Et elle agit à son tour sur le sol de façon très différente suivant son état.

Le problème posé par sa restauration, dès qu'il a été abordé, s'est révélé être avant tout un problème pédologique: les causes sont

(*) Elle est dépassée par la forêt d'Orléans (34 244 ha), elle est suivie par les forêts de Fontainebleau (16 859 ha), de Compiègne (14 427 ha) et de Villers-Cotterêts (12 600 ha).

apparues être : les unes anciennes inhérentes à la topographie, à la nature de la roche-mère et à son évolution paléopédologique ; les autres artificielles, d'âge historique ou récentes et même contemporaines, inhérentes à un traitement sylvicole hélas classique, mais inadapté, celui du taillis-sous-futaie, ainsi qu'à des actions ou injures faites au peuplement (incendies...).

Il y avait donc lieu d'essayer de démêler les diverses causes, en réalité fort intriquées et tenter de supputer leurs importances relatives et leurs liens génétiques. Géomorphologie, géologie, agronomie, sylviculture sont impliquées. Il fallait faire la synthèse entre plusieurs disciplines.

Il fallait aussi, à la lumière de cette étude analytique, rechercher les remèdes permettant de corriger les défauts du sol et des peuplements. Il y avait lieu toutefois de faire un choix entre ces remèdes en fonction de leur prix de revient, donc d'étudier leur coût et la rapidité de leurs effets.

Nos appels ont été entendus, des mesures décisives ont été prises, telles que la conversion en futaie (1957) et l'octroi d'une forte aide financière par le *Fonds Forestier National* (il y a, en général, un contrat par an depuis 1949).

La restauration a été commencée activement depuis 1948 ; en 1963, on peut affirmer qu'elle est en bonne voie.

Une partie seulement de nos recherches est consignée dans la présente thèse.

Certaines données nous semblent définitivement acquises ; elles résultent soit de nos propres recherches, soit d'emprunts à d'autres chercheurs. D'autres sont encore incertaines et appellent de nouvelles investigations (microbiologie, engrais...) : il n'y a pas lieu de s'en étonner.

Pour éviter les redites, nous renvoyons à nos publications antérieures : « Les sols à similigley », *Bull. A.F.E.S.*, 1959 ; « Les couches aquifères perchées à éclipses », *A.I.S.S.*, 1959 ; « Contribution à l'étude des limons de la forêt de Chaux », *Annales Agronomiques*, 1960 (11, 5, p. 601-620 et 6, p. 661-711 ; 1961 (12, 2), p. 249-269.

CHAPITRE PREMIER

CLIMAT

1. CARACTERISTIQUES CONTEMPORAINES.

1.1. TEMPÉRATURE.

1.1.1. *Températures moyennes annuelles*: elles varient de 8°9 à 12°5 suivant les années; elles varient de 10°2 à l'Ouest à 9°5 à l'Est. La répartition mensuelle à Villette est la suivante:

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0.2	2.3	6.8	11	14	17.4	19.1	18.4	14.9	10.3	5.7	2.7

Le climat de l'intérieur de la forêt est un peu plus froid que celui de la bordure externe.

1.1.2. *Gelées*: 102 jours de gelées dont 23 de fortes gelées.

1.2. PRÉCIPITATIONS: elles varient de 538 à 1 274 mm; les pluies d'été s'élèvent à un total compris entre 250 et 400 mm. Le rapport pluie d'hiver/pluie d'été est 0,9 alors que sous climat atlantique il est de 1,5. Il n'y a de « mois sec » au sens précis donné par GAUSSEN (P inférieur à 2 T) que certaines années (septembre 1949, mars et octobre 1950, juillet 1952).

Le nombre de jours de pluie varie de 75 à 195, en moyenne 141. La pluie moyenne par jour de pluie est de 3,69 mm en janvier, 8,62 mm en juillet. Les 224 jours secs se répartissent par périodes de 1 à 27 jours consécutifs (en moyenne 7).

1.3. L'INDICE D'ARIDITÉ (de DE MARTONNE) a varié, entre 1951 et 1963, de 36 à 54. Valeur moyenne: 47. Les indices d'aridité mensuels varient de 27,4 en mai à 95 en novembre; moyenne: 48,2; valeur moyenne pour les 4 mois d'été: 36,1.

1.4. L'INSOLATION est de 2 000 heures environ.

1.5. L'ÉTAT HYGROMÉTRIQUE s'abaisse parfois à 56 % en 1953; sa moyenne annuelle, en 1962, aux « Quatre Coins » est de 84 %.

1.6. LES BROUILLARDS sont plus fréquents et persistants en forêt à cause de l'évaporation de la surabondante eau du sol.

1.7. EVAPORATION: la moyenne de 7 années est de 481 mm, soit par jour 1,32 mm; elle atteint 2 à 3 mm par jour en été. Sous bois, elle est moitié de ce qu'elle est en découvert; et, dans une clairière, il résulte de nos mesures qu'elle est très inférieure à ce qu'elle est hors forêt.

De façon générale, le climat est plus froid et humide à l'Est au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la dépression de la Saône pour se rapprocher de la côte jurassienne.

Il faut signaler, d'autre part, une action propre du massif par suite de la légère élévation des plateaux et par suite de la masse forestière. C'est en tout cas, dans toute l'étendue de la forêt, un climat nettement forestier convenant aussi bien aux chênes qu'aux hêtres et à divers exotiques d'emploi déjà classique.

Dans l'aménagement de 1956, nous avons confirmé les possibilités de bonne venue du hêtre, qui sont bien visibles sur le terrain. Les compensations d'humidité par les brumes jouent probablement un rôle non négligeable. *Si la végétation forestière est par endroit déficiente, ce n'est pas pour motif climatique, mais pour motif pédologique et historique.*

2. INFLUENCE DU CLIMAT SUR LES SOLS:

Nous anticiperons en annonçant que l'accumulation d'eau dans le sol reste le danger capital; elle dépend d'une part de l'importance des chutes de pluies et, d'autre part, de l'évaporation (elle-même sous la dépendance de la température et du vent). S'il y a des séries de pluies répétées, surtout si elles sont fortes et s'il y a une faible évaporation (température basse et pas de vents), l'eau s'accumule sur le sous-sol imperméable; elle stagne dans l'intérieur du sol en formant une *nappe perchée* (PLAISANCE, 1956 a).

Si les pluies sont faibles, très espacées, si la température est élevée, le sol se ressuie bien entre deux pluies, on ne voit pas apparaître la nappe perchée, ou encore elle est de courte durée.

Les pluies, lorsqu'elles sont violentes et lorsque l'abaissement est insuffisant, provoquent un tassement du sol en surface qui obstrue les orifices et provoque l'asphyxie interne. On peut considérer com-

me « jour sec » ceux où il tombe moins de 1 mm; par exemple, en 1949, ils ont été ainsi répartis en périodes de jours consécutifs :

1	2	3	4	5	7	8	10	12	13	15	16	18	20	24	27	39	42 (*)
1	4	2	3	4	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1 (**)

Cette périodicité est capitale au point de vue de l'évolution de la marmorisation : elle commande la libération des pores et les précipitations d'hydroxydes métalliques.

Ce sont les pluies d'avril, mai, juin, qui sont les plus importantes puisqu'elles se produisent au moment du départ de la végétation; elles devraient la favoriser, mais si le sol est gorgé à ce moment-là, le développement est contrarié : *il y a donc antinomie entre les exigences propres de la végétation et celles du sol.*

Le vent peut aider à l'assainissement par le haut; mais sous forêt son action est négligeable.

Un état hygrométrique élevé (qui est en partie occasionné par l'état imperméable du sol) ralentit l'évaporation, donc la disparition de la nappe.

L'évaporation est une résultante de la température, du vent, de l'état hygrométrique. Par exemple en l'absence de végétation, si l'évaporation est de 2 mm par jour, il conviendrait, pour qu'il n'y ait pas apparition de la dangereuse nappe aquifère, que la pluie ne dépasse pas 14 mm par semaine.

Les indices d'aridité de moins de 30 correspondent à des conditions favorables au sol, ceux de plus de 40 à des conditions mauvaises; ce fut le cas en avril 1956 et 1959, mai 1955 et 1962, juin 1951, 1953, 1955, 1956, 1957.

Le gel, non seulement est nuisible aux arbres, mais il l'est au sol, car lorsque le sol est humide, le gel est destructeur de structure.

Toutefois, dans le cas de labour opéré par temps sec, à vrai dire assez rare en forêt, il peut faciliter le délitage des mottes.

On peut, certes, étudier de façon plus détaillée l'incidence du climat sur le sol, mais il ne faut pas oublier qu'une partie des marmorisations est fossile et qu'elle correspond à des climats défunts. Comme l'a observé FINK en Europe Centrale, c'est souvent le sous-sol (influencé et durci par des climats passés) qui détermine la formation des marbrures floues supérieures.

En ce qui concerne le présent, il nous semble que les conditions annuelles les plus favorables, en définitive, sont celles correspondant à un hiver sec, et à des pluies d'été bien réparties en petites tractions séparées par des petites périodes chaudes.

(*) Jours secs consécutifs.

(**) Nombre de périodes.

CHAPITRE II

ROCHE-MERE ET SUBSTRAT

L'histoire géologique du massif de la forêt de Chaux a fait l'objet de nombreuses études. Citons parmi les auteurs: Frère OGÉRIEN, BOYER, Général de LAMOTHE, COLLOT, DELAFOND et DEFÉRET, DOUVILLÉ, BOURGEAT, JOLLAUD, CHABOT, GIBERT 1930, MAZENOT, GLANGEAUD 1949, JOURNAUX 1955, BOURDIER 1963.

On a longuement épilogué sur l'origine des deux matériaux: cailloutis inférieur et limon supérieur. On a discuté sur la présence de prétendues terrasses, sur l'existence des lacs bressans successifs, sur l'influence des glaciations, sur les reprises de cailloutis, ainsi que sur les déformations tectoniques qui ont pu affecter la Bresse (située immédiatement au Sud de la forêt de Chaux et dont l'histoire est évidemment étroitement liée à celle de la forêt).

Nous résumons brièvement ce qui résulte de nos lectures et de nos observations en remarquant que la Carte Géologique de 1922 est de peu de secours pour la pédologie puisque, en particulier, la surface indiquée comme recouverte des « limons des plateaux » est manifestement fausse.

1. SUBSTRATUM CAILLOUTEUX:

Le sous-sol de cailloutis, dits « de Chagny » a une épaisseur de 70 m; cette masse visible en coupe à Belmont (GLANGEAUD, 1949) s'appuie sur le calcaire à l'Est. Il s'agit d'un immense cône de déjections sous-lacustre, en pente douce du N.-E vers le S.-O. Les radiolarites attestent son origine principalement alpine. Les quartz profondément cariés attestent son grand âge (pliocène).

Ces cailloutis ont été entaillés lors des vidanges des lacs bressans: les reculs glaciaires provoquaient d'une part un accroisse-

ment de débit fluvial érosif et, d'autre part, la vidange des lacs bressans par suite de la fonte du barrage de retenue (constitué par une langue glaciaire au niveau de Lyon).

2. LIMONS DES PLATEAUX (fig. 1).

2.1. HISTOIRE GÉOLOGIQUE: ils recouvrent les cailloutis sur une épaisseur très variable de 0 à 15 m, et montrent en coupe des aspects nettement différents: quelques-uns feuilletés, les autres généralement non lités; les uns plus argileux, les autres plus limoneux. En Bresse, on trouve inclus des lignites. Il y a aussi des sables, généralement recouverts d'ailleurs par une mince couche de limon. Ils montrent, par endroit, des concrétions ou même des plaques

PROFIL TYPE D'UNE LANGUE TABULAIRE

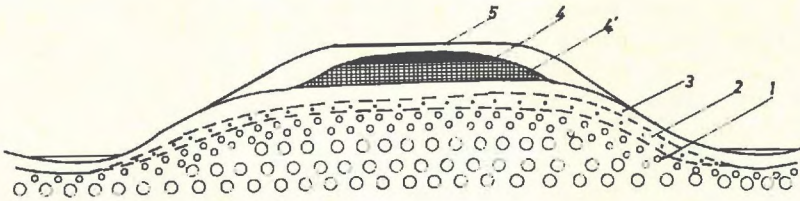


FIG. 1.

- 1) Substrat caillouteux.
- 2) Sols mélangés de petits cailloutis et limons.
- 3) Limon alluvial (?).
- 4) Limon marmorisé (marmorisation récente tachetée).
- 4') Limon marmorisé (marmorisation ancienne réticulée).
- 5) Limon non marmorisé.

de mâchefer qui relèvent très vraisemblablement de la paléopédologie. Diverses origines ont été ou peuvent être envisagées, indiquons-les sommairement:

a) ce serait des produits de désagrégation du cailloutis sous-jacent; c'est ce qu'indique l'auteur de l'aménagement forestier de 1879. Mais que seraient devenus les quartz, pourtant très résistants malgré leurs caries? cette hypothèse ne saurait être retenue.

b) ce serait les limons de débordement d'un fleuve qui, débouchant de la côte calcaire à Rozet-Fluans, aurait divagué sur un cône de déjection; mais on s'explique mal qu'il ait ainsi recouvert toute la surface sur une aussi grande étendue et cette explication locale ne conviendrait pas pour d'autres limons sur cailloutis qu'on retrouve ailleurs en France.

c) limon promorainique (FALSAN, CHANTRE, ROMAN) venu de la montagne du Jura, provenant du lavage de produits glaciaires (et ayant perdu tout calcaire) : L'hypothèse est bien fragile.

d) une variante consiste à les considérer comme le limon de nappes diluviales massives venues de la montagne à des époques très pluvieuses ; ce serait un loess décalcifié, lehmifié et altéré sur place à l'air (MARTIN), surtout par les eaux stagnantes (LAVOILLE).

e) ce serait un loess déposé à sa place actuelle, mais tombé dans l'eau du lac. Habituellement, les loess sont plutôt arrêtés dans leur trajectoire par des végétations basses.

f) ce serait un loess ancien du Sundgau, lehmifié en Haute-Alsace, charrié par le Rhin-Doubs, et déposé dans le fond du lac bressan à l'emplacement actuel.

g) ce serait des boues de lac. Mais la granulométrie ne semble pas exactement conforme à cette origine. C'est pourtant une thèse voisine que soutint BENOIT en 1958 qui parle de lévigation dans des eaux troubles, peu agitées ; bien qu'il ne le dise pas nettement, il semble supposer que ce sont les matériaux sous-lacustres qui sont remaniés par l'eau.

h) ce serait des boues provenant de la décomposition des roches alpines, par exemple celles déposées par le Rhin-Doubs dans les lacs bressans successifs et qui, après assèchement du fond du lac, auraient été reprises, par exemple entre Chalon-sur-Saône et Mâcon, par des vents du Sud-Ouest, et plaquées sur le cône de cailloutis exondé (entaillé ou non entaillé : ce point restant à éclaircir).

Les marbrures sont manifestement d'origine pédologiques plus ou moins tardives et ne sont pas à considérer comme caractéristique différentielle initiale de la roche-mère (encore moins de la roche-grand-mère).

Nous pensons que *la masse profonde des limons a une origine fluvio-lacustre* ; le litage horizontal (visible par exemple sur la coupe que nous avons ouverte dans la tranchée du chemin de fer en II^e série) et la grande richesse en argile du sous-sol plaident pour cette origine.

Les mélanges que l'on rencontre ici ou là entre le limon et les petits cailloux confirment cette hypothèse dans certains cas : il s'agit alors d'un stade de transition, d'une fin de cycle de sédimentation. Notons toutefois que dans certains cas, sur les pentes, il s'agit de remaniements tardifs par solifluxion et non de la sédimentation primitive.

Quant à la *couche superficielle*, nous lui attribuons une origine un peu différente, elle provient de *la microcryoclastie* des sables en place, et soit d'un *énorme ruissellement en nappe*, soit plutôt d'un *dépôt éolien de boues siliceuses/silicatées* (voir § h et fig. 2 bis).

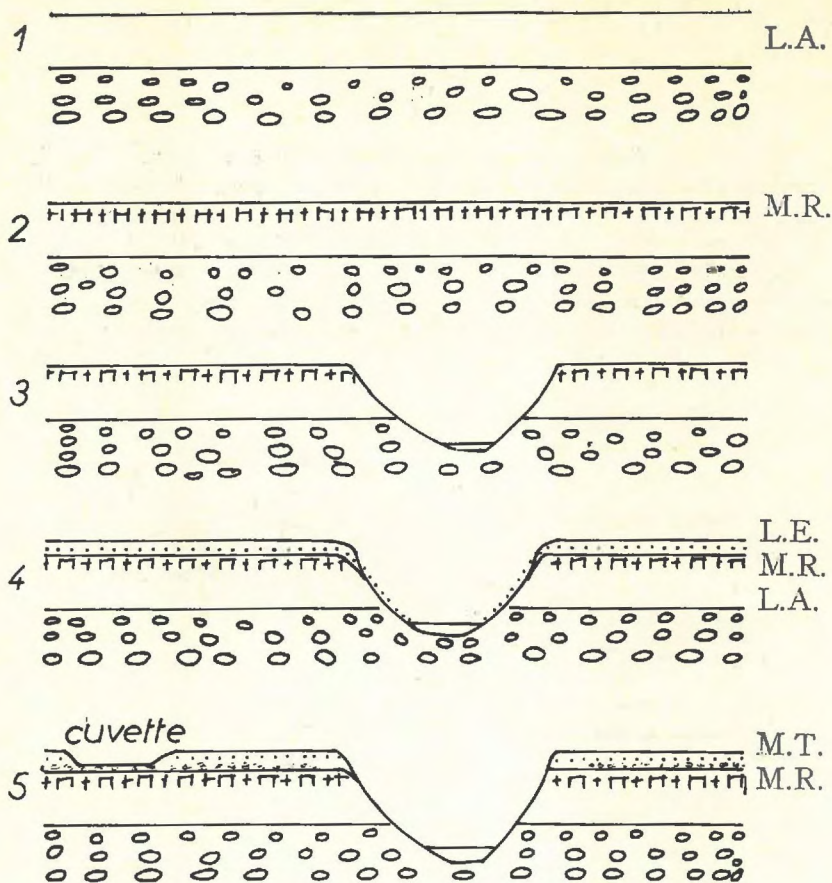


FIG. 2.

C. cailloutis	
L.E. limon éolien	
L.A. limon alluvial	
M.R. marmorisation réticulée	
M.T. marmorisation tachetée subséquente	

Les schémas de la figure 2 tentent une reconstitution hypothétique de l'histoire du sol. Sur les cailloutis du cône sous-lacustre se dépose un limon alluvial qui subit une première marmorisation.

L'ensemble est entaillé par l'érosion; pendant ou après cette dissection se dépose un limon éolien qui peu à peu subit une marmorisation tachetée; le cas des cuvettes à sols très hydromorphiques et influencés profondément par la molinie est à considérer à part.

La réalité est probablement plus compliquée, car il y a eu non seulement plusieurs périodes glaciaires séparées par des interglaciaires, mais aussi les pulsations pendant ces périodes, et il y a eu plusieurs phases d'érosion plus actives.

Fig. 3.

GLACIS

— LIMITE PLATEAUX

••••• COTE : 260

..... d' 250

== RIVIÈRE

-.-.- CALCAIRE



Parfois, la limite entre les 2 couches est nette. Encore faut-il ne pas confondre avec les limites nettes qui peuvent résulter du passage de la charrue sur les surfaces anciennement cultivées à l'intérieur de la forêt. Mais lorsque la limite n'est pas nette, il ne faut pas trop s'en étonner. En effet, les phénomènes d'hydromorphie postérieure peuvent être à cheval sur les deux matériaux et masquer la discontinuité: celle-ci semble assez nette dans le profil de I 14. Notons d'ailleurs que s'il s'agit de boues non calcaires reprises par

HYPOTHESE DES SEDIMENTATIONS DIVERSES

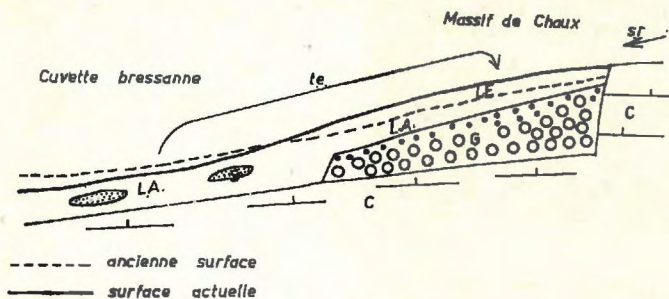


FIG. 2 bis.

- C Calcaire
- LA Limon alluvial
- LE Limon éolien
- Sr Sédimentation rhénane
- t.e. Transport éolien.

le vent et plaquées sur la surface, leur origine première est la même; il est normal qu'elle n'ait pas une granulométrie nettement différente.

Il nous est difficile d'évaluer l'épaisseur de cette couche superficielle; il nous semble qu'elle varie de 0 à 40 cm. Elle n'est pas présente partout.

Les *limons des pentes* sont soit la couche inférieure éluviale située entre le cailloutis et le limon éolien, couche tronquée par l'érosion sur les pentes, soit des limons descendus des plateaux et recouvrant les cailloutis, voire même des limons déarmorisés par suite de leur position en pente et de leur aération par brassage lors de la solifluxion.

Les *limons des plateaux*, qui auraient été mis en place, par exemple, au Mindel, sont donc restés exposés aux outrages atmosphériques depuis quelques 120 000 ans. On ne s'étonnera pas qu'ils aient été profondément altérés par l'eau, même s'ils sont jeunes dans la chronologie géologique. Ceux qui sont au-dessus de l'altitude 235 m (celle du dernier lac), non protégés sous l'eau, ont

subi les altérations hydromorphiques en position subhorizontale, et il ne faut pas s'étonner que les lambeaux résiduels qui couvrent la majeure partie de la forêt soient dans un état avancé de détérioration pédologique.

L'étude des minéraux lourds qui en a été faite par Mlle S. DUPLAIX n'est pas probante; on y retrouve les mêmes minéraux que dans les sols caillouteux; ce n'est pas étonnant si l'on considère que l'ensemble des matériaux vient de la même région des Alpes (St-Gothard).

2.2. DÉNOMINATIONS ET CARACTÈRES GÉNÉRAUX: ces sols limoneux sont appelés dans les parlers locaux: *aubuc*, *arbue*, *erbuë*, *terre à pisé*, *terre à briques*; les concrétions sont des *têtes de clous*. Les géologues les ont appelés *lehm ferrugineux*, *limon jaune*, *limon de Bresse*, *limon des plateaux*, *limon blanc*, *diluvium*.

Ce sont des sols limono-sablo-argileux, ou parfois limono-argileux, avec des sous-sols argilo-limono-sableux ou parfois argilo-limoneux. Certains (DUCHAUFOUR, 1960) les appelle *limon fin argileux*.

Voici quelques synonymies approximatives: *gley like soil*; *low humic gley* (partie des *Bog soils*); *surface water gley soil*; *Molken-gley*; *gleyartige Böden*; *Marmorierte Böden*; *Pseudogley* et *Pseudogley-Braunerde*; *Pseudovergleyte Böden*; *Paragley*; *Planosol*; *sol amphibique*; *sol semi-subhydrique*; *sol à similigley*; *sol marmoré*; *sol à fragipan*; *Toniger Lehm*; *Schufflehm*; *Lösslehm*; *Staublehm*... — Noms dialectaux: en Allemagne, les *Missenböden*, *Klebsandböden*, *Mölkenböden*, *Melmböden*, *Geschiebelehm*, *Flies-serde*, *Flottböden*... et, en Autriche, les *Opok Böden* (ORNIG, 1961) sont des sols plus ou moins voisins de ceux étudiés ici.

La couche supérieure de ce matériau a évolué de façon spéciale, mais celle-ci n'est pas décrite dans les ouvrages classiques (HENRY, 1908; DEMOLON, 1948, etc...).

Nous avons entrepris nos recherches en 1947. Nous avons parlé des *sols à sous-sol marbré* en 1953 (Compte rendu à l'Académie des Sciences et Congrès de l'A.F.A.S. à Luxembourg). En 1956, nous les appelions *sols à similigley*. L'expression de *sols à marbrures* est équivalente à celle de *sols marmorisés*. En réalité, il vaudrait mieux dire *sol à sous-sol marbré* (ou *marmorisé*).

Nous avons trouvé des traces de description dans DAUBRÉE (*sol bigarré*), 1852, dans BENOIT (1858); LAUBMANN, en 1866, avait décrit des sols des croupes du Pfalz (Bavière) sous le nom de *mitunter Nässe leidend*; TARDY, en 1879, parlait des *argiles bariolées* de la Bresse; TREITZ, en 1912, en avait observés dans le bassin panonique et les avait appelés *buntscheckigen und gestreiften* (« sols bigarrés et striés »); STREMMER, 1926, 1930, *mineralogis-*

chen Nassböden. Il y a été fait allusion par GRUPE, 1923; DIE-TRICH, 1924; HARTEL, 1928; MÜLLER, 1936; TASCHENMACHER, 1937; BRÜNING, 1940; KRAUSS, 1928, 1930, 1935 (*gleiartig*), 1939 et LAATSCH, 1937, puis MÜCKENHAUSEN les ont décrits.

Ils ont ensuite été étudiés avec beaucoup de détails avant nous (sans que nous le sachions à l'époque) puis, en même temps que nous, en Allemagne, Autriche, Yougoslavie.

On notera qu'il est difficile de s'entendre sur le sens des mots « sol » et « sous-sol » : pour certains auteurs le « sol » c'est ce qui est meuble, le « sous-sol » ce qui est tassé et à un aspect bariolé (mais la limite ne correspond pas à celle de l'éluvial avec l'illuvial, et il y a de nombreuses racines dans le marbré); pour d'autres auteurs le « sol » c'est la partie meuble et celle tassée, tandis que le « sous-sol » est seulement ce qui est induré (mais l'induration n'est pas toujours très nette); pour d'autres, enfin, le « sol » ce serait la couche éolienne, le « sous-sol » la couche alluviale (mais la limite est tout à fait imprécise, et l'on n'est même pas absolument certain de ces deux origines).

En réalité, il y a des dépôts successifs, des remaniements par solifluxions, érosions sélectives superficielles, des dérangements de faible amplitude dus aux turbulences aériennes, et aussi des actions successives différentes (certaines violentes) de plusieurs climats; ces dernières ont déterminé des consolidations, fissurations, marmorisations de divers types qui se sont superposées à un lessivage vertical d'existence certaine, mais plus ou moins freiné par les horizons compacts de ce paléosol; dans ce matériau rendu ainsi fort hétérogène dans le sens vertical, les racines ont pénétré plus ou moins profondément et agi plus ou moins fortement.

Par suite, nous éviterons d'employer la terminologie habituelle en « horizons pédologiques » et nous parlerons plutôt de « couches », de propriétés assez distinctes pour être discernables par un observateur non spécialisé.

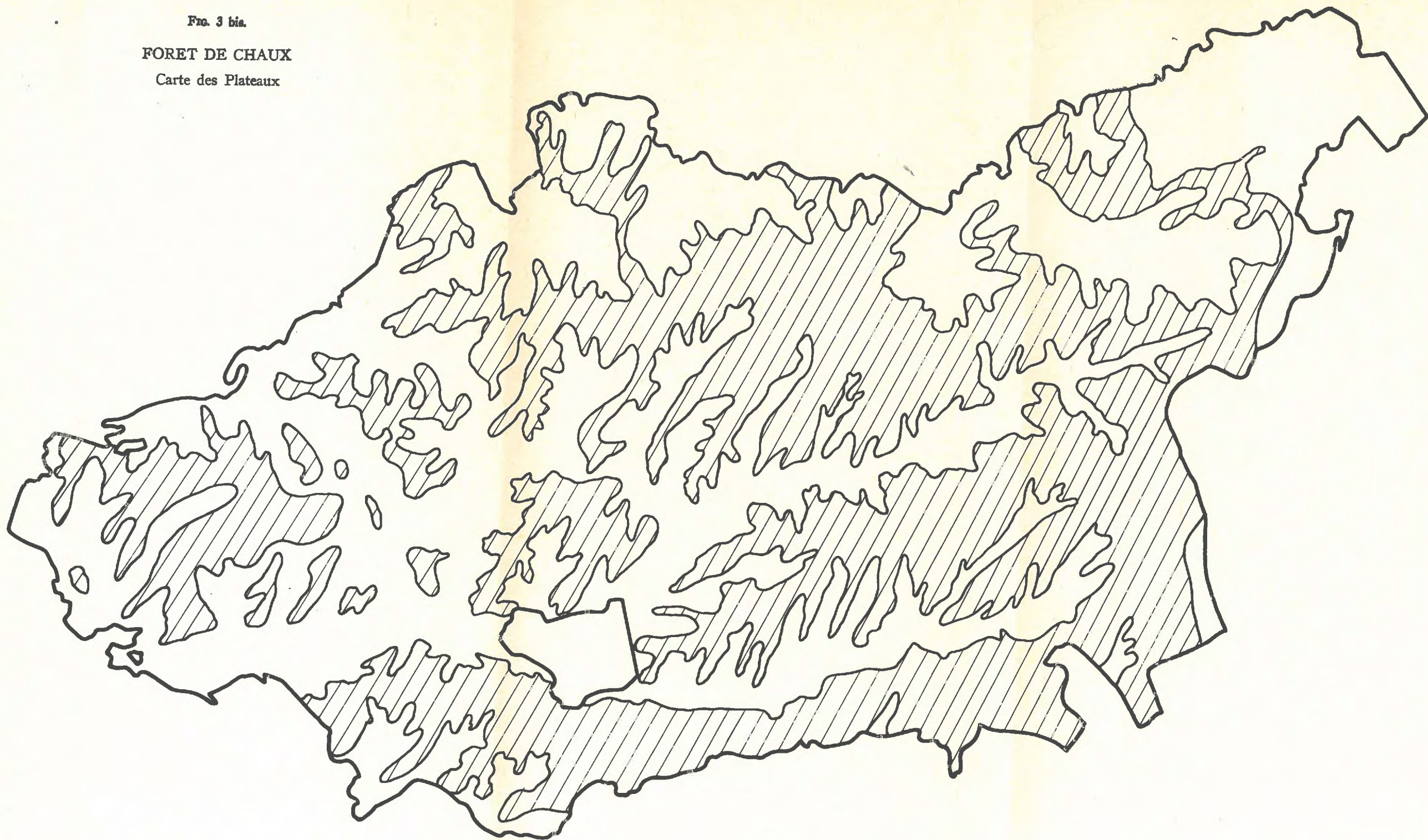
Mieux vaudrait, selon nous, ici, appeler conventionnellement « sol » la couche utile, vivante, fertile, et « sous-sol » la couche morte, ou presque morte, de très faible activité biologique; ainsi défini, le « sol » est susceptible de variations d'épaisseur, puisque nous démontrerons qu'avec le temps et des mesures convenables, les enracinements peuvent descendre; il y a d'ailleurs une zone de transition entre « sol » et « sous-sol » ainsi délimités.

Bibliographie: BOURGEAT 1917, CAILLEUX 1953, DELAFOND... 1893, DOUVILÉ 1913, FOURNET (d.d.), GIBERT 1930, GLANGEAUD 1949, JOURNAUX 1956, MALTERRE 1946, MALYCHEFF 1929, MARTIN 1873, MARTIN (J.-B.), SMITH 1942, THEOBALD 1933, TOURNOUER 1882.

FIG. 3 bis.

FORET DE CHAUX

Carte des Plateaux



CHAPITRE III

LES FORMES DU TERRAIN

1. MASSIF DE LA FORET DE CHAUX. (fig. 3 et 3 bis) :

La forêt de Chaux est un bon terrain d'études pour montrer l'importante répercussion des formes du terrain sur l'évolution des sols et sur leur distribution. On sait que des *séquences topographiques* naissent, entre autres motifs, par suite des différences de drainage local. Ce sont donc des *séquences hydrologiques*. Il est par conséquent utile de prêter attention aux formes actuelles du terrain et également aux formes anciennes dont elles dérivent (PLAISANCE, 1953 a et b).

L'ensemble a formé un grand glacis peu accidenté, d'un seul tenant qui descend du Nord-Est (altitude 270 m) vers le Sud-Ouest (altitude 230 m).

Il a été fortement entaillé par l'érosion remontante à partir d'un niveau de base situé actuellement à l'altitude 205 m. L'ensemble a une grande monotonie. Ce sont toujours les mêmes formes qui se répètent dans les profils en travers ; ce sont des langues tabulaires résiduelles en pente dont l'érosion a arrondi les angles.

Un seul accident est à noter dans la disposition générale ; c'est une crête qui semble être en surélévation au-dessus du glacis, au Nord-Ouest de la forêt ; elle constitue un petit plateau à 260-263 m au Sud de la source de la *Belle Nanette* : il s'agit vraisemblablement d'un basculement local des bancs calcaires sous-jacents ; cette hypothèse est confirmée par la présence d'entonnoirs en surface dans le sol caillouteux ; ces entonnoirs ne sont, évidemment, que la reproduction extérieure de dolines profondes non visibles.

Les langues médianes ont des ramifications (interfluves).

La pente moyenne est de 1,4 %. Autrement dit, la surface de chaque langue est subhorizontale ; à peine distingue-t-on une dépression en face d'Eclans qui a une largeur d'environ 1 à 2 km.

Par contre, en plusieurs points, on note des cuvettes fermées ou presque, donc à très mauvais drainage: il en sera question plus loin à propos de la paléopédologie (chapitre XI).

Chaque croupe est convexe vers le haut et concave vers le bas: ce qui est tout à fait normal. Les pentes transversales des vallées varient de 3 à 10 %. Certains sont entaillés dans la masse de cailloutis qui affleurent. Les autres ont été empâtées par la solifluxion des limons supérieurs qui couvrent les plateaux résiduels.

Nous ne parlerons pas des nappes phréatiques, qui sont rares et profondes: celle du puits du Dépôt de l'Armée à la Chatelaine est à une profondeur de 20 m; elle est à l'altitude absolue de 235 m. Le débit dépasse 15 m³/jour. Nous ne nous intéressons guère qu'aux nappes perchées (Voir chap. IV).

Nous n'avons pu distinguer aucune terrasse nette. Le système de la forêt de Chaux est indépendant de tout système de terrasses de la vallée de la Saône; s'il y a des terrasses, elles concernent les altitudes 220 m et inférieures; le glacis de Chaux les domine, et en est indépendant.

On peut remarquer que l'érosion (donc l'enfoncement des ravineaux) y est quasi-terminée et que le relief (sous le climat actuel tout au moins) y est à peu près définitivement fixé: la preuve est la faible quantité de matériaux charriés par l'émonctoire de la Clauge qui rassemble la quasi-totalité des eaux de la forêt; nous avons, lors des crues, recueilli de l'eau dans des bouteilles au pont de la porcherie de Goux: les dépôts terreux y étaient infimes. A notre avis, il en résulte qu'il n'y a pas à craindre un dessèchement par abaissement de nappes phréatiques. Comme elles sont profondes, elles n'alimentent pas la surface par remontées capillaires; le problème hydrique se joue entièrement dans la couche supérieure et dépend de l'économie des eaux de pluie sous un couvert végétal plus ou moins dense.

2. AUTRES REGIONS:

Un problème pédologique analogue à celui de la forêt de Chaux se pose pour toutes les buttes et les langues résiduelles qui se trouvent au Sud de la Loue et même sur des terrasses ou pseudo-terrasses de la vallée de la Saône. Par conséquent, l'étude géomorphologique préalable à l'étude pédologique des sols de la région, devrait comprendre quatre systèmes distincts, tous à l'Ouest de la côte calcaire jurassienne:

1) Un glacis démantelé en 3 parties: forêt d'Arne, forêt de Chaux, forêt de Souvans.

2) La grande cuvette bressanne dont le centre serait aux environs de Louhans. Elle est elle-même constituée par un grand nom-

bre de petites buttes aux formes arrondies par l'érosion, mais pouvant être considérées comme les restes d'une ancienne surface qui se serait incurvée au centre.

3) Les *Dombes* qui sont un complexe fluvio-glaciaire, bien indépendant, au Sud (forêt de Seillon).

4) Le *Val de Saône* et les terrasses alluviales, près du fleuve de la Saône. Les meilleures forêts sont sur sols alluviaux et basses terrasses. Les forêts sur des croupes plus élevées (lambeaux de terrasse ou de glaci) sont moins belles. Plus médiocres encore celles situées sur des lambeaux d'altitude supérieure à 235 m.

En résumé, les formes du terrain ont commandé et commandent étroitement la genèse et la distribution des sols.

S'il n'y a pas de vraies terrasses, il y a d'importantes surfaces en glaci subhorizontaux, qui portent de très vieux sous-sols.

Les sols qu'ils supportent sont mal drainés et hydromorphiques. Ils sont bordés par des sols de limons bruns des pentes, bien drainés, disposés comme un ourlet par rapport aux premiers: ce sont des sols lessivés de types bien connus; ils ont été affectés par des phénomènes de déplacement (ruissellements et solifluxions); ceux situés au bas des pentes sont à considérer comme colluvions.

Les sols de cailloutis du substratum affleurent (mais pas toujours), par suite de l'érosion, sur les pentes fortes.

Les sols de fonds de vallon sont des colluvions, et des alluvions arrachés au même socle, plus en amont. Ces trois derniers types sont hors de notre sujet principal.

Bibliographie: BOURDIER 1961, GARNAUD... 1953, JOURNAUX 1956.

CHAPITRE IV

PROPRIETES PHYSIQUES

1. TEXTURE :

1.1. ETUDE DES CONSTITUANTS (fig. 4):

1.1.1. *Constituants de plus de 2 mm*: dans les limons ils sont très rares; on ne les trouve que dans les types intermédiaires résultant du mélange avec les cailloutis, sur les pentes.

1.1.2. *Sable grossier*: le sable grossier (200 microns à 2 mm) est rare: 1 % à 13 % (exceptionnellement).

1.1.3. *Sable fin* (20 à 200 microns): il est bien représenté: 30 à 46 % (à 10 cm de profondeur). On a distingué les sables très fins 0.02 mm à 0.05 mm très dominants (25 à 30 %); fins 0.05 à 0.1 (1 à 5 %); moyennement fins 0.1 à 0.2 mm (4 à 7 %).

1.1.4. *Limons*: le limon (2 à 20 microns) est également abondant d'où le nom, d'ailleurs imprécis, de *limon des plateaux*: 38 à 49 %. On a distingué des limons fins (sédimentation en 8 heures), les plus néfastes: 5 à 10 %, et des limons grossiers (sédimentation en 2 heures): 35 à 40 %.

1.1.5. *Argile*: l'argile agronomique (inférieure à 2 microns) comprend de l'argile colloïdale inférieure à 1 micron (les 3/4 du total dans une mesure faite en 1950) et des éléments très fins (1 à 2 microns), dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des argiles et celles des limons (Voir V 17, XI 4 et XII 7).

1.1.6. *Matière organique*: elle occupe 3 à 6 % en surface; 1.3 à 2 % à 20 cm; 0.03 % à 0.05 % en profondeur où elle est donc négligeable. La matière organique est mal décomposée dans les sols les plus affectés par l'eau stagnante; elle disparaît au contraire rapidement dans les sols bien drainés sous taillis-sous-futaie où elle est oxydée rapidement.

CRISSEY

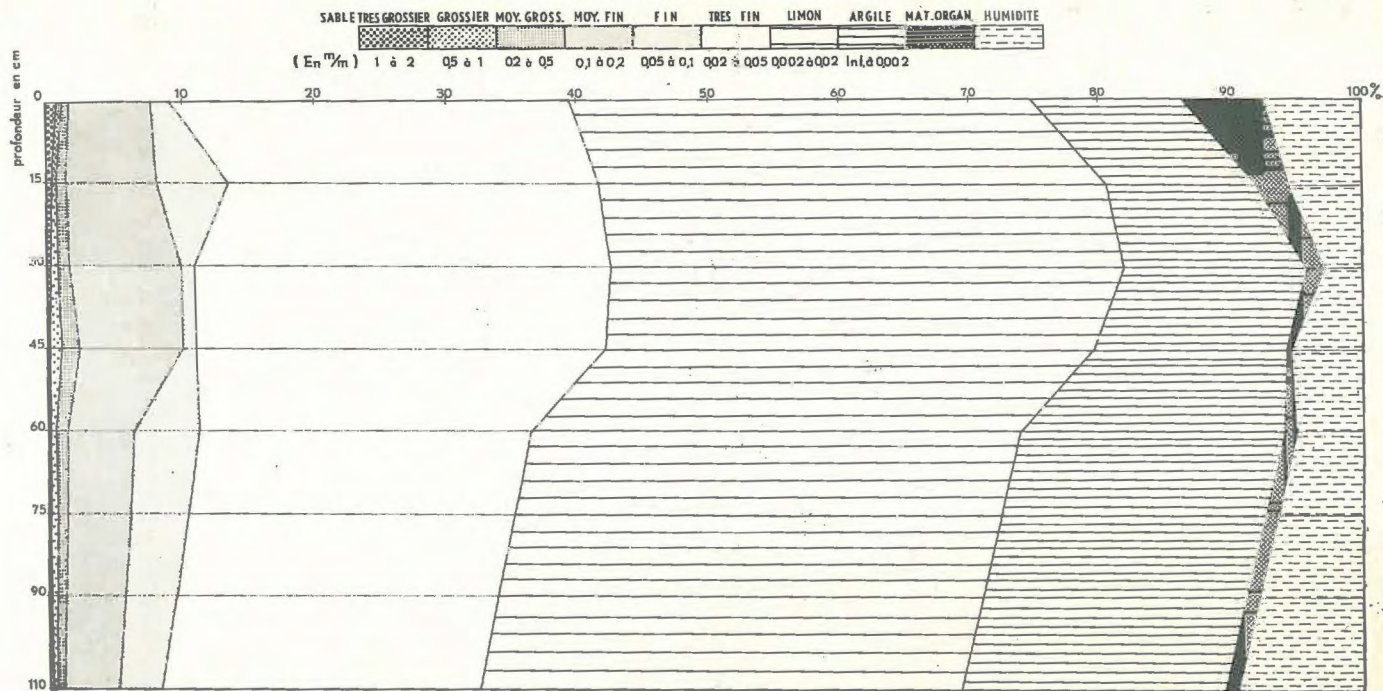


FIG. 4. — La teneur de ce sol (de type moyen en forêt de Chaux) en sable grossier est faible (négligeable en dessous de 15 cm); en sable fin + limon très importante; en argile, elle augmente un peu avec la profondeur; en matière organique, elle devient négligeable à partir de 15 cm.

TEXTURE
Comparaison avec les loess

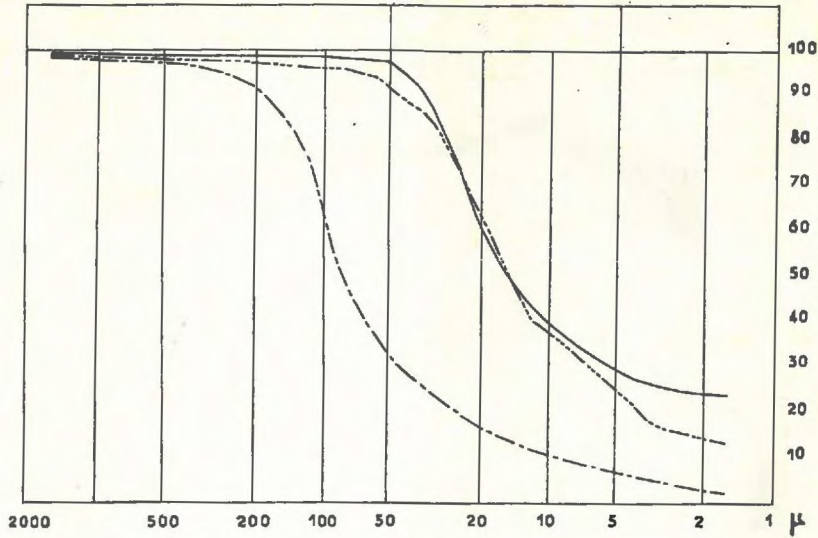


FIG. 5.

————— Loess minimum.
 - - - - - Chaux I.14 Surface
 - · - · - Loess maximum.

Courbes cumulatives, comparaison avec les loess: on voit que les sols de surface et même celui de 30 cm, ont leurs courbes en grande partie comprises dans l'intervalle qui est réputé être celui des loess. Ce n'est pas le cas du sous-sol à 130 cm. On peut penser que les premiers sont éoliens, mais non le dernier.

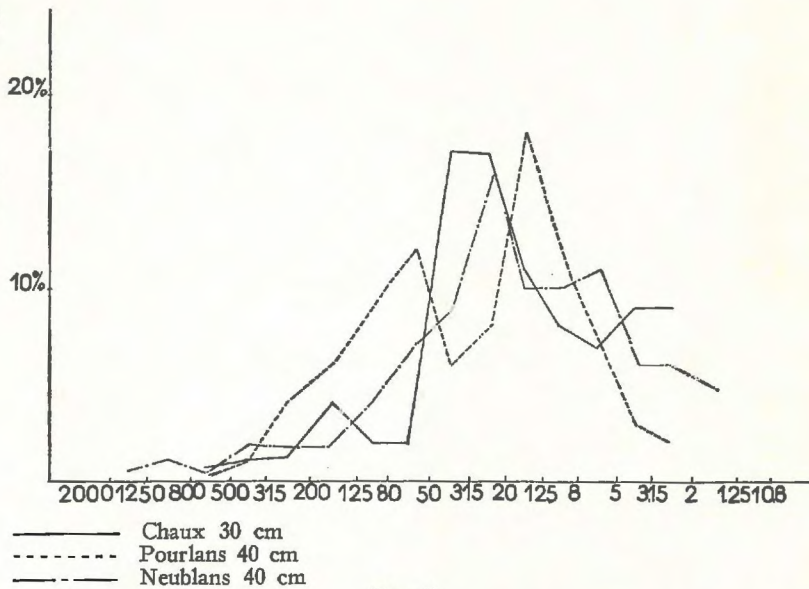


FIG. 6.

- 1) Le maximum de fréquence, du sol de Chaux 30 cm, se produit pour 30 à 40 microns.
- 2) Poullans et Neublans, de textures très voisines, portent de belles chênaises, tandis qu'à Chaux elle est médiocre: la texture n'est pas, en soi, un facteur décisif.

1.2. ETUDE D'ENSEMBLE (fig. 5 et 6): Les constituants qui dominent sont ceux de 5 à 50 microns. Le maximum se situe vers 15 microns. V. aussi ch. XI 5.

ANALYSE (% de terre sèche) FORET DE CHAUX

Horizons	pH	Argile	Limon	Sable fin	Sable gros	Mat. Org.	Ca échangeable m.e. %	Capacité d'échange m.e. %
Surface	5.2	8	42	43.7	1.5	4.8	1.2	16.2
0.12 à 0.15	5.5	9.5	44.5	43	1.3	1.7	1.2	8.75
0.30 à 0.35	5.7	10	41	46.4	1.3	1.3	0.8	16.2
0.50 à 0.55	5.3	17.5	40	41	1.0	0.5	0.8	29
0.90 à 0.95	5.1	13.5	40.5	43.8	1.6	0.6	2.6	19
1.30 à 1.35	5.4	23	36.5	38.4	1.7	0.4	2.6	24.4

COMPARAISON DE DEUX SOLS

	moins de 1 micron	1 à 2 microns	2 à 5 microns	5 à 10 microns	10 à 20 microns	20 à 200 microns	200 à 2000 microns	M.O.	H ₂ O
Sous peuplement normal	13.5	4.0	8.0	15.5	23.0	30.4	1.9	2.5	1.2
Sous vide	14.0	4.0	7.0	16.0	23.0	30.1	1.1	3.2	1.5

COMPARAISON DE TROIS SOLS

3 points différents même profondeur (35 cm)	pH	Argile			Limon			Sable fin	Sable gros	H ₂ O	Matières organiques
		a < 1 micron	b 1 à 2 microns	c 2 à 5 microns	d 5 à 10 microns	e 10 à 20 microns	20 à 200 microns	200 à 2000 microns			
Fosse A	5.0	13.5	4.0	8.0	15.5	23.0	30.4	1.9	1.2		2.5
Fosse B	5.4	9.5	6.0	11.0	8.5	25.0	34.3	2.0	1.2		2.5
Fosse C	5.2	14.0	4.0	7.0	16.0	23.0	30.1	1.1	1.6		3.2

1.3. CONSÉQUENCE DE LA TEXTURE :

1.3.1. *Les débris de feldspath ont perdu par un fort amenuisement (dû au transfert ou à la gelifraction) et par lessivage, une grande partie des éléments nutritifs solubles*; les débris ne sont plus guère susceptibles d'en libérer de nouveaux, d'où la *paupreté chimique des sols*.

Nous avons justement constaté que, *rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes en sable grossier, les sols de la forêt se trouvaient, en fait, rangés à peu près suivant leur valeur forestière décroissante*. Cette constatation ne saurait être fortuite; peut-être faut-il la rapprocher des observations de J.-F. LEVY 1963, sur la vigne. Ce chercheur pense que les matières fertilisantes débloquées naturellement ou apportées artificiellement font l'objet d'un passage rapide dans les solutions du sol si elles ne sont pas captées par l'argile.

Les éléments très fins des limons sont, pour une bonne partie, des débris de quartz, chimiquement infertiles.

1.3.2. Ces éléments très fins ne sont pas colloïdaux: ils ont donc un *faible pouvoir de rétention* pour l'eau et les cations apportés à leur voisinage par la litière ou les engrais.

1.3.3. Cette texture a une *influence sur la structure*: la pauvreté relative en argile fait, lorsqu'il y a, d'autre part, peu d'humus, que le sol, constitué de grains fins entassés les uns sur les autres, montre une mauvaise structure. La forte hétérométrie fait que les petits constituants comblent les vides entre les plus gros; tant que la teneur en argile est faible, la structure est mauvaise. On sait, d'ailleurs, que le rapport limon/argile caractérise la *batance* du sol: dans le cas des sols de la forêt de Chaux, ce rapport est toujours élevé: 2.55 (parcelle 1317) à 5.53 (Crissey 10), en moyenne 3.2. Le rapport SG/SF est d'environ 1/10; c'est-à-dire qu'il est faible. Si l'on compare les sols de la forêt de Chaux à des sols analogues portant de meilleures forêts, on s'aperçoit que ces derniers sont généralement plus riches en sable grossier et en argile, moins riches en sable fin et surtout en limon.

2. STRUCTURE :

La structure des sols forestiers a été étudiée par HESSELMAN 1910; BURGER 1922, 1923, 1924; WITTICH 1930 (coupe rase); AUTEN 1933; WAHLENBERG 1930; LUTZ 1944; RICHARD (F.) et BEDA (J.) 1953; KRAMER 1956; RID (H.) 1962.

2.1. FORMES DE LA STRUCTURE: En forêt de Chaux, il faut distinguer nettement 3 couches: inférieure, moyenne, supérieure.

2.1.1. *Structure de la couche inférieure* (sous-sol supérieur et substratum):

2.1.1.1. Généralement, il a une structure fondue par grands blocs, structure ayant tendance à devenir macropolyédrique ou macroprismatique par temps sec. Elle est due à la richesse en argile : 30 % et plus. *L'ensemble est plastique quand il est humide, dur quand il est sec.* Les prismes ou polyèdres ont de plus fortes dimensions en profondeur.

2.1.1.2. Parfois, en particulier dans les faibles dépressions des plateaux, la structure a l'aspect feuilleté horizontalement ; il est dû à un tassement. Peut-être ce tassement est-il dû au poids de la colonne d'eau lorsque le sol était un fond lacustre ? simple hypothèse puisqu'il existe des sols fortement tassés qui n'ont jamais été sous l'eau.

Quoi qu'il en soit, la conséquence de cette structure est une direction privilégiée de circulation de l'eau ; elle se fait horizontalement entre les lits de grains ; les réductions chimiques décolorantes et les mises en mouvement de Fe et Mn se font dans le même sens : d'où l'aspect feuilleté avec lits minces, alternativement gris et rouges, un peu comme des varves ; d'où un obstacle plus marqué pour les racines.

2.1.2. *Structure de la couche moyenne* : elle est fondue en grande masse par suite de l'action périodique de l'eau ; la couche est meuble, mais l'aération reste faible pour toute partie marmorisée ; la prédominance des éléments limoneux fait qu'il n'y ait pas de fissuration par gonflement ou retrait des colloïdes.

2.1.3. *Structure de la couche supérieure* : (« sol forestier » proprement dit). Dans la couche des 20 centimètres supérieurs, non atteinte par la nappe perchée (ou rarement atteinte), c'est une structure en grumeaux (plus ou moins bien individualisés), érigée, aérée, meuble, voisine de celle des sols bruns des pentes ; c'est l'humus (de la forêt ou de la moliniaie), la présence des racines et petits animaux, ainsi que les variations de température et dessiccation qui provoquent ce maintien d'un bon état structural.

Comment se fait la démarcation entre ces deux couches moyennes et inférieures ? pour divers types de sols classiques, elle se fait à la limite de l'accumulation argileuse (horizon B). Pour ceux étudiés ici, c'est plutôt le niveau (qui est différent) de la très ancienne compaction primitive, ou un niveau plus élevé correspondant au niveau moyen ennoyé à notre époque : c'est seulement au-dessus de ce niveau moyen que la structure soulevée due à la vie animale et végétale peut se maintenir.

2.1.4. *Structures fondues* : Il convient de distinguer nettement la compaction de l'induration :

A. — La compaction affecte la couche moyenne. Elle correspond à une *marmorisation nébuleuse* ; elle dégrade une couche anté-

rieurement structurée. Elle se produit actuellement, chaque fois qu'il y a destruction de la structure par l'eau interne de la nappe perchée. C'est un affaissement dû à la disparition des voiles et piliers colloïdaux. Le sol garde une certaine déformabilité s'il est frais. Le mal est assez facilement remédiable, la structure peut être reconstituée directement.

B. — La consolidation affecte la couche inférieure (sous-sol). Elle porte sur un matériel sensiblement plus argileux. Elle semble être ancienne, due à des actions climatiques antérieures, souvent différentes des actuelles; probablement le matériel n'a jamais été structuré, du fait qu'il n'était pas proche de la surface et qu'il n'était pas parcouru par des racines. Elle comporte peut-être une cimentation; en tout cas, du fait de la sécheresse, le matériau forme bloc. Elle correspond à une *marmorisation fissurale contrastée*. Un émiettement préalable est à peu près indispensable pour la restauration rapide de la structure (cependant, l'action lente d'un très grand nombre de radicules peut opérer cette division et structuration sans émiettement).

2.2. STABILITÉ DE LA STRUCTURE: quelle que soit la nature de la structure, il est une propriété importante qu'il faut préciser: c'est celle de la stabilité des agrégats aux agents destructeurs, en particulier la résistance à l'eau, car des agrégats plongés dans l'eau s'effondrent et se divisent.

2.2.1. *Appréciation*: à l'imitation de VILENSKY, nous avons fait tomber des gouttes sur de petites mottes jusqu'à désagrégation complète: nous avons constaté la grande fragilité de la structure des sols de notre forêt.

2.2.2. *Mesures par tamisage*: des essais nous ont donné les chiffres suivants:

	Non agrégé 0,2mm	Agrégé (mm)					
		0,2 à 0,5 mm	0,5 à 2 mm	2 à 3 mm	3 à 5 mm	5 à 8 mm	8 mm
CHAUX III/1 (hêtre)	30 %	15 %	37 %	5 %	9 %	4 %	0 %
		52 %					
CHAUX XI (chêne)	34 %	30 %	33 %	2,5 %	0,5 %	0 %	0 %
		63 %					
CHAUX XII (billons de grosse charrue à deux versoirs)	74 %	12 %	12,5 %	0,5 %	1 %	0 %	0 %
		24,5 %					
CHAUX I 2 (chêne)	52 %	6 %	14 %	5 %	10 %	13 %	0 %
		20 %					

D'autres essais, avec un sol tamisé, de 1 à 2 mm, agité pendant 1/2 heure à 30-40 tours/minute dans de l'eau de ville (eau calcaire), ont donné, pour un sol de I 12 à 10 cm, 7,6 à 12 % d'agrégats de 0,2 à 2 mm, tandis qu'un sol de la forêt de Saint-Aubin sur alluvions donnait 24 %. Si l'on ajoute le sable grossier, on voit que le total des éléments résistant à l'eau n'est que de 11 à 16 %.

D'autres essais ont été faits avec un sol séché à l'air et une eau calcaire, le flacon était retourné 20 fois. On recueillait le dépôt sur une série de tamis plongés 5 fois dans l'eau; on pesait les divers refus. Le résultat pour divers échantillons d'un même profil en I 14 ont été les suivants :

Echantillon de I/14 (Peupl. clairié)	Non agrégé (moins de 0,2 mm)	Agrégé (en mm)					
		0,2 à 0,5	0,5 à 2	2 à 3	3 à 5	5 à 8	plus de 8
Surface	51 %	8 %	23 %	5 %	5 %	8 %	0
12/15 cm	42 %	5 %	27 %	9 %	11 %	6 %	0
50/55 cm	80 %	17 %	3 %	0	0	0	0
90/95 cm	51,5 %	26 %	22 %	0,5 %	1	0	0
120 cm	55,5 %	31 %	12 %	1 %	0,5 %	0	0

L'horizon 50-55 cm a la plus mauvaise structure parce qu'il est le plus fréquemment altéré par la nappe aquifère perchée, parce qu'il contient moins d'argile que les horizons plus profonds et parce qu'il a moins de matière organique que les horizons plus superficiels.

2.2.3. Mesures des indices par NOVACEL à Beauvais (méthode HÉNIN).

Référence	Eau	Agrégats		% limon et argile	% sables grossiers	Indice de stabilité S
		Alcool %	Benzène %			
Sous-sol compact quart en Réserve de Crissey	9.90	15.8	3.45	52.3	4	9.6
Sol à 10 cm quart en réserve de Crissey (Limon des pentes)	9.50	14.25	5.15	43	2.42	5.55
Sous-sol à 40cm Forêt domaniale de Chaux parcelle 686	27.70	32.5	12.05	41.6	8.65	2.55

Ce sont des sols à structure peu stable ou moyennement stable. Nette est la supériorité du sol des pentes, ainsi que celle de l'horizon supérieur, sur celle de l'horizon profond marbré.

CHAUX 1/14 PROPRIETES PHYSIQUES
STABILITE DE LA STRUCTURE

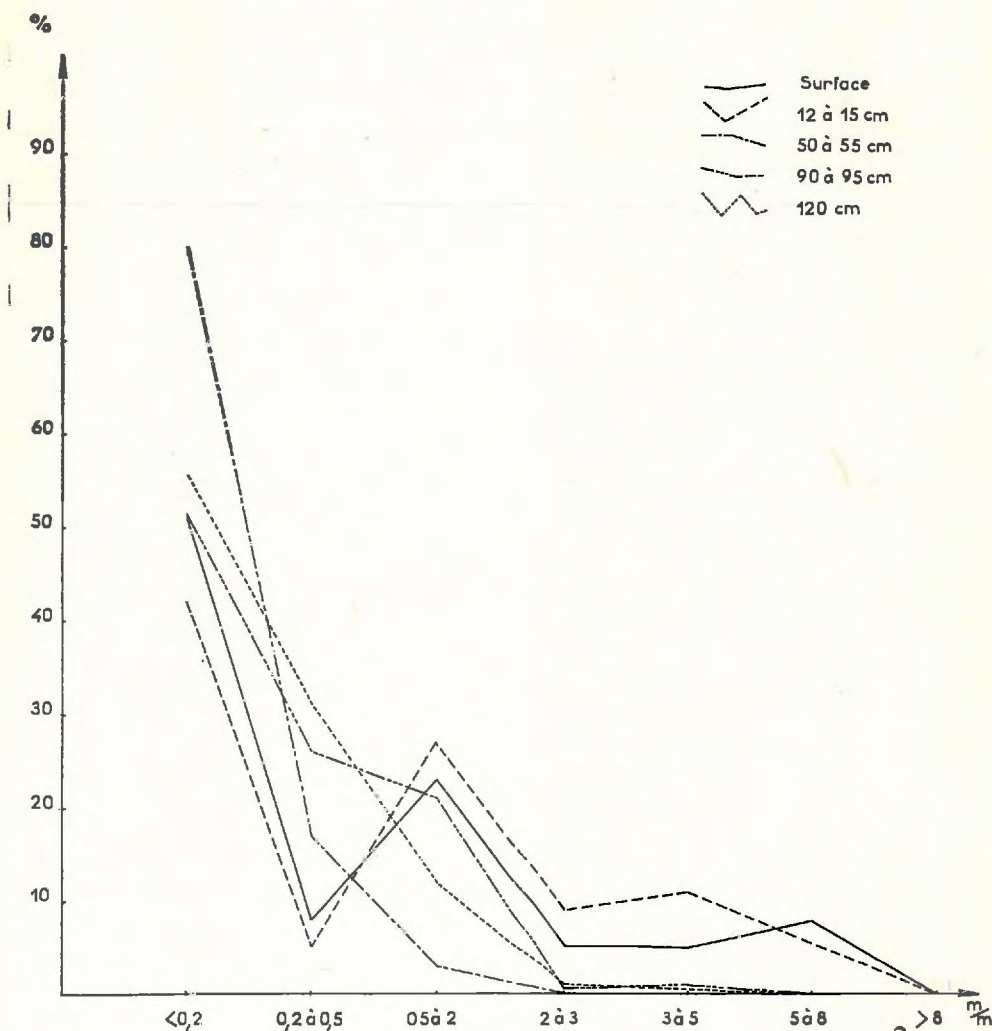


FIG. 7.

Les couches les plus désagrégées par l'eau sont les couches médianes (50 à 55 cm) ; la plus stable est la couche superficielle riche en humus.

2.2.4. Mesures des indices faites par la Station de Recherches Agronomiques de Dijon.

		K	Is	Agrégats			Taux (%) de sables grossiers.
				Air	Alcool	Benzène	
Chaux I 14	8 cm	2.5	1.26	17.6	23.2	22.4	2.2
	35 cm	1.3	4.0	7.0	18.1	4.6	1.3
	65 cm	1.15	4.80	8.0	24.2	2.0	1.0
	130 cm	1.07	5.48	11.2	23.4	3.20	1.1

Les chiffres de K sont supérieurs à ceux donnés par HÉNIN pour des horizons podzolisés, supérieurs à ceux des limons sodiques, inférieurs à ceux donnés pour des limons chaulés, et très inférieurs, bien entendu, à ceux des sols de rendzine ou de prairie.

En calculant les log. de 10 K et de 10 Is et en comparant avec les chiffres donnés par GRAS (1961) dans la Sarthe, pour des pommiers, on constate que la surface a de très bons indices, mais qu'à partir de 35 cm les caractéristiques sont très mauvaises.

2.2.5. Destruction de la structure: elle se fait:

a) *par compression mécanique*: piétinement; passage de machines; chute de gouttes de pluie dans les vides de la forêt ou après une coupe rase.

b) *par destruction* des enrobements, ponts, piliers, tenons colloïdaux sous l'effet de l'eau de pluie s'il s'agit de la surface, ou de l'eau stagnante de la nappe perchée s'il s'agit de la profondeur. Cette eau provoque le gonflement des micelles et l'éclatement des édifices. Elle a d'ailleurs un effet dispersant sur les colloïdes par suite de la présence des acides en solution. D'où l'émiettement des agrégats, la disparition des pores, l'aplatissement de l'ensemble, l'entassement des particules en une masse compacte.

c) *par comblement* des interstices existants à un niveau déterminé; il résulte de la descente des colloïdes dispersés de la couche supérieure ou même d'éléments très fins, non colloïdaux, mais les-sivés.

Plus le sol est mouillable, moins il y a de gros agrégats et moins la structure est stable.

Si l'on incorpore au sol minéral des éléments moins mouillables, telles que les matières organiques, la stabilité augmente.

Cette instabilité de la structure s'exprime de façon différente suivant la profondeur : en surface, il s'agit de battance, donc de glaçage ; dans la couche moyenne entre 25 et 50 cm, elle résulte des ennoyages très prolongés ; en profondeur, dans la couche dure, il n'y a pas eu, à proprement parler, de structure ; l'état tassé et consolidé est ancien et chronique ; mais nous verrons plus loin qu'on peut espérer créer, dans l'avenir, un meilleur état structural.

La destruction de la structure est évidemment plus marquée si la durée d'action totale de l'eau est plus longue, c'est-à-dire pour des sols soumis depuis un plus grand nombre de millénaires à l'action des eaux météoriques (plateaux ou glacis et, plus encore, les faibles dépressions de ces plateaux).

2.2.6. Causes des défauts de structure: Ce sont :

a) l'excès du rapport limon/argile ; il a en moyenne pour un sol de surface la valeur 3, il atteint couramment 4, parfois 6. Dans les bons sols de la vallée de la Saône ou dans le loess du Tannenwald, il ne dépasse pas 1.5.

b) l'action de l'eau stagnante provoquée par l'imperméabilité du sous-sol.

c) l'insuffisance primitive des cations (Ca, Mg), d'ailleurs accrue par les lavages prolongés de la nappe perchée.

d) l'insuffisance de l'humus et sa nature (acides fulviques?)

e) la destruction des minéraux argileux sous l'effet des acides organiques.

2.2.7. Effets d'une mauvaise structure: (originelle ou acquise par dégradation). Ils sont nombreux :

a) Aération insuffisante en tout temps (NIRZSCH estime que seuls les pores de plus de 70 microns sont bien aérés). L'atmosphère du sol et l'eau se chargent de gaz carbonique. L'humus devient toxique. Les racines des arbres souffrent en elles-mêmes. Les organismes auxiliaires animaux et végétaux, la plupart aérobies, souffrent également. Au contraire, un sol aéré a une bonne activité biologique.

b) Diminution de la rétention d'eau en période sèche par diminution de surface adsorbante (l'eau utile diminue) et aussi diminution des réserves en cations.

c) Micropodzolisation.

d) La résistance mécanique à la pénétration des racines est accrue (c'est un inconvénient mineur).

e) La pellicule superficielle est davantage sujette à l'érosion hydrique ou éolienne: c'est le cas des espaces terreux, plans, subsistant entre les mottes de molinie (ce qui a pour effet de relever quelque peu à la longue le niveau relatif de ces mottes; cet effet s'ajoute à l'exhaussement spontané dû au bourgeonnement de cette graminée).

2.3. DENSITÉ APPARENTE. NOUS AVONS TROUVÉ:

III 5 à 5 cm: 1,14; à 25 cm: 1,18; à 25 cm: 1,38; à 50 cm: 1,38

I 12 surface: 1,09 (sec) ou 1,05 (humide)

I 14 surface: 1,01; à 30 cm: 1,32; à 50 cm: 1,60

I 30 surface: 1,16; à 50 cm: 1,64

Elle est fort élevée puisque pour un sol meuble elle est couramment de 1,2. Notons que NIKIFOROFF a trouvé 1,87 pour un hardpan et RICHARD 1,59 à Färrach. L'augmentation du poids spécifique des particules du sol en profondeur (2,7 au lieu de 2,6) est faible; ce n'est pas elle, évidemment, mais bien la structure qui crée l'augmentation de densité apparente.

La mesure de la densité apparente serait pour nos sols un moyen simple et efficace de diagnostiquer la valeur, au point de vue physique, d'un échantillon donné, à condition, bien entendu, d'opérer sur des échantillons de même humidité ou de faire la correction. On pourrait ainsi faire des « profils de densité », qui seraient utiles.

Malheureusement, il y a une certaine difficulté opératoire à prélever les échantillons; les deux faces coupées au couteau ne sont pas rigoureusement planes; c'est une cause d'erreurs qui nous a empêché d'employer cette méthode à grande échelle pour supputer les valeurs des différents sols à repeupler.

2.4. POROSITÉ*:

La porosité est évidemment sous la dépendance de la texture, de la structure, donc de la teneur en matières organiques, de celle

* Il y a 3 sortes de porosité:

- 1) Porosité texturale, s'il y a suffisamment de gros constituants et pas trop d'hétérométrie: elle est stable.
- 2) Porosité structurale d'agrégats, dépendant de la teneur en bases minérales (calcium) et en humus: elle est assez fragile.
- 3) Porosité structurale tubulaire (conduits de racines de lombrics ou de larves d'insectes): elle est très fragile.

en cations, ainsi que de la gelée, de la culture du sol, du couvert végétal.

	Macroporosité (supérieure à 8 microns) %	Microporosité (inférieure à 8 microns) %	Porosité totale %
Clairière I 14			
Surface	40	25	65
14 cm	15	39	54
35 cm	5	39	44
50/55 cm	8	36	44
90/95 cm	0	37	37
130/135 cm	0	37	37
Baraques Jupilles (belle chênaie, mais sous-sol marmorisé)			
10 cm	14	36	50
50 cm	4	38	42

2.5. COMPACTÉ ET DURETÉ :

2.5.1. Essais du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Dole (fig. 8) : l'enfoncement demande une force de 5 à 7 fois plus grande pour un échantillon à 74 cm que pour un autre situé à 10 cm. Un essai avec des petits cylindres a donné les résultats suivants :

Echantillon n°	Prof. cm	Indice C.B.R.	Pression Kg/cm ² pour un enfoncement de 15mm	Indice des vides	Densité humide	Teneur en eau	Densité sèche	Volume eau + air	Contenu en air
1	8	1.4	9	1.2	1.67	39.8%	1.19	65.1	15.3
2	24	2.8	16	0.78	1.87	24.9%	1.49	43.4	18.5
3	48	3.1	17	0.79	1.91	29.3%	1.47	44.2	14.9
4	74	6.2	26	0.71	1.94	29.3%	1.55	41.6	15.3

2.5.2. *Pénétromètre*: En forêt, avec un appareil de notre fabrication (disque lourd troué glissant le long d'une tige et tombant

en chute libre), nous avons obtenu les chiffres suivants pour l'enfoncement en centimètres :

	1 ^{er} coup	2 ^e coup	Moyenne
Surface	—	—	—
10 cm	15	4	9.5
40 cm	5	2	3.5
50 cm	5	5	5
70 cm	3	1	2
70 cm	3	1	2

La couche superficielle plus lacuneuse (structure en agrégats, galeries d'animaux et de racines) est moins résistante; c'est celle qui a la plus faible densité apparente. La résistance dépend de la texture, de la forme de structure et de la présence ou absence de ciment. Elle augmente avec la profondeur, de façon énorme. On peut imaginer qu'il y a eu tassement ancien sous-lacustre, ou encore qu'il y a eu compression lors des gels de l'eau dans les fentes de sécheresse aux époques où les glaciers étaient proches :

Lorsque le sol est humide, il devient pâteux, la résistance devient plus faible.

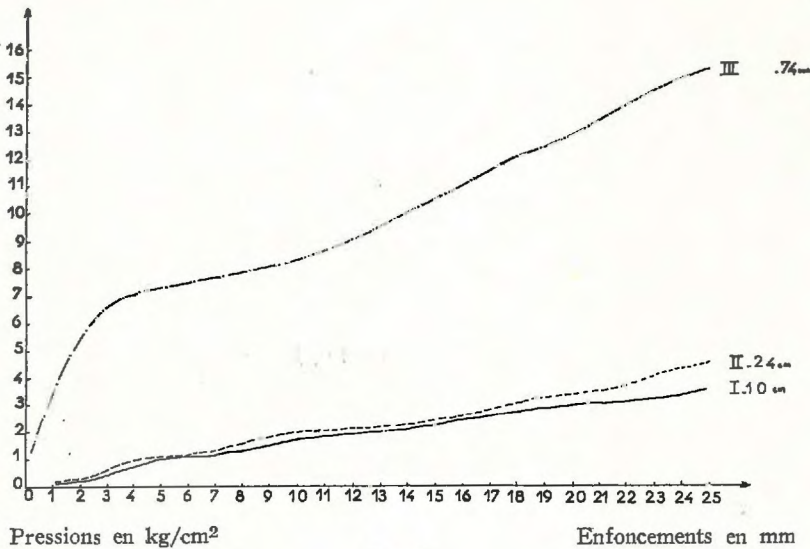


FIG. 8.

Aussi bien à 24 cm qu'à 10 cm le sol est relativement mou. Mais à 74 cm la pression nécessaire pour un même enfoncement devient 7 fois plus forte, indice d'une consolidation forte et probablement très ancienne.

Lorsque le sol est très sec, il résiste fortement; il est comme de la brique (fragipan).

MESURES de QUANTIN en 1947

Date	Coupe	Végétation	contenance		capacité		contenance eau + air %	Diagnostic de M. QUANTIN
			en air %	en eau %	en air %	en eau %		
25.6.47	I 1	Futaie très claire presque sans taillis	31.8	19.1	5.4	45.5	50.9	Sol forestier bon
	I 2	Très belle futaie chêne rouvre	21.6	29.5	4.5	46.2	51.1	- d° -
	I 28	Belle futaie sur sol brun filtrant des pentes	40.5	16.4	4.5	43.4	56.9	- d° -
	XIII 5	Vide, trou C { profondeur 5 - 12 cm { profondeur 25 - 32 cm	9.6	43.3	2.3	63.6	52.9	Mauvais Très mauvais
			7.2	54.5	1.8	59.9	61.7	
- d°	Trou B, zone intermédiaire entre le peuplement normal et le vide	12	38.8	3	47.8	50.8		
21.7.47	I 12	Vide, embranchement route						
		Chien rendu :						
		{ à 5-12 cm profondeur { à 45-50 cm de profondeur	26	29.6	6.8	46.8	55.6	Sol forestier bon
	IX 4	{a) sous taillis vicilli	10.0	46.1	2.8	51.7	56.1	Mauvais Très mauvais
		{b) vide	8.4	48.5	1.5	55.3	56.9	
III 5	Hêtraie (conversion) { à 15 - 20 cm { à 50 - 55 cm	34.4	19.8	7.3	46.9	54.2	Sol forestier très bon	
		29.4	23.3	4	47.7	52.7	bon	

Cette influence de l'humidité du sol en place est assurément une gêne pour l'interprétation des mesures et la généralisation de la méthode de test des sols.

2.5.3. *Tassement naturel*: Echantillons de sol pris entre 10 cm et 20 cm, sous un hêtre, coupe n° 11, forêt communale de Crissey. Les échantillons avaient été placés dans des boîtes de métal de hauteur 24,6 cm et diamètre 15,5 cm.

	Témoin	Tassement observé
1	Témoin (non couvert)	5 cm
2	d° + paille haricots	7 cm
3	d° + fumier	6.5 cm
4	d° + feuilles de chêne	6.5 cm
5	d° + humauby	8.7 cm
6	d° + plâtre	5.4 cm
7	d° + calcaire	7.2 cm
8	d° + huile de vidange	6 cm
9	d° + huile à salade	5 cm
10	d° + krilium	3.5 cm
11	témoin couvert	1.5 cm

Dans les pots 1, 2, 3, 5, l'herbe pousse, dans les autres rien ne pousse; c'est-à-dire que les feuilles de chêne, le plâtre, le calcaire, les huiles de salade et de vidange se sont révélés toxiques. Le témoin couvert n'a probablement pas reçu assez d'humidité et de lumière pour assurer la végétation.

Le témoin couvert, à l'abri de la pluie, a eu un tassement trois fois plus faible; sa structure s'est donc maintenue. Les échantillons avec matière organique ont subi un fort tassement, probablement par suite de la combustion de la matière organique. Le calcaire n'a pas eu d'effet; le krilium a eu un bon effet.

2.6. L'AIR DANS LE SOL:

2.6.1. *Contenu en air*: RID, en 1962, a trouvé pour un pélosol à pseudogley jusqu'à 15 cm: 20 %; de 15 à 40 cm: 8 %; en-dessous de 40 cm: 4 %.

En forêt de Chaux, les mesures de QUANTIN, le 21 juin 1947, ont donné en sol à marbrures 7 à 34 % (contre 40 % en sol de pente). Sous les futaies de chêne, il était de 20 à 30 % (1/3 à 1/2 du volume des vides), sous hêtraie de 40 % en surface, sous moliniaie de 9,6 % à 10 cm et de 7,2 % en profondeur (soit 1/10 du volume des vides). Ce contenu diminue quand le volume total des

vides diminue ou quand la teneur en eau augmente. Les chiffres pris en diverses stations un même jour peuvent être comparés utilement, mais non ceux pris à des jours différents.

2.6.2. *Capacité en air*: C'est la teneur en air lorsqu'il y a le maximum d'eau. QUANTIN a trouvé 1,5 % à 7,3 %. Dans de belles futaies chêne elle était de 4,5 à 5,4 %, sous hêtraie elle était de 7,3 %. Dans un vide à molinie 2,5 % en surface, mais 1,5 % en profondeur. Tous ces chiffres sont faibles (Voir QUANTIN, 1962).

2.7. SURFACE SPÉCIFIQUE: Ce facteur est étudié dans notre « Contribution »... (A.A., 1960), pages 665 et suivantes. La surface spécifique varie de 14 à 50 m²/gr. Exceptionnellement, elle atteint 119; elle est plus grande pour les échantillons plus humifères (molinie) et plus argileux (sous-sol de VIII 25). Elle est voisine de celle des loess.

Il y a un minimum dans l'horizon lessivé (marmorisé ou non) (16 m²/gr).

La rétention d'eau et la fertilité chimique sont assurément en rapport étroit avec ce facteur. On sait que 100 m² absorbent 23 m.e. %.

2.8. TEMPÉRATURE: Ce sont des sols réputés « froids »; ils sont d'autant plus lents à se réchauffer qu'ils sont plus mal drainés; la végétation en souffre.

3. L'EAU DU SOL*:

Cette question a été étudiée par divers auteurs: *sols forestiers*: OTOTZKY 1897; HENRY 1903; RAMANN 1906; MITSCHERLICH

* ACTION DE L'EAU DANS LE SOL

FAVORABLES (eau suffisamment oxygénée)

1° Alimentation des racines des végétaux

1. Besoins en eau;

2. Véhicule des substances minérales.

2° Besoins de la microflore (intermédiaire obligé dans la nutrition des arbres) pour sa propre subsistance.

DEFAVORABLES (eau acide et peu oxygénée)

1° Dégradation de la structure par action mécanique et dissolution des ciments);

2° Asphyxie (l'eau se substitue à l'air dans les petits vides restants; elle se charge alors rapidement d'un excès de gaz carbonique);

3° Appauvrissement chimique par lessivage vertical ou latéral, nuisible aux plantes.

4° « Refroidissement » relatif du sol (qui est plus lent à se réchauffer).

Conséquences de ces actions défavorables:

1) Changement défavorable de la microflore et de la microfaune perturbant la santé du sol et l'assimilabilité des éléments fertilisants.

2) Arrêt de la croissance de certaines racines.

3) Pourrissement de certaines racines.

4) Mauvais humus.

1923; BURGER (H.) 1923; ZON 1957; VYSSOTZKI 1932; LUNT 1937, 1941; RICHARD (F.), WILDE et autres 1949, 1950; TSCHERKASSOW 1952 (dans la D.D.R.); RICHARD (F.) dates diverses; DEINES 1957; PIERCE (R.-S.) 1953. Les traités de sylviculture de BÜHLER (A.), DENGLE, PERRIN (H.)... lui consacrent un chapitre important. Sur ces questions, des recensions ont été publiées par ZON (R.) 1927 (aux U.S.A.); HÉNIN 1936; SCHAEFFER 1939; LUTZ et CHANDLER 1947; WILDE (S.-A.) 1950.

3.1. FORMES DE L'EAU DU SOL : On sait que l'eau existe sous des formes très diverses qui présentent des tensions très différentes, depuis l'eau de constitution des argiles jusqu'à l'eau libre occupant les grands vides. « L'eau morte » du sol trop énergiquement retenue ou celle qui est stagnante, donc non oxygénée, sont de médiocre utilité, ou sont même nocives pour les végétaux.

L'eau utilisable dépend :

a) de l'épaisseur de la couche explorée par les racines,

b) du pourcentage d' « eau utile » (différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement).

On admet couramment, depuis GASPARI, qu'il faut que la moitié des vides soit occupée par de l'air, l'autre par de l'eau. Si la porosité est de 30 %, il faut que la teneur en air soit de 15 % ; en fait, en forêt de Chaux, elle est souvent inférieure.

Les arbres résistent mieux à la sécheresse estivale que les plantes annuelles car leurs racines sont en place, en permanence, dans un profil plus étalé. Nous avons rarement vu des arbres souffrir vraiment de la sécheresse. Il n'en reste pas moins vrai que la sécheresse relative des sols de la forêt de Chaux en été ralentit la nutrition, donc la production. Il est possible qu'elle influe sur la ramification et l'élongation, provoquant ainsi le port « branchu » et « en pomier » ; elle provoque d'ailleurs des perturbations dans l'activité zoologique (diapose des lombrics) et bactérienne, donc un ralentissement de tous les métabolismes.

3.2. TENEUR EN EAU (EN POIDS) : Un calcul simple montre que le maximum, en poids, de taux d'humidité par rapport à la terre sèche est de 20 % pour une porosité de 40 % ; de 27 % pour une porosité de 50 % ; de 35 % pour une porosité de 60 %.

Pratiquement, il semble souhaitable que ces taux d'humidité soient respectivement de 10 %, 13 %, 18 %.

Avec 23 % d'eau en poids en profondeur, le sol peut être saturé alors que le même jour il ne l'est pas en surface avec 47 %.

3.3. TENEUR EN EAU (EN VOLUME) : En fait, nos mesures ont montré que l'eau occupe, en volume, de 10 % (petite éminence) à 40 % (sol mouillé).

Mais nous avons comparé les chiffres de forêt de Chaux avec ceux d'autres forêts nettement meilleures; il ne nous a pas été possible de tirer des conclusions; il y a de très belles forêts sur sol riche en eau, parfois même peu aéré; bien d'autres facteurs compensent totalement ou partiellement l'excès d'eau.

	Matière solide %	Eau %	Air %
	—	—	—
I/10 butte très bien drainée ...	32	10	58
I/14 à 15 cm, très humide	47	44	9
I/12 à 30 cm saturé d'eau	52	48	0

3.4. POTENTIEL CAPILLAIRE:

	Point de flétrissement permanent (pF = 4.2)	Capacité de rétention	Différence (eau réputée utile)
	—	—	—
<i>I/14 sol à sous-sol marmorisé</i>			
Surface	5 %	39 %	34 %
30 cm	6	26	20
130 cm	10	30	20
<i>I/28 sol brun des pentes</i>			
Surface	9 %	40 %	31 %
80 cm	9	27	18

Les horizons de surface ont un bien meilleur comportement que ceux de profondeur.

Les sols de moliniaie plus riches en matière organique et les sous-sols plus riches en argile ont besoin de plus grandes quantités d'eau pour approvisionner les plantes à un pF convenable. Ces sols ont donc une plus grande réserve d'eau; elle est, il est vrai, en partie inutilisable.

3.5. CONTENU EN EAU: Nous avons plusieurs fois comparé des plateaux voisins sous bois ou à découvert: il y a, en général, 5 % d'écart en surface, le sol à découvert étant le plus humide; aucune différence en profondeur.

Effet d'un abri: il était intéressant de savoir quel était, sous un abri, l'humidité du sol. Nous l'avons mesurée sous une cloche métallique de 0,80 m de rayon, et à côté de la cloche, en découvert:

	Le 8 mai 1952		Le 23 mai 1952	
	sous la cloche	à côté	sous la cloche	à côté
Surface ..	33 %	47 %	30 %	32 %
25 cm ..	31 %	43 %	22 %	22 %
50 cm ..	27 %	27 %	20 %	20 %

en surface après des pluies l'humidité est moindre; après une période sèche, il y a égalisation; en profondeur, l'abri n'agit pas, ce qui est normal.

Un morceau de sol marmorisé, à l'ombre, contenait 22 % d'eau; le morceau voisin, exposé au soleil, n'en contenait que 5 %: on voit l'importance de l'insolation, donc l'inconvénient du découvert en été pour des sols aussi exposés à perdre leur eau.

3.6. HUMIDITÉ ÉQUIVALENTE (= capacité de rétention): On a trouvé en poids: *Chaux*: surface: 24 %; 12-15 cm: 22 %; 30-35 cm: 22,9 %; 50-55 cm: 25,2 %; 90-95 cm: 26,1 %; 130-135 cm: 25,5 %. Pour d'autres échantillons, elle varie de 22 à 43,7 %.

3.7. OXYDO-RÉDUCTION: Le rH est d'environ 25. Contrairement à ce que nous pensions, nous n'avons pas trouvé de différence forte entre 2 échantillons d'un même couple moliniaie-hêtraie (Fourg 2, Chaux 751): c'est peut-être une des preuves qu'il ne s'agit pas de deux matériaux originellement et radicalement différents.

3.8. PERMÉABILITÉ: Cette question a été étudiée en ce qui concerne les sols forestiers par WOLNY 1889; KOPECKY 1914, 1928; BURGER 1923; AUTEN 1933; STEWART 1933; PEARSE et al. 1936; KOHNKE 1939; LUTZ 1940; DAVIDSON 1940; RICHARD avec BEDA 1953; RICHARD et FEHR 1934.

Le premier stade de l'infiltration artificielle mesure en réalité la perméabilité à l'air, puisque c'est l'air inclus qui est déplacé.

Il y a plusieurs sortes de perméabilité suivant que le facteur dominant est la texture, l'agrégation, la présence de racines (écoulement le long des racines), la présence de tubes provenant d'anciennes racines, la présence de fissures (seulement dans un matériau très argileux).

3.8.1. *Mesures en forêt:*

3.8.1.1. *Infiltrations dans des trous de sonde:* Nous avons fait de très nombreuses mesures dans des trous avec vidage naturel (pression décroissante), ou sous pression constante (bouteille renversée de Müntz), ou tube renversé.

Nous avons aussi mesuré des vitesses de déplacement latéral: elles sont très faibles:

3.8.1.2. *Infiltrations dans des cylindres:* Nombreuses mesures, sans ou avec cylindre de garde (celui-ci pour éviter « l'effet-champignon »).

3.8.1.3. *Retour de l'eau après vidage par seringue.*

3.8.1.4. *Les résultats:* En sol brun des pentes (à bon drainage), l'infiltration est par exemple 5 fois plus grande qu'en sol de plateau.

Pour un même sol de plateau, elle est par exemple 4 fois plus grande à 30 cm qu'à 50 cm, 368 fois plus grande à 10 cm, 460 fois plus grande en surface. On voit que ces différences dans le profil sont énormes. Elles expliquent la forme des enracinements étalés et très ramifiés en surface.

Les sols qui sont protégés par une litière sont 2 fois plus perméables que si on les a dépouillés de cette litière par grattage.

L'infiltration est 2 fois plus forte sous le couvert d'un arbre qu'en découvert.

Les sols sous hêtre sont beaucoup plus perméables que ceux sous chêne.

Ceux envahis par des semis de quelques années sont extrêmement plus perméables (par exemple 10 fois, ou même 300 fois plus).

La présence de racines dans le sol accroît beaucoup la vitesse d'infiltration qui peut, par exemple, doubler.

L'humidité diminue l'infiltration: si son taux passe de 12 % à 27 % l'infiltration diminue de 0,8 à 0,24 cm³/sec.

3.8.2. *Mesures au laboratoire:* V. PLAISANCE et VAN DER MOREL, 1960. Tous les résultats concordent pour montrer la très forte diminution de la perméabilité en profondeur.

On constate que la perméabilité est plus faible sous moliniaie que sous hêtraie bien que la porosité y soit plus forte.

3.9. BILAN DE L'EAU: Lorsque la forêt est clairière, la quantité qui arrive au sol est beaucoup plus grande et la transpiration est plus faible. Mais nous verrons qu'en période de nappe perchée le comportement est un peu différent: seule l'eau moyennement retenue est suffisamment oxygénée et utilisable, c'est celle des couches

moyennes; la couche profonde est de peu d'intérêt, elle contient d'ailleurs peu ou pas de racines. Par contre, si le couvert est déficient, la couche supérieure est parfois trop sèche.

3.10. NAPPE AQUIFÈRE PERCHÉE: Nous avons étudié attentivement, grâce à des milliers de mesures, l'occurrence de cette nappe dans diverses conditions. Nous renvoyons à nos autres travaux (A. A., 1959; A.I.S.S., 1959, etc...). Par exemple en XII^e série, coupe 5, de 1947 à 1965, nous avons enregistré en moyenne:

27 niveaux 0 à 20 cm de profondeur	104	} 365 jours
77 niveaux 20 à 40 cm de profondeur	
261 niveaux plus de 40 cm de profondeur ..	261	

Toujours, nous avons constaté des oscillations sensiblement parallèles, mais avec des niveaux très différents pour des points situés à peu de distance: les uns favorisés, les autres défavorisés.

Nous avons expliqué ces différences soit par les irrégularités du relief primitif enfoui qui sert de support imperméable à l'eau, soit par des compacifications locales, soit par des regradations locales (en particulier celles en forme d'entonnoir autour des anciens arbres), soit par des microreliefs (anciennes cultures, buttes d'accumulation éolienne).

Nos mesures ont montré que le niveau supérieur de la nappe perchée ne correspond nullement à une augmentation de la proportion en poids de l'eau dans le sol: en dessous de cette surface, l'eau est saturante parce que les interstices sont plus petits, mais le taux en poids n'est pas plus élevé.

3.10.1. *Critique des mesures des niveaux*: lorsqu'on creuse à la sonde hémicylindrique un trou, il y a forcément lissage des parois. D'autre part, quand l'eau y séjourne, il y a colmatage par les éléments fins. D'ailleurs, dans la couche profonde, l'imperméabilité dans le trou est telle que l'eau y séjourne plusieurs jours avant de disparaître par évaporation ou descente.

On ne s'étonne donc pas que l'eau, qui remplit le trou par suintement de l'horizon supérieur, reste dans ce trou bien après que la nappe perchée mince ait disparu. En mesurant la profondeur de la surface supérieure de l'eau du trou, on mesure donc (et c'est ce que nous avons fait des milliers de fois) tantôt, peu de temps après la pluie, de vrais niveaux, tantôt de *faux niveaux*, ceux qui seraient obtenus avec un récipient presque imperméable ouvert en haut et plongé dans le sol.

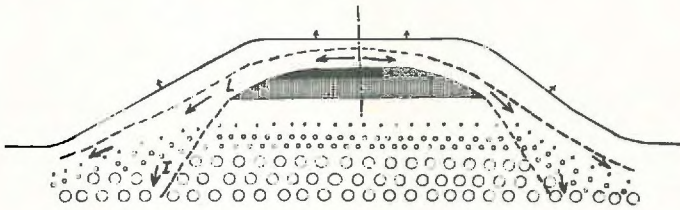
Il y a donc une interprétation à faire des mesures de niveaux d'eau.

Elle est délicate, car il est difficile de savoir à partir de quelle profondeur les vrais niveaux deviennent de faux niveaux.

Nos résultats ont pourtant une valeur réelle pour les raisons suivantes :

a) tous les niveaux supérieurs sont de vrais niveaux significatifs.

b) tous les bas niveaux sont en partie fonction de l'imperméabilité du sous-sol (écoulement à travers les parois); ils ont donc une signification différente. Certes, ils ne font plus partie d'une nappe ambiante, mais ils expriment le degré d'imperméabilité du sous-sol qui est un facteur important pour nous.



- I. Infiltration.
- L. Lessivage latéral.

FIG. 9.

Evacuation latérale de la nappe perchée: l'eau qui stagne sur la couche imperméable s'écoule latéralement de façon très lente vers les sols de pente; là, elle s'évapore ou s'infiltré dans le substrat.

En dehors des périodes où il y a un vrai niveau et saturation des horizons inférieurs, il faudrait éliminer les chiffres recueillis puisqu'ils sont un simple indice de l'imperméabilité locale du sous-sol sec. C'est pratiquement impossible sans de fastidieuses mesures de degrés d'humidité.

Les plus hauts niveaux sont significatifs; pratiquement, ce sont ceux qui se trouvent être dans la couche marbrée molle; l'épaisseur envoyée périodiquement est celle qui sépare le niveau d'eau mesuré et la couche marbrée contrastée dure.

Aucun des expérimentateurs qui nous ont précédé n'a attiré l'attention sur cette question: nous devons le faire.

Disons cependant, en négligeant cette restriction des faux niveaux, qu'il y a une différence moyenne de 30 cm entre les niveaux d'eau sous couvert complet et à découvert. Les conséquences en sont graves car l'écart se situe au niveau des enracinements les plus importants.

3.10.2. *Etude par d'autres chercheurs*: il n'est pas toujours facile de savoir quelle est la nappe étudiée par ces auteurs. Dans

le cas de OTOZKY, HENRY, MEINTSER (O.-E), ELLIS 1919, TOLMAN 1937, HOOGHOUDT 1952, c'est une nappe profonde phréatique, donc celle qui ne nous intéresse pas.

Par contre, il semble bien que ce soit des nappes perchées (*vadose water*) qu'ont étudié MOORE (R.-S.) 1959 (dans Hilgardia), GODMAN (R.-M.) 1959 (bouleau du Michigan), WILDE (U.S.A.), MÜCKENHAUSEN (Westphalie), Mme PÉRIGAUD (Brenne).

3.10.3. *Caractère de la nappe aquifère perchée*: elle est mince; quoique simple, elle n'a qu'un faible mouvement latéral; son plancher est à peu près constant, c'est celui du socle imperméable (30 % d'argile et plus), d'ailleurs lui-même irrégulier; son plafond est bosselé; elle n'existe qu'en sol subhorizontal; elle est plus mince si la pente locale est moins faible; elle disparaît en biseaux sur les pentes fortes; elle varie à chaque instant (les variations sont perceptibles en quelques heures) tout en gardant la même forme générale. Nous avons tracé un très grand nombre de courbes. L'épaisseur de la couche gorgée d'eau dépend d'une part:

a) *de l'alimentation*: pour les croupes, la seule source est constituée par les chutes de pluie. Pour les dépressions, il y a en plus un apport latéral par écoulement interne. Les pseudogley typiques sont en position sommitale; ceux des légères dépressions des plateaux ont déjà quelques minimes caractères des vrais gley.

b) *de l'épuisement*: par drainage vertical (généralement excessivement faible), par drainage latéral (fig. 9), par remontée capillaire suivie d'évaporation à l'extérieur du sol, par absorption par les racines.

Nous avons été amené à souligner la différence considérable qu'il y a entre une nappe phréatique qui est profonde et durable et les nappes perchées essentiellement intermittentes et d'épaisseur variable. Bien des erreurs ont été commises parce qu'on a parlé de « plan d'eau » sans faire cette distinction.

3.10.4. *Facteurs de variations de la nappe perchée*: ce sont:

- a) le relief et le microrelief,
- b) l'éloignement du niveau de base,
- c) les textures des divers horizons et celles du sous-sol profond (perméable s'il est caillouteux),
- d) la densité et la nature de la végétation locale,
- e) le climat de l'année; une pluie de P mm, dont il faut soustraire l'évaporation consécutive, relève le niveau de, par exemple, $5 P$ mm. C'est en somme un simple décalage entre l'alimentation et l'épui-

sement qui provoque la naissance de la nappe perchée. Sa durée en jours a été mesurée par les relevés des niveaux d'eau, par exemple, pour 365 jours

	0 à 20 cm très nocifs	20 à 40 cm nocifs	plus de 40 cm non nocifs
En découvert	49	119	197 jours
Sous gaulis de hêtre (voisin).	8	115	242 jours

Ce qui montre l'effet très favorable d'un peuplement pourtant encore peu évaporateur.

3.10.5. Effets de la nappe:

3.10.5.1. *Sur la végétation*: elle est nocive par les conditions asphyxiantes qu'elle provoque; elle agit, somme toute, comme un écran qui, souvent, empêche les racines de descendre. Par contre, elle alimente par remontées capillaires les racines les plus superficielles.

3.10.5.2. *Sur le sol et ses hôtes*: les alternances provoquent des humectations, puis des dessications et oxydations d'où précipitation des complexes organo-ferro-manganiques, d'où des taches de rouille et des concrétions. Toute hétérogénéité texturale peut être une cause de précipitation (en patines, en lames, en couches concentriques, en têtes d'épingles...).

Ces précipitations chimiques se forment principalement à un certain niveau, celui qui est juste au-dessus des niveaux durables de la nappe perchée, lequel niveau est d'ailleurs mal déterminé et varie chaque année, ce qui explique une certaine dispersion des concrétions. C'est cette eau du sol acidifiée par la traversée de la litière et par l'humus qui provoque la marmorisation maculiforme.

4. RESUME DES PROPRIETES PHYSIQUES:

Les sols marmorisés ont des propriétés physiques déplorable, car ils manquent d'éléments grossiers et de colloïdes. L'eau libre y est excessive en période humide; à ce moment-là, le manque d'aération est funeste à la microflore et aux racines qui ne peuvent développer de chevelu. L'eau utile est, au contraire, insuffisante en période sèche. On a dit que ces sols étaient *tantôt de la boue, tantôt de la brique; ils sont battants et à structure instable* lorsqu'ils ne contiennent pas assez de matières organiques.

Nous avons constaté qu'ils étaient un peu moins mauvais quand les sables dits « grossiers » sont plus abondants; probablement

faut-il admettre qu'il y a, corrélativement, augmentation des gros sables fins, d'où une structure physique, d'origine texturale, un peu moins mauvaise, une porosité un peu meilleure et une certaine aération.

Bibliographie: ARENS... 1958, CALLEUX 1953, EBERMAYER (d.d.), ENGLER (d.d.), GRAS 1901, HABIG 1953, HENIN (d.d.), KOEHNE (d.d.), KRAMER 1957, MERIAUX (d.d.), NIKIFOROFF... 1948, PLAISANCE 1956 a, RICHARD 1950, SPAETH... 1938, STEPHAN 1960..., THIRION-PUJOS 1948, ZAKOSEK 1960.

CHAPITRE V

PROPRIETES CHIMIQUES

Nous étudierons sommairement les principaux constituants.

1. FER :

Les teneurs en Fe_2O_3 varient de 0,5 à 1,5 % dans les sols de surface et de 2 % à 4,97 % dans les sous-sols. Il y a eu évidemment autrefois lessivage vertical. Il se poursuit dans la mesure où il n'est pas freiné par l'imperméabilité.

Dans les horizons marbrés, on a trouvé 4 % dans les parties colorées et 0,3 % seulement dans les décolorées : elles sont donc fortement déferrisées ; c'est même ce départ du fer, plus que la réduction chimique, qui provoque la décoloration.

Le fer en surface est plus mobile que celui en profondeur.

Dans les concrétions, les teneurs mesurées sont de 3 à 23 %.

Dans les sols à marbrures, il migre dans des conditions humides, acides, réductrices, et il précipite dans des conditions sèches, alcalinisantes, oxydantes.

2. ALUMINIUM :

Les analyses de VAN der MAREL donnent des teneurs d' Al_2O_3 variant, dans les couches des racines, de 0,63 % à 2,2 %, voisines de celles des loess ; elle semble légèrement plus forte dans les parties marbrées que dans celles non marbrées ; elle semble plus forte sur les mauvais sols que sur les bons.

Les Américains ont trouvé un enrichissement en Al des horizons indurés, l'Al servant de ciment. Mais d'après SCHÖNHALS, l'Al libre ne semble pas plus abondant dans les horizons marmorisés. Nous ne pouvons pas nous prononcer dans le cas de la forêt de Chaux,

3. SILICE (SiO₂):

La teneur varie pour les horizons supérieurs de 1,08 à 1,40 % ; elle est souvent nettement plus forte pour les sous-sols profonds : 3,16 % ; elle paraît plus forte en mauvais sols.

4. EQUILIBRES entre SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃:

Le rapport $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (mol.) varie de 0,51 à 1,83 ; il semble plus élevé en mauvais sol. Il est assez constant dans le profil. Ceci indique qu'il n'y a pas de podzolisation par horizons séparés (ce qui n'exclut pas une micropodzolisation sur place).

5. MANGANESE:

VAN der MAREL a trouvé pour Mn₂O₄, 0,001 % à 0,08 % ; le Mn est donc très variable ; les chiffres ne permettent pas de porter un diagnostic ; les concrétions en contiennent 6,2 % (dont 5,9 % libre) : c'est lui qui leur donne leur teinte noirâtre.

Il est beaucoup plus mobile que le Fe (384 fois plus mobile).

Le Mn éch. a été dosé par l'O.N.I.A. qui a trouvé 4,5 à 6,5 p.p.m.

La dynamique du manganèse dans les sols a été étudiée par LAATSCH 1938, par LÖHNIS (Plant soil 3, 193) en 1951, par BÉTRÉMIEX 1951.

ROUSSEAU a étudié l'effet fâcheux du Mn sur les semis de sapins.

C'est au Mn que LACHAUSSÉE 1953 attribue la gelivure et la roulerie du chêne.

La toxicité éventuelle du Mn est certainement favorisée (comme elle l'est pour les légumes) par l'acidité du sol, donc par la pauvreté en calcium échangeable, probablement aussi par l'humidité excessive ayant des propriétés réductrices (formation de sulfures?).

6. CATIONS (ensemble):

La somme des bases échangeables mesurée à Nancy a été pour I 14 de 1,4 m.e. % ; la capacité totale de 6,2 m.e. %.

7. CALCIUM:

7.1. CaO: Les teneurs en CaO sont faibles: 0,011 % à 0,049 % ; elles sont un peu plus fortes en général en profondeur et elles sont plus fortes en surface lorsqu'il s'agit de sol bien boisé (remontées des litières) ; elles sont 10 fois plus faibles que dans les loess.

7.2. Ca échangeable (m.e. pour 100 g): Terre à brique (Aisne): 10,7 ; Limon de Versailles: 24,8 ; Chevigny: 23,2 ; Citeaux: 1,6 ; Pourlans: 3,6 à 20,5 ; Seillon: 0,6 à 1,0 ; Amont-Aval: 9,4 à 15,8 ; Fourchon: 5,5 ; Argançon: 0,29 à 1,06 ; Chaux: 0,8 à 2,6.

A notre avis, ce facteur est un excellent critère: les futaies sont nettement plus élancées quand le Ca éch. dépasse 1 m.e. ‰; elles sont généralement très belles quand il dépasse 5. Il est probable aussi que les bois y sont moins roulés.

8. MAGNESIUM:

On ne constate pas de différence nette entre partie de sol marbrée et partie non marbrée.

9. SOUFRE:

En forêt de Chaux, l'O.N.I.A. a dosé 105 à 165 p.p.m. près de la surface. On peut se demander si le bon effet du plâtre n'est pas attribuable au soufre.

10. PHOSPHORE:

10.1. P_2O_5 total: la teneur totale mesurée par PARMENTIER 1869 à La Vieille Loye, au centre de la forêt, était de 0,68 ‰; une terre de fertilité jugée moyenne en agronomie a 1 ‰.

Mais les quantités trouvées ne semblent pas inférieures à celles de meilleures forêts (Bercé...); s'il en est bien ainsi, ce seraient les fractions assimilables qui feraient défaut et non le stock total.

10.2. P_2O_5 assimilable: la moyenne de 16 mesures de teneurs est de 0,05 ‰. Elle devient négligeable en profondeur: 0,005 ‰. La teneur en P_2O_5 d'un sol marmorisé est moitié de celle du sol brun des pentes, le 1/4 de celle du sol d'étang.

Pour un sol de la forêt de Chaux qui semble bon, la teneur en P_2O_5 à 15 cm est de 0,070 ‰ (en agronomie on considère qu'un taux inférieur à 0,120 ‰ justifie l'apport d'engrais). Pour un sol mauvais, elle est de 0,030 ‰.

11. POTASSIUM:

11.1. K_2O total: on ne fait plus guère usage de ce test, peut-être à tort car il indiquait la quantité maxima libérable (un jour ou l'autre) dans un sol. Il est probable que les arbres sont capables d'exploiter une partie du K jugé non échangeable. PARMENTIER 1869 avait donné pour des sols de la Vieille Loye (au centre de la forêt de Chaux) des chiffres variant de 1,42 à 1,60 ‰; un sol de fertilité moyenne dose 1 ‰.

11.2. K_2O éch.: un sol marmorisé XII 15 a une teneur en K_2O presque égale à celle du sol brun des pentes (I 28), mais moitié du sol d'étang (Deux-Fays).

K_2O en m.e. ‰:	Chaux	0,08 à 0,32;
	Loess	0,13 à 0,48;
	Argile	0,26 à 2,23;
	Amont-Aval	0,11 à 0,27.

12. MATIERES ORGANIQUES:

Elles proviennent:

- a) des feuilles et ramilles.
- b) des racines.

C'est une masse énorme qui se décompose sur place dans les divers horizons du sol et les enrichit en matière organique. Le faible taux mesuré à l'analyse dans les horizons profonds est une confirmation du fait que les racines descendent peu par suite de l'écran constitué par le sous-sol dur ou de la nappe perchée qui peut être observée en ouvrant une fosse.

c) des cadavres, sécrétions, excréments de la microfaune, dont l'abondance est proportionnelle à celle des débris végétaux.

13. HUMUS:

On peut reprocher au sol de la forêt de Chaux sous peuplement forestier de ne pas avoir suffisamment d'humus en surface (parce que le traitement en taillis-sous-futaie l'a oxydé au fur et à mesure), de ne pas avoir assez d'humus en profondeur (par suite de la compacité) et, dans les vides à molinie, de montrer un humus certes abondant, mais à propriétés défectueuses (sans qu'on puisse bien préciser ce qui revient à l'engorgement hydrique lui-même ou à la nature de l'humus qui en résulte).

14. AZOTE:

14.1. AZOTE: sa teneur varie de 0,050 % à 0,180 %. Les sols de charmaie sont nettement plus riches, ce qui confirme le rôle restaurateur de cette essence.

14.2. AZOTE MINÉRALISABLE (2,7 à 4,4 mg/100 g): DROUINEAU a constaté que l'herbe consomme l'azote minéralisé au printemps avant l'arbre fruitier, en priorité sur lui. Ceci explique peut-être certaines infériorités des arbres vis-à-vis des herbes et l'action parfois dominante de celles-ci quand il y a lutte entre les deux.

Carbone

14.3. RAPPORT CARBONE/AZOTE: Le rapport $\frac{\text{Carbone}}{\text{Azote}}$ varie de

9 à 20; il diminue en profondeur.

Il est difficile de savoir ce qui revient d'une part aux conditions inhérentes au sol et, d'autre part, au peuplement forestier tel qu'il est obtenu par les sylviculteurs.

15. TANNIN:

Les feuilles et les racines, surtout celles de chêne, approvisionnent le sol en tannin; les racines l'y déposent juste dans l'horizon le plus délavé.

A priori, le taux du tannin (ou plus exactement des produits qui en dérivent) est élevé, du fait de la monoculture pluriséculaire du chêne (quasi-totalité de la réserve de futaie en tout temps et, jusqu'à la régression récente, forte proportion dans le taillis).

Or, le tannin est réputé avoir un effet marmorisant. Comment se fait cette action du tannin sur le sol? On ne le sait pas. Mais on connaît les propriétés antiseptiques et fongicides des tannins (LUTZ 1928, COOK et TAUBENHAUS, BAVENDAMM 1928, LABROUSSE 1930). Le tannin a en effet un pouvoir antioxydant à l'égard des diastases oxydantes sécrétées par les champignons. Cette action s'exerce peut-être par dédoublement des sucres; elle a été étudiée dans le cas d'*Armillaria mellea*; dans ce cas l'influence est heureuse, mais elle peut devenir nocive si elle s'exerce aussi sur les champignons utiles. On a d'ailleurs constaté, en fin d'expérience, le phénomène inverse. Quoi qu'il en soit, il est probable que les tannins ralentissent l'activité biologique et l'oxydation, particulièrement aux alentours des débris de racine: d'où les taches décolorées par réduction et la marmorisation. Voir le chapitre XII et le ch. XVI 1.2.3.2.

16. ACIDITE :

Ce sont des sols modérément acides, ce qui n'est pas défavorable à la croissance de la forêt, au contraire.

Les valeurs relativement élevées du pH des sols de moliniaie peuvent s'expliquer par la dessiccation estivale plus forte (sols très exposés à l'insolation) qui provoquerait des remontées capillaires et des concentrations minérales en surface (en particulier de Mg).

Le taux de saturation des bases varie de 17 à 41 %; il est plus élevé en sous-sol, même très marmorisé, et en surface (par suite de l'enrichissement par les litières).

17. MINERAUX ARGILEUX (étude statique):

17.1. ANALYSE: le laboratoire de M. le Professeur MILLOT, de Strasbourg, a étudié plusieurs échantillons.

Ces diverses analyses ont fait apparaître les différences de teneur en argile dans les divers horizons et les différences de proportion des divers minéraux argileux. Les horizons médians de sols dégradés semblent plus riches en vermiculite.

Le sol brun des pentes a un sous-sol profond riche en vermiculite et interstratifiés (illite et chlorite en voie de vermiculitisation). Tous les horizons du profil ont même origine, il s'agit d'un même sol à plusieurs horizons.

Le sol de vide à molinie montre une vermiculite libre moins abondante, davantage d'illite, des édifices interstratifiés deux fois plus abondants; il est plus imperméable que le sous-sol des pentes (par suite de la présence de montmorillonite?). Le sous-sol supérieur est beaucoup plus riche en vermiculite.

Ces argiles de la forêt de Chaux sont bien moins riches que celles de Lieussaint (kaolinite, illite ouverte, montmorillonite) et que les loess et lehms d'Alsace. Les argiles minéralogiques les plus pauvres sont celles où il y a :

1° abondance relative dans leur sein de débris de quartz de moins de 2 microns,

2° altération par l'eau qui a écarté les feuillets et qui les a vidés d'éléments fertilisants.

Origine des sols	N° échant.	Horizons	Minéraux argileux					
			Kaolinite	inter-stratifiés 10-14 _m	illite	10-14 _c	10-14 _v	vermiculite
sol brun uni-forme de pente	1747	sol superf. A ₀	1		1	3		5
	1748	1° sous sol (20 cm)	1		1	3		5
	1749	2° sous sol (55 cm)	1		1	3		5
sol noir lessivé dégradé de vide à molinie	2778	sol superf. A ₀	tr		tr		tr	tr
	2779	1° sous sol éluv. A (25 à 30 cm)	2		tr		2	6
	5828	2° s/sol illuv. B (80 à 85 cm)	2	3	tr		3	2
Baraques Jupille (Belle futaie chêne rouvre).			1	2	1		2	4

17.2. AMBIVALENCE DE L'ARGILE: les propriétés colloïdales sont capables d'effets très différents. Ou bien elle peut colmater les minuscules lacunes entre les grains de sable ou de limon, servir de ciment, donner ainsi à l'ensemble le caractère d'un béton; l'effet est funeste; c'est malheureusement souvent le cas, soit qu'il s'agisse d'argile descendue par lessivage, soit d'argile remontée par labour, mais incorporée dans de mauvaises conditions par temps de pluie, ou à un sol pauvre en matière organique.

Ou bien l'argile liée aux colloïdes humiques forme un revêtement des agrégats, et un ciment interne des agrégats; elle consolide une structure érigée (on peut même dire qu'elle la crée); l'effet est favorable; c'est celui qu'il faut rechercher. Pratiquement, le seul moyen semble être un émiettement très soigné par temps sec et l'incorporation de matière organique.

17.3. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DUES AUX ARGILES: rap- pelons que les kaolinites sont des argiles assez grossières. Les illites sont des micas de petite taille où les ions K⁺ sont peu nombreux et remplacés par de l'eau; elles résistent bien à la décomposition.

Les chlorites sont moins résistantes. Les vermiculites sont de taille plus réduite; elles sont pauvres en ions K^+ et ont leurs fentes interfoliaires ouvertes; elles sont acides; les arbres y souffrent souvent de carences potassiques. Les montmorillonites ont la taille la plus exiguë; elles obstruent les fins interstices; si elles ont existé dans le loess primitif, elles ont presque disparu des limons et, avec

ANALYSES CHIMIQUES

Emplacement	N %	P. ass. %	K ass. %	Fe %	
Fraisans 3	2.81	0.044	0.012	1.37	
	1.73	0.018	0.150	1.65	
Chaux I 14	40 cm { rougeâtre	0.25	0.005	0.031	1.85
		55 cm { blanchâtre avec con- crétions	0.32	0.005	0.049
	0.33		0.010	0.036	
Chaux IX 2	Taillis-sous-futaie	1.61	0.090	0.170	0.56
XI 3	Taillis-sous-futaie	1.09	0.060	0.110	0.52
II 5	Belle réserve série T.S.F.	0.90	0.050	0.090	0.67
I 10	Pins sylvestres	0.98	0.050	0.080	0.72
I 30	Chêne d'Amérique	0.73	0.040	0.070	0.54
I 12	"Bon vide"	1.04	0.050	0.080	0.60
V 12	Belle réserve serrée T.S.F.	0.88	0.050	0.060	0.96
XII 5 A	Belle réserve série T.S.F.	1.00	0.060	0.050	0.94
XII 5 B	Bord de vide	0.98	0.030	0.070	0.66
XII 5 C	"Mauvais vide"	1.20	0.030	0.080	0.60
VIII 8	Taillis-sous-futaie moyen	0.78	0.040	0.080	0.57
IX 4 A	Bouquet de réserves	1.56	0.070	0.100	0.94
	C Mauvais vide à molinie	1.96	0.050	0.060	0.51
	D Mauvais taillis vieilli	1.84	0.050	0.110	0.55
Extrêmes	0.25 à 2.80 %	0.010 à 0.090 %	0.05 à 0.17 %	0.50 à 1.85 %	
Moyenne	1.15	0.050	0.07		
Réputé nécessaire pour un sol agricole	0.10	0.30	0.30		

elles, la richesse chimique, en particulier en Ca^{++} et Mg^{++} . Les argiles amorphes résultent de la dislocation et de l'émiettement des débris feuilletés d'argile; elles sont infertiles.

Le lessivage latéral des horizons médians a porté, en particulier, sur les argiles qui, même lorsqu'elles sont restées en place, ont été appauvries.

A noter toutefois que le sous-sol profond possède, même sous mauvais vide, une certaine fertilité résultant du lessivage ancien

ou de l'absence d'attaque par les eaux acides de percolation qui transforment les horizons médians.

On a préconisé depuis RISLER le chaulage de tels limons.

On conseille également le sulfatage (plâtre).

On sait que la vermiculite est peu sensible aux fumures potassiques.

Il faudrait faire des apports nombreux et répétés pour arriver à donner à ces sols la richesse potassique suffisante: c'est assurément difficile en sylviculture, car l'on ne peut guère parcourir les parcelles qu'une seule fois, en raison du prix de revient de chaque épandage.

CONCLUSION: Le complexe absorbant est faible s'il n'est pas amélioré par la végétation. La richesse minérale est faible, soit par défaut du stock initial (constituants amenuisés, lavés et repris à des sols déjà appauvris), soit parce que l'ennoyage interne a, de façon persistante, appauvri l'horizon moyen où se trouve justement les racines. Toutefois, nous noterons que *de nombreux sols forestiers qui ne sont pas plus riches portent de belles forêts*. Le problème reste donc entier de l'explication de la médiocrité actuelle de la forêt.

Il est certain que la vitesse de circulation des cations est un élément important; si l'emprunt au sol est fort, l'exportation faible, la restitution est forte et l'usine à bois fonctionne bien.

Il s'agit donc de déterminer les conditions capables d'accélérer cette vitesse des circulations, sol profond → troncs → branches → feuilles → sol superficiel.

Il est très important de noter la *relative richesse du sous-sol*. Si elle est inefficace, c'est d'une part du fait de la cimentation par les oxydes (prouvée par l'examen morphoscopique, voir Ch. IV 8), d'autre part du fait que les racines arrêtées plus haut par les écrans signalés au Ch. XV 1, ne parviennent pas à atteindre cette réserve.

Bibliographie: BÉTRÉMIEUX 1951, CAMEZ 1962, FRANC DE FERRIÈRE (d.d.), GIROD 1953, LAATSCH (d.d.), LÉVY 1964, LOSSAINT (d.d.).

CHAPITRE VI

PROPRIETES BIOLOGIQUES

On attache, avec raison, de plus en plus d'importance à l'activité biologique du sol. Les facteurs physico-chimiques n'agissent souvent de façon défavorable que par l'intermédiaire de populations du sol insuffisantes en quantité ou de composition défectueuse.

1. FAUNE DU SOL :

1.1. MÉGAFaUNE (plus de 20 mm) :

1.1.1. *Taupes* : elles rongent les racines, mais elles divisent et ameublissent le sol ; leur action semble, en définitive, bénéfique ; elles ne prospèrent, il est vrai, que si elles trouvent une nourriture suffisante de petite faune. On a observé qu'elles sont pratiquement absentes des vides à molinie ; elles sont plus nombreuses sous les taillis de charme, plus nombreuses aussi sur versant chaud et sous chênaie claire que sous l'ombrage de la hêtraie.

La terre travaillée par les taupes a donné un indice de P_2O_5 assimilable double de celui de la terre ordinaire de surface (0,8 contre 0,4).

1.1.2. *Mulots* : eux aussi rongent les racines, mais contribuent à l'aération et au brassage des matières minérales et organiques.

1.2. MACROFAUNE (2 à 20 mm) : P. VOLZ en 1957 a constaté un relativement faible développement de cette faune dans des sols analogues.

1.2.1. *Lombrics** : nous avons fait quelques élevages et pu

* L'influence des lombrics a été étudiée de longue date : DARWIN 1840, 1881, MÜLLER (P.-E.) 1889, WOLLNY (E.) 1890, HENRY (E.) 1908, RAMANN 1911, FRANCE 1921, HEYMONS (R.) 1923, BORNEBUSCH 1930, OLIVER 1930, 1949, BLANCK et GIESECKE 1924, STÖCKLI (A.) 1928, GAST 1937, HASSELMAN 1937, LUNT (A.-H.) 1944, LINDQUIST (B.) 1941, EATON et CHANDLER 1942, FRANZ (H.) 1943, MEYER (H.) 1943, MAC CALLA 1945, EVANS 1948, STÖCKLI (A.) 1949, SWABY (R.-J.) 1949, FREI (E.) s.d., GRAFE 1950, FINCK 1952, GALOUX 1953, Mme JEANSON-LUSIGNAC 1960, NEF, WITTICH 1963.

observer les galeries creusées: elles aèrent le sol. D'autre part, les matières minérales qui passent dans les tubes digestifs sont humifiées et deviennent porteuses d'enzymes. Il y a érection de la structure et amélioration de sa stabilité. Par leurs migrations descendantes de l'été, ils permettent la descente des constituants organiques de la litière (qui, sans eux, resteraient longtemps et inutilement près de la surface) jusqu'aux horizons médians appauvris. Ils contribuent à la pullulation des microbes utiles.

Ils augmentent la teneur locale en calcium échangeable. Les déjections de lombrics ont été étudiées par VAN der MAREL. Les résultats sont indiqués aux Chap. XII 1.4.3. et XIX.

La question est donc de savoir où ces êtres bénéfiques trouvent les meilleures conditions d'existence et de prolifération: il leur faut un sol pas trop chaud, assez humide, pas trop mouilleux (la nappe perchée leur est nuisible), pas trop acide; ils ont besoin de déchets végétaux tendres, de feuilles en particulier (10 kg par m² en 6 mois) de préférence aux aiguilles. Dans les vides à molinie il y a beaucoup moins de lombrics.

Les conditions sont celles du couvert végétal maximum d'essences à feuilles caduques.

1.2.2. *Fourmis*: nous avons laissé près de la Maison forestière de Grand-Contour un couvercle métallique de four à carboniser sur un sol à sous-sol marmorisé. Les fourmis s'y sont installées; elles ont remué le sol qui, en moins d'un an, a foisonné; il est remonté de 30 cm. Nous avons fait étudier les sols de fourmilières. Les résultats sont indiqués au chapitre XII 1.4.4.

2. MICROFLORE (V. POCHON... 1958):

Des mesures ont été faites par DUCHÉ, POCHON, MALIZENSKA; les sols (ou les parties de sols) les plus aérés sont plus riches en microorganismes favorables.

3. TESTS BIOLOGIQUES DE FERTILITE:

Devant l'insuffisance des méthodes agronomiques en matière de sols forestiers, nous avons été amené à faire des essais en pots, essais qui ont l'avantage de constituer une méthode synthétique. Evidemment, il resterait à prouver que les arbres se comportent comme les végétaux annuels utilisés.

3.1. SEMIS DE TRÈFLE :

	Hauteur après 7 jours
	—
Chaux : déblais d'excavatrice	8 mm
Chaux : sol brun des pentes	10 mm
Cîteaux	14 mm
Déjections de vers de terre	20 mm
Chaux I 14: Forêt clairière	
Surface	14 mm
Couche moyenne 0,50 m	8 mm
Profondeur 1,70 m	13 mm

3.2. SEMIS DE LIN: utilisant une méthode employée par MANIL pour tester la fertilité des sols, nous avons fait des semis de lin.

Voici quelques résultats :

	Hauteur (cm)	Poids sec (gr)
	—	—
I 14 surface	21	10.9
— 12/15 cm	20	13,1
— 30/35 cm	15	9.2
— 50/55 cm	17	9
— 90/95 cm	14	5.3
— 130/135 cm	20	9.7
I 28: sol brun des pentes	20	13.1
III 1 hêtraie	26	14.7
Crissey surface	26	15.9
— 30 cm	20	9.6
— 45 cm	20	11.5
Loess du Tannenwald (hêtraie)		
Surface	28	19.7
40 cm	26	15.4
Loess du Kaiserstuhl	25	25.3
Sol marmorisé		
+ plâtre	25	21.3
+ calcaire	26	15.2

En conclusion générale, on peut remarquer la moindre activité biologique des couches moyennes, la fertilité plus grande des sols mieux aérés et des sols mieux boisés, les freinages dus aux excès d'humidité et aux excès de sécheresse, l'infériorité des sols marmorisés de la forêt de Chaux par rapport aux loess et aux bons lehms, l'action améliorante sur l'activité biologique du calcaire et du plâtre.

Bibliographie: DEMOLON 1926, POCHON... 1958.

CHAPITRE VII

SYNTHESE DES PROPRIETES (Ensemble du profil)

1. LE PROFIL ET LES 3 COUCHES:

Les deux tableaux annexés au présent chapitre ainsi que les deux fig. 10 et 11 donnent une idée de la répartition des caractéristiques dans les différents horizons. Nous les avons d'ailleurs résumés dans notre « Contribution... » Annales Agronomiques 1961, 12 (2), pages 250 et 251. On peut faire les remarques générales suivantes:

1° la plupart des caractéristiques influant sur la fertilité sont meilleures en surface: la pellicule superficielle est plus riche, mieux structurée comme suite aux restitutions par les feuilles de la litière; elles présentent ces qualités davantage sous vraie forêt que dans les vides.

2° les horizons profonds ont une certaine richesse minérale (et les propriétés favorables corrélatives) du fait que les racines n'y ont pas encore pénétré, et qu'ils ont gardé le stock minéral originel.

3° les horizons médians sont les plus défectueux à tous les points de vue, du fait qu'ils sont tassés et appauvris par les délavages répétés.

Ainsi donc, plutôt qu'aux « ventres bombés » habituels aux horizons B, nous avons ici affaire à des « ventres creux » dans la zone où se trouvent les racines: c'est évidemment fâcheux.

2. DEFAUTS:

On peut dès maintenant signaler la pauvreté en sable grossier (il en faudrait 10 %), l'excès de constituants limoneux (peu fertiles et colmatants), l'insuffisance de colloïdes argileux (il en faudrait plus de 20 %), l'abondance relative de minéraux argileux à

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (I/14)

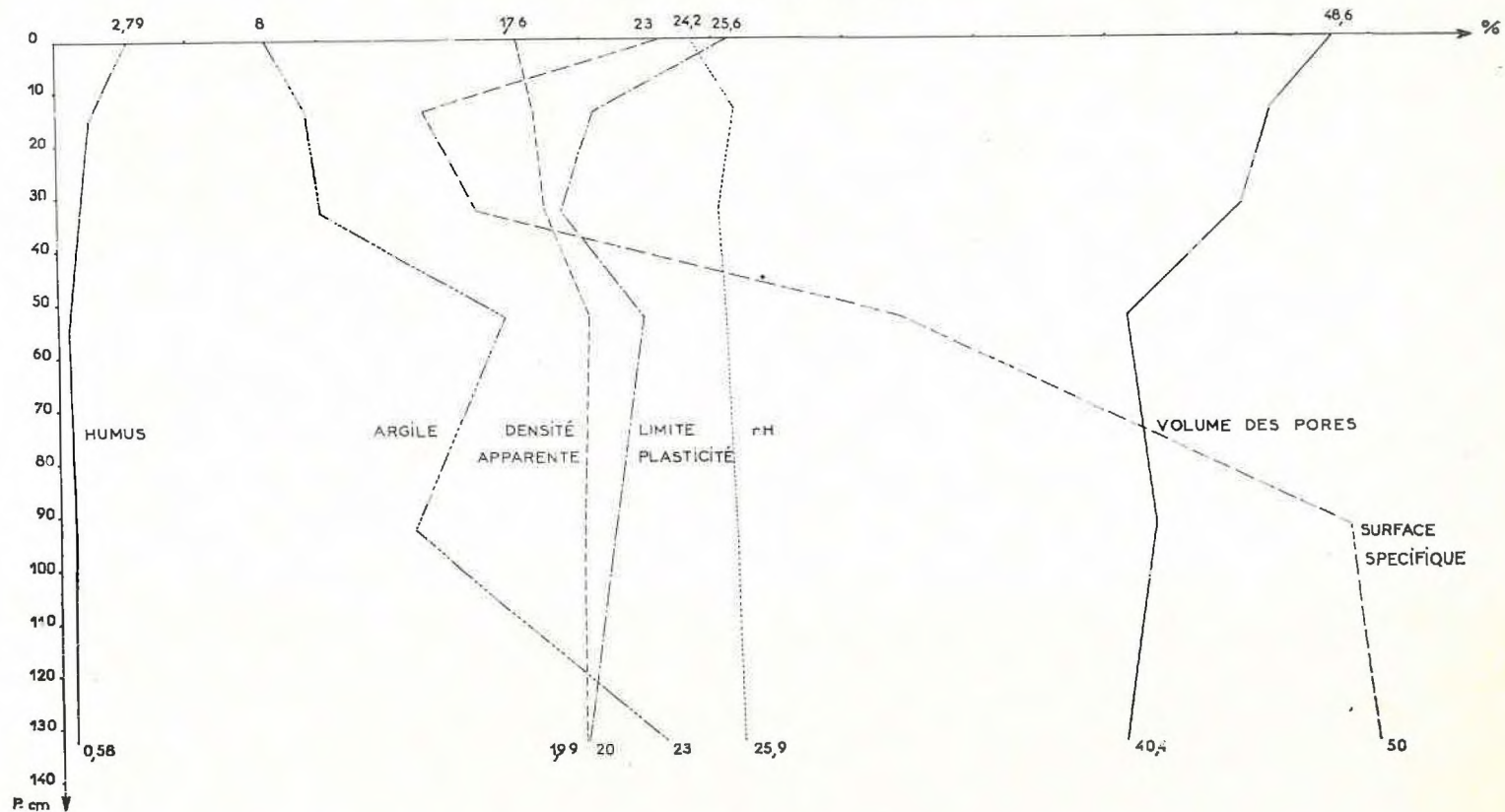


FIG. 10.

La densité apparente augmente avec la profondeur. Le volume des pores diminue fortement. Les creux des courbes de limite de plasticité et de surface spécifique à 20 cm sont de fâcheuses caractéristiques.

SOL DE LA FORET DE CRISSEY (Massif de Chaux)

Analyses faites par M. FLON, Directeur de la Station Agronomique à Melun

	I - Surface	2 - 15 cm	3 - 30 cm	4 - 45 cm	5 - 60 cm	60 - 110 cm
<u>Analyse physique des éléments fins</u>						
Sable très grossier 1 à 2 mm	0.70	0.20	0.19	0.11	0.03	0.19
Sable grossier 0.5 à 1	0.27 1.49	0.34 1.29	0.34 1.36	0.75 2.17	0.25 1.09	0.25 0.94
Sable moyennement grossier 0.2 à 0.5	0.52	0.75	0.83	1.31	0.81	0.50
Sable moyennement fin 0.1 à 0.2	6.34	6.86	8.51	7.89	5.15	4.13
Sable fin 0.05 à 0.1	1.25 38.09	5.50 40.86	1.00 41.26	1.00 40.99	5.00 35.40	3.25 31.63
Sable très fin 0.02 à 0.05	30.50	28.50	31.75	31.50	25.85	24.25
Limon 0.002 à 0.02	35.50	38.75	39.25	37.25	37.25	36.50
Argile	11.50	11.50	14.00	14.75	20.25	25.00
Calcaire (Calcinètre)	néant	néant	néant	néant	néant	néant
Matières organiques totales	6.09	2.35	1.26	0.03	0.03	0.80
Humidité	7.56	5.94	3.40	5.24	5.24	5.84
<u>Analyse chimique des éléments fins</u>						
Réaction	acide	acide	acide	acide	acide	acide
pH électrométrique	4.80	4.15	4.15	4.10	4.00	4.15
Azote total (N)	2.10	0.82	0.61	0.53	0.44	0.79
Acide phosphorique assimilable (P ₂ O ₅) %	0.024	0.11	0.009	0.016	0.012	0.024
Potasse échangeable (K ₂ O) %	0.150	0.050	0.030	0.030	0.030	0.030
Chaux échangeable (CaO) %	1.090	0.100	0.080	0.050	0.150	0.600
Fer : Fe (OH) 3	6.50	8.00	8.00	12.00	12.50	14.00

CHAUX I/14 PROPRIETES DIVERSES

Total cations

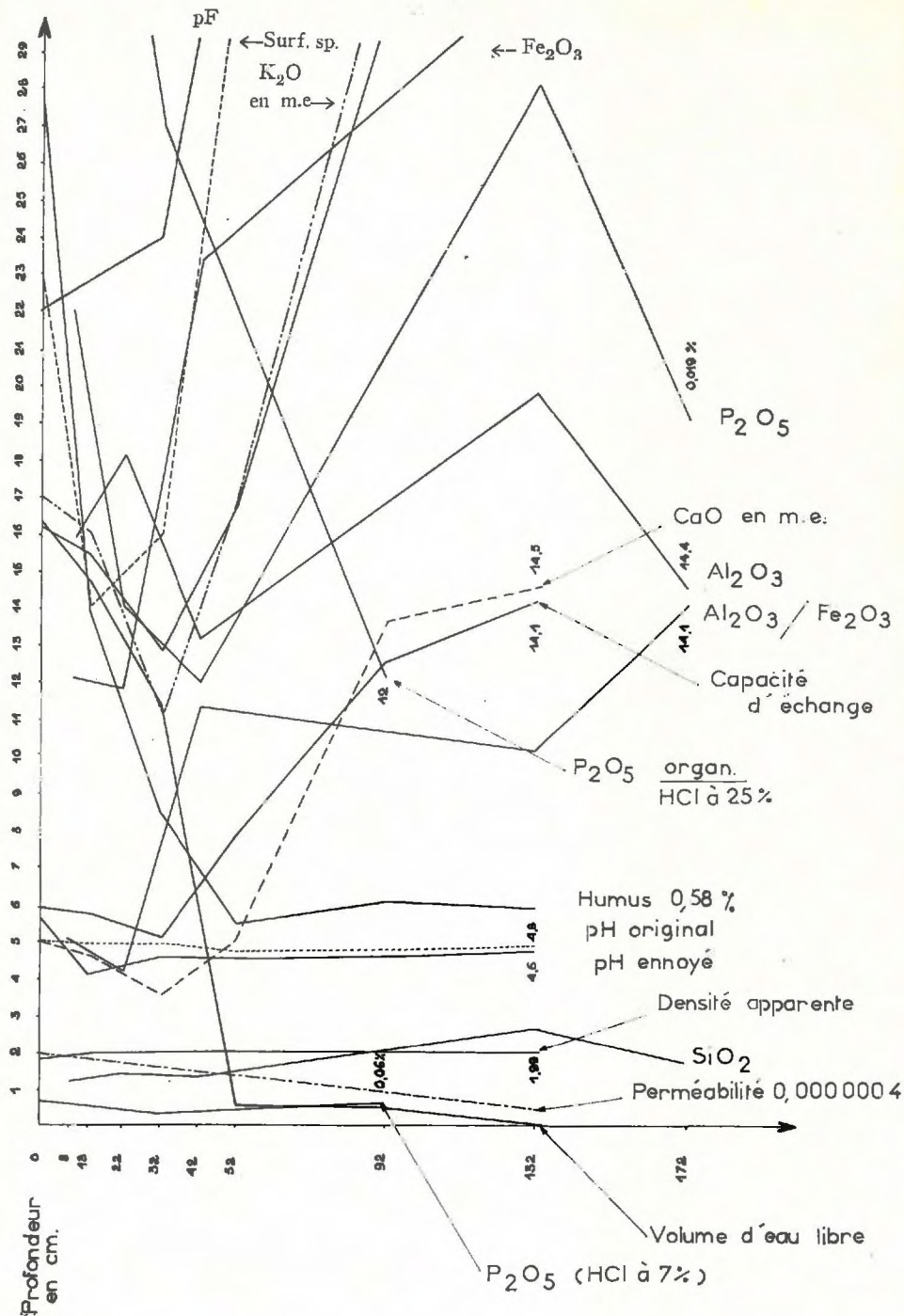


FIG. 11.

Le creux entre 20 et 40 cm pour plusieurs caractéristiques résulte du délavage intense dans le sein de la nappe aquifère perchée et du lessivage latéral.

I 14		Densité	Rétention d'eau	Rétention d'eau		
Surface	m ² /g	apparente	à p ^F 3 en poids	à p ^F 3 en volume	Volume des pores %	Volume d'eau libre %
0 cm	23.	1.76	24.0	32.3	48.6	16.3
12 - 15	14	1.81	22.0	31.5	46.2	14.7
30 - 35	16	1.86	22.9	33.6	44.9	11.3
50 - 55	32	2.02	25.2	40.1	40.6	0.5
90 - 95	49	1.99	26.1	41.2	41.6	0.4
130 - 135	50	1.99	25.5	40.9	40.4	0

structure démolie ou à feuillets trop écartés, l'insuffisance des cations Ca^{++} et K^+ , de P_2O_5 , de matière organique, d'humus doux. On peut y ajouter la position subhorizontale, l'existence d'un sous-sol très imperméable et, dans le cas des vides, l'absence de structuration phyto-zoo-bactériogénique. (V. aussi le Ch. XVI).

3. SOL ET SOUS-SOL :

On peut observer qu'en forêt le sous-sol agit plus qu'on ne le croit bien souvent :

1. SUR LE SOL :

1.1. Par sa perméabilité ou son imperméabilité : s'il est imperméable, il arrête l'eau qui forme *nappe perchée* : elle asphyxie les racines. Pour la même raison, le lessivage est stoppé.

1.2. Par sa composition : des injections de minéraux du sous-sol (souvent plus riches) sont faites dans le sol

a) par les restitutions du cycle forestier (racines profondes-feuilles-litière-couche superficielle),

b) par les renversements d'arbres morts (buttes de chablis qui, à la longue, s'étalent).

1.3. Parfois même par des mélanges de granulométrie différente (sables, argiles) dus à des ruissellements de parties érodées à l'amont et déposées vers l'aval des pentes.

2. SUR LA VÉGÉTATION (directement) : certaines racines descendent profondément et peuvent capter des éléments ou oligo-éléments du sous-sol qu'elles ne trouveraient pas dans les couches du sol proprement dit. Ainsi influent le calcium du sous-sol (sols à pervenches) ou les argiles plus riches du sous-sol.

Bibliographie : GRANVIGNE... 1950, PLAISANCE et VAN DER MAREL 1960.

CHAPITRE VIII

ASPECTS

1. MARBRURES (fig. 12):

A notre avis, il n'y a pas de différences radicales entre sols à pseudogleys très marqués et sols faiblement marmorisés: ce sont des termes extrêmes d'une série continue. Les différences portent:

1° Sur l'épaisseur de la couche marmorisée.

2° Sur les aspects de la marmorisation, en particulier l'intensité des contrastes qui sont eux-mêmes fonction de la texture plus ou moins argileuse, de l'action de l'eau, et de la végétation, ainsi que du passé paléopédologique.

Les aspects des sols sont très variables. Ce qui frappe le regard, c'est la présence de marbrures de diverses formes et d'intensité très diverse, qui s'étendent par exemple entre 20 cm et 2,50 m; le sous-sol profond est de couleur ocre et non marbré.

Parfois, on distingue des taches de rouille dans la partie supérieure, mais les véritables marbrures comprennent des parties ocres et des parties grises ou blanchâtres. Plusieurs gammes existent, depuis de simples touches de décoloration jusqu'à un aspect de nougat; les marbrures pédologiques sont en général faciles à distinguer des bigarrures des marnes et des argiles; tantôt elles sont par taches, tantôt en réseau, parfois même flammulées, parfois liées horizontalement (lamellaires). On peut les considérer comme des panachures, des bigarrures, des mouchetures...

Il est certain qu'interviennent simultanément dans la genèse de l'aspect en un point donné:

1° la texture et ses inégalités: si la teneur en argile est plus forte les marbrures sont plus nébuleuses et les plages plus grandes; si celle en limon est plus forte les contrastes sont plus nets; éventuellement, le litage textural influe sur l'aspect.

SCHEMA DE SOL LIMONO-ARGILEUX
A SOUS-SOL MARMOROIDE

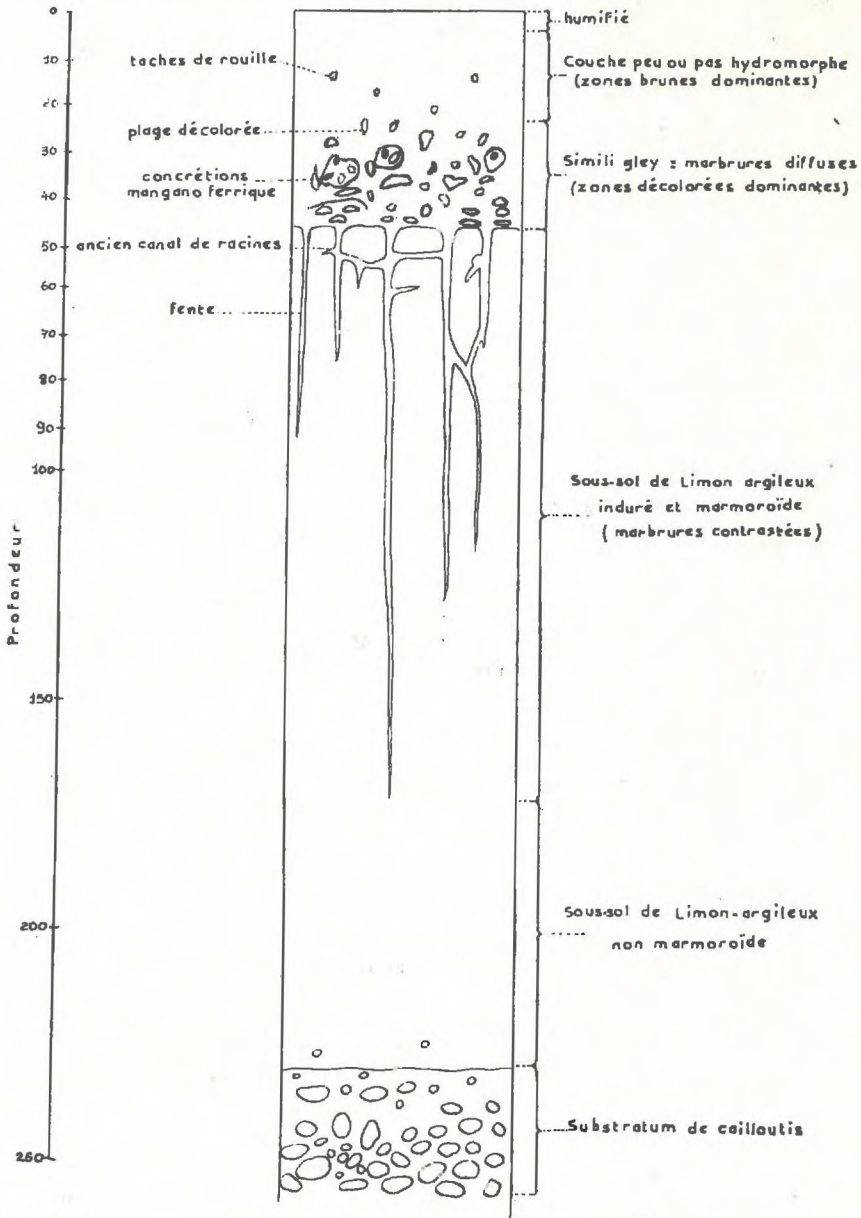


FIG. 12.

2° l'action plus ou moins prononcée de l'eau dépend du temps depuis lequel les actions marmorisantes s'exercent, de l'imperméabilité du substratum, de l'éloignement du point considéré par rapport au vallon, de la quantité d'eau de pluie qui entre dans le sol et de l'intensité de l'évacuation : si l'eau stagne davantage, la décoloration est plus marquée.

3° le nombre et la nature des racines présentes.

4° la nature de l'humus imprégnant le sol, tel qu'il résulte de la dépouille des végétaux.

Souvent, mais non toujours, on peut distinguer de haut en bas :

1° une *couche grumeleuse, ocre*, souvent plus grise à sa partie supérieure.

2° une *couche moyenne à marbrures tachetées*, pommelées, causées par des précipitations dans une masse préalablement plus ou moins déferrisée. Parfois l'horizon supérieur est plus fortement blanchi ; il correspond à la couche où la durée totale de la nappe est la plus grande. Ces marbrures sont généralement nébuleuses et floues.

3° une *couche profonde à marbrures réticulées* contrastées : manifestement, elles sont formées d'une masse qui était primitivement entièrement ocre, parcourue par des lames courbes et plus ou moins épaisses, formées d'un matériau décoloré par déferrisation. Si elle n'existe pas, elle est remplacée par une couche à marbrures tachetées contrastées.

On remarquera que les marbrures peuvent être à cheval sur plusieurs couches d'origine différente ; elles sont, avant tout, conditionnées par les oscillations de la nappe perchée.

2. COULEURS :

Les couleurs ocres varient de l'ocre clair au brun ; souvent il y a deux ocres différents mélangés : l'un qui est probablement la teinte primitive parsemée de petites taches, l'autre qui correspond à des précipitations. Les décolorations sont variables depuis le beige ocre clair jusqu'au blanc sale, avec tous les intermédiaires. Enfin les horizons supérieurs des sols les plus hydromorphiques sont presque noirs.

Toutes ces différences de teinte résultent soit de différence de teneur en humus, soit de différences de teneurs en fer et manganèse, soit du degré des oxydations des hydroxydes de ces deux métaux ; les teintes les plus chaudes et foncées correspondent aux formes les plus riches en oxygène.

QUELQUES TYPES DE MARMORISATION

	Profondeur	Aspect	Matériel	Racines	Occurence
Marmorisation réticulée	100 - 300 cm (sous-sol)	Lames grises courbes entre- croisées	plus de 30 % d'argile	quelques unes strictement localisées dans les lames	exclusivement en profondeur, assez fréquente, non toujours présente
Marmorisation lamellaire	100 - 200 cm	Lames minces alternes hori- zontales	- d° -	néant	rare (sous vide)
Marmorisation tachetée	30 - 100 cm	taches juxta- posées	10 à 25 % d'argile	quelques unes	constante
Marmorisation réduite à des petites précipitations disséminées	5 - 30 cm	points orange	- d° -	nombreuses	peu fréquente
Marmorisation tubulaire	30 - 200 cm	tubes sinueux gris le long des racines	sable pur ou dominant	quelques unes (cause même de la marmorisa- tion)	ne concerne pas la forêt de Chaux.

Les sols de pente bien drainés ont des couleurs plus brunes et plus chaudes*.

3. CONCRETIONS (Voir fig. 15):

Des concrétions se trouvent dans des sols bien divers et sous des climats très différents; les climats avec périodes de forte dessiccation en favorisent la naissance. Elles ont été étudiées par BOISCHOT, DROUINEAU, NIKIFOROFF, etc.

Les concrétions ne se rencontrent pas partout, mais la loi de leur répartition est difficile à connaître. Elle est en effet, probablement, en relation avec les formes anciennes du terrain et le climat ancien.

On peut distinguer en particulier:

- 1) des concrétions petites ponctiformes, charbonneuses, friables;
- 2) des concrétions pisiformes dures, irrégulières, plus ou moins grosses;
- 3) des pellicules, enduits, vernis, patines sur les cailloux;
- 4) des blocs de mâchefer qui semblent bien n'être que des agglomérations de concrétions pisiformes, qui auraient été soudées après transport et accumulation. On peut les rapprocher des « pierres brunouses » du Bourbonnais, des grepp, des alios.

Elles sont hétérogènes; on y trouve inclus de l'argile et des matières organiques; les oxydes y sont agglomérés en masses plus ou moins poreuses.

Parfois le concrétionnement est si ramifié qu'il est très difficile de le séparer des parties voisines plus claires et plus molles.

Diverses concrétions analysées contenaient 0,3 à 1,2 % de matière organique, d'autres 4 à 7 %; elles contenaient 4 à 10,4 % de fer soluble à chaud dans HCl au 2/3. La plus riche provenait d'un bloc de mâchefer. Elle contenait 0,825 % de Mn. Elles sont beaucoup plus riches en P_2O_5 et K_2O que la terre qui les entoure. Leurs dimensions s'échelonnent d'une tête d'épingle à celle d'un haricot.

* Dans le Cade Expolaire de CAILLEUX on a par exemple les teintes: surface C 82; couche lavée: D 68; profondeur: B 81 et C 58.

Dans le Code de MUNSSELL: sol brun: 2,5 Y R 5/4; sol de moliniaie: surface 7,5 Y 4/2; horizon délavé: 10 Y R 7/4; horizon panaché: 7,5 Y R 7/8 et 5 Y 8/2; en VIII^e série: surface: 5 Y R 7/5; 20 cm: 10 Y R 8/6; 100 cm: 5 Y 7/1 et 2,5 Y R 5/6; 200 cm: 5 Y 7/1 et 10 R 6/6; mâchefer: 2,5 Y 3/0.

Pour comparaison, on notera que les sols à fragipan de Belgique ont un fond brun jaunâtre 10 Y R 5/4 ou 10 Y R 5/6, les taches brun pâle 10 Y R 6/3 ou brun vif 7,5 R 5/6 à 7,5 Y R 5/8 sont peu nettes, mais nombreuses et petites. Les fentes verticales dans le B mg sont grisâtres 10 Y R 6/3 à 5 Y 7/2 (m indique le fragipan).

On a essayé de comparer les concrétions friables et dures. (Analyse de H. FLON):

Teneurs Différentes

	Concrétions	
	friables	dures
Eau	1.6 %	3.8 %
Matières organiques	4.1 %	7.1 %
P ₂ O ₅ total	0.66 ‰	1.37 ‰
Fe total	50.9 ‰	114.8 ‰
Mn	0.6 ‰	8.25 ‰

Teneurs Analogues

	Concrétions	
	friables	dures
Al ₂ O ₃	28.8 ‰	31.05 ‰
N	0.44 ‰	0.53 ‰
K ₂ O	2.62 ‰	2.25 ‰

Dans les bouillènes, les concrétions contiennent de 5 à 8 ‰ de Mn.

Tout s'accorde avec l'hypothèse par laquelle la concrétion friable est un stade intermédiaire ou avorté dans la formation de la concrétion dure.

Les concrétions résultent de concentrations, oxydations et précipitations d'hydroxydes de Fe et Mn. Ces hydroxydes ont, à notre avis, une quadruple origine:

- 1° Lessivage vertical de l'horizon immédiatement supérieur;
- 2° Lessivage latéral des centres de plateau;
- 3° Ils proviennent surtout de l'horizon même où naissent les concrétions (c'est ce qui caractérise les pseudogleys) (remaniements chimiques *sur place*);
- 4° Remontées: les petites concrétions actuelles ne sont peut-être souvent que des reprises des précipitations ferro-manganiques du *ferreto* du sommet des cailloutis, soit par légère remontée, soit bien plutôt par lessivage latéral des zones situées à l'amont.

Genèse des concrétions: la naissance de concrétions s'est certainement faite à plusieurs époques; elle est en rapport, avant tout,

CARACTERISTIQUES DES MARMORISATIONS

MARMORISATION EMBRYONNAIRE	MARMORISATION TACHETÉE	MARMORISATION RÉTICULÉE
	Floue! Intermédiaire! Contrastée!	
Petites trainées blanchâtres dans un matériel ocre	Petites taches rougeâtres ou brunes sur fond beige	Taches juxtaposées et intriquées de couleurs différentes (beige, ocre, brunes, rougeâtres, grises)
Couche supérieure	Couche supérieure	Couche moyenne ou profonde
		Compacte par tassement, mais non très dure
		Contrastes plus ou moins marqués, plages de transition!
		Parfois avec concrétions manganoferriques noires
		Plus récente
		Ephémère
		Sous climat actuel
		Couche profonde seulement
		Indurée ou cimentée
		A forts contrastes
		Sans concrétions
		D'âge ancien
		Durable
		Due à des climats très agrestifs (grands froids ?)

N. B. — Il y a de nombreux types intermédiaires: une classification précise apparaît difficile actuellement.

avec la longueur des phases de sécheresse du sol (c'est le cas des vides par temps ensoleillé); elle a été favorisée quand il y a eu installation des bruyères à humus acide. Il est possible aussi que — paradoxalement — le couvert intense des hêtraies et l'humus légèrement acide des vieilles hêtraies aient eu le même effet. Ces conditions se sont produites principalement aux époques anciennes, en tout cas de façon irrégulière. D'où probablement l'irrégularité dans la distribution*. Voir aussi ch. XI 5.

4. METHODE DE DESCRIPTION DES SOLS:

4.1. Si on veut faire apparaître les réelles distinctions, il faut dresser un tableau donnant pour chaque couche les teintes (des parties décolorées et des colorations chaudes), la présence et la nature des concrétions (ponctuelles, pisiformes...), l'intensité des contrastes, les proportions volumétriques des parties colorées (ou surcolorées), des parties décolorées et des concrétions, leur mode de répartition et direction, le type de marmorisation (tachetée ou réticulée), la structure (appréciée à l'œil). Un tableau à 10 colonnes permet de faire un portrait des divers horizons, moyennant quelques définitions conventionnelles.

4.2. SYMBOLES: on peut proposer d'utiliser les termes suivants: *n* non marmorisé, *t* tourbiforme, *mt1* marmorisation tachetée peu contrastée, *mt2* la même très contrastée, *m r* marmorisation réticulée.

Les chiffres indiquent les épaisseurs des couches; on obtient des sigles tels que: *n* (30) *mt1* (30); *n* (15) *mt2* (25) *m r*; *t* (10) *mt2* (30) *m r*.

CONCLUSION: L'analyse des marbrures n'est pas à son terme; néanmoins, il faut dès maintenant y porter attention et essayer de définir le mieux possible la réalité observée; elle correspond indubitablement à des conditions déterminées, passées ou présentes. On notera, toutefois, qu'une partie des aspects est pérenne, mais non intangible. On a même signalé des variations saisonnières d'aspects. Les contrastes sont d'ailleurs plus nets lorsque le matériau est plus sec; les marbrures ont, en tout cas, un avantage: c'est celui d'être

* Un ouvrier travaillant au curage des fossés en forêt de Marcenat (Allier) nous a affirmé que les pierres brunouses se reformaient rapidement (en moins de 25 ans). Il est possible que cette affirmation ne soit pas dénuée de tout fondement. Des observations devraient être faites; elles exigent de la continuité de vue. Nous supposons que lorsque les conditions d'attaque ne sont pas trop violentes, seules des précipitations friables se font rapidement, c'est-à-dire en quelques années. Mais la question reste entière de savoir si les concrétions dures et vernissées sont paléopédologiques (plusieurs milliers d'années) ou peuvent se constituer en l'espace d'un siècle ou d'un demi-siècle.

très manifestes et de permettre une cartographie assez rapide des sols sans beaucoup d'analyses, par des agents non vraiment spécialisés.

Lorsque le sol s'améliore, les marbrures s'atténuent. Seuls subsistent les aspects les plus contrastés affectant également la texture (concrétions).

Bibliographie: KUBIENA 1953.

CHAPITRE IX

VARIETES ET VARIANTES

1. SOLS FORESTIERS A MARBRURES :

L'étude descriptive des marmorisations a montré la très grande variété des aspects, lesquelles ne correspondent pas toujours à de grandes variations physico-chimiques de la masse de terre.

1.1. *TOPOSÉQUENCE* (ou *Hydroséquence*): si l'on ne considère que le sol-type, sur limon d'épaisseur donnée, depuis le sol brun uniforme bien drainé (situé sur une pente et reposant d'ailleurs sur un cailloutis perméable) jusqu'au sol à marbrures très accentuées (du milieu de la langue tabulaire), il y a tous les intermédiaires qui forment une séquence continue. Les faciès dépendent de la proximité de l'exutoire naturel (vallons) et de l'horizontalité du sous-sol.

Nous-même avons proposé en 1956 dans le Procès-verbal de Révision d'Aménagement de la forêt domaniale de Chaux, une classification simple pouvant être utilisée par des Préposés forestiers: marbrures apparaissant à une profondeur inférieure à 25 cm; comprise entre 25 cm et 40 cm; comprise entre 40 cm et 60 cm; supérieure à 60 cm. Elle est empirique, mais d'application aisée. V. aussi ch. XII 1.1. et 1.2.

1.2. *ACCIDENTS*: ils sont nombreux, perturbant le schéma.

1.2.1. *Accidents du microrelief apparent*: butte d'ancien chablis, accumulation éolienne au pied d'un arbre, d'une touffe ou d'un bouquet d'arbres dans un vide, déblai ancien de fossé, etc.

1.2.2. *Variations de texture du limon* (d'origine sédimentaire): par exemple celles de la teneur en sable grossier en surface (meilleures zones forestières).

1.2.3. *Variations du sous-sol* (qui est un obstacle plus ou moins puissant à la descente verticale de l'eau): a) lentilles d'argile en sous-sol ou, au contraire, cailloutis plus filtrant. b) induration du sous-sol actuel par des climats défunts, à une époque où il était encore le « sol » (avant recouvrement), ou déjà le « sous-sol ».

1.2.4. *Accidents dus à la végétation antérieure au point considéré*: succession de bouquets vraiment forestiers laissant un entonnoir de sol plus humifère non marmorisé; zone cultivée et fumée ou, au contraire, zone dégradée à marbrures hautes, par un couvert de bruyère ou par l'extraction de la litière...; zone où la molinie a été plus persistante, etc.

1.2.5. *Variations d'épaisseur de la masse de limon*: si le cailloutis est plus proche, le drainage est meilleur.

1.2.6. *Effet d'un fossé* (à courte distance): tous ces accidents et toutes ces variations, et d'autres encore, rendent compte des nombreuses « bizarreries » observées en ce qui concerne les niveaux d'eau dans les trous. Ils expliquent aussi les différences de profondeur et d'aspect des marbrures constatées sur de courtes distances, sans qu'intervienne la pente générale. Ils expliquent aussi les « caprices » de la reprise et de la croissance des plants forestiers introduits sur un même plateau.

2. SOLS FORTEMENT HYDROMORPHES DES VIDES (à distinguer nettement des premiers):

Ce sont des sols noirs en surface; ce sont, en réalité, des sols « pratogènes » de prairies humides à hautes herbes, non vraiment « forestiers » puisque, depuis une époque très ancienne, ils ont été influencés par la molinie. Leur teinte noire (H 81, 82, 90 ou J 81, 82, 90 du Code Expolaire) est due à la mauvaise décomposition de la molinie (riche en silice) en milieu anaérobie.

La décoloration intense de l'horizon médian devenu blanc est due à l'influence persistante de l'eau stagnante. Si leur sous-sol semble bien être plus dur que celui des sols voisins sous forêt, c'est probablement qu'il y a eu une action hydromorphique plus marquée. Il est toujours fortement marbré.

Nous avons observé, en particulier en II 14, une variante de sous-sol à marbrures litées horizontales (semblables à des varves). Cet aspect feuilleté est peut-être dû au dépôt de loess saisonniers dans un marais (simple hypothèse). ou, au contraire, à des colmatages saisonniers de textures un peu différentes.

Ces sols de vides sont eux-mêmes disposés en chaînes depuis le faciès typique au centre du vide jusqu'au faciès forestier en bordure: on peut considérer qu'il s'agit d'une *phytoséquence*, d'ailleurs d'origine souvent semi-artificielle.

2.1. DÉPRESSIONS NATURELLES: les sols les plus typiques de cette sorte se rencontrent dans de minimes dépressions des glacis. Nous proposons au chapitre XI 3.11 une explication de leur genèse (anciens marécages jamais boisés). Ce sont les sols dits de « mauvais vides ». La molinie y forme des « touradons ». Ils sont d'amélioration coûteuse.

2.2. VIDES ACCIDENTELS: d'autres sols, également hydromorphes, à couche noire, ou seulement grise, sont observés sur les plateaux sans qu'on perçoive de dépressions; il est vraisemblable qu'il s'agit de *vides accidentels* prolongés, dus en particulier à des *feux*: le découvert a augmenté la quantité d'eau entrant dans le sol, donc le lessivage; la molinie a imprimé sa marque. Ce sont les sols dits de « bons vides ». La molinie ne forme pas de « touradons ».

La distinction entre 2.1. et 2.2. quelque arbitraire qu'elle soit, a probablement une assez grande importance relativement aux possibilités de restauration (plus aisées pour les bons vides relativement récents que pour les mauvais vides, relativement anciens).

3. SOLS MARMORISÉS DE VALLONS:

A cause de leur grande extension, nous avons surtout étudié les sols marmorisés de plateau (en position haute), mais il en existe également dans les fonds de vallon. Si le cours d'eau est permanent, ce sont des types faisant transition avec les vrais gleys. Si c'est un ruisseau intermittent, ce sont des pseudogleys.

4. SOLS MARMORISÉS DE PENTE:

Certes, les sols marmorisés sont très généralement sur des plateaux, mais les Allemands, en particulier HUNGER, en ont signalé sur des pentes. Nous-même en avons observé en III^e série, parcelle 5. Puisque l'eau ne stagne pas actuellement en ces stations, nous pensons qu'il s'agit de pseudogleys fossiles très épais dont la masse a été entaillée en biseau par l'érosion ou, encore, que les actions périglaciaires de la marmorisation contrastée se sont produites sous des pentes moins fortes que la pente actuelle alors que le massif n'était déjà plus un glaci uni.

5. SOLS A SOUS-SOL PLUS ARGILEUX ET PLUS RICHE:

Nous l'avons étudié en VIII 25. L'indice de plasticité est quadruple; la surface spécifique quintuple; la perte au feu est double; la capacité d'échange, triple: peut-être s'agit-il d'une couche d'argile pliocène.

En tout cas le bon état du peuplement (beau bouquet de chêne rouvre et hêtre) nous avait intrigué depuis longtemps; il est pro-

bable que l'explication en est la plus grande richesse en argile du sous-sol. Il semble que d'autres taches de sol du même genre se trouvent disséminées sur la ligne de partage des eaux entre le Doubs et la Loue.

6. SOLS REGRADÉS (Voir chapitre XIII 1.4.):

Signalons, par exemple, des sols localement regradés aux emplacements d'anciens chablis. La terre attachée aux racines forme une butte qui s'effondre, la souche pourrit et enrichit localement le sol en matières organiques. Les conditions sont meilleures.

Sont à considérer aussi comme sols améliorés les emplacements d'anciens arbres du fait de leur succession naturelle au même point (dans le cas d'essences à graines lourdes) ou de recépages répétés: on a ainsi des « entonnoirs » de bons sols.

Doivent être signalés aussi les anciens champs cultivés en forêt et aujourd'hui reboisés: pendant des périodes de durée variable, ils ont reçu une fumure qui laisse longtemps des traces.

Sur ce sujet des variantes, on consultera aussi le chapitre XIII (Comparaisons).

Bibliographie: MAZENOT (d.d.), WILDE (d.d.).

CHAPITRE X

DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE

Les sols à sous-sols marmorisés ont une extension beaucoup plus grande qu'on ne l'imagine habituellement ; c'est la raison pour laquelle nous avons été amené à les étudier en détail.

1. A L'INTERIEUR DE LA FORET DE CHAUX (fig. 13):

1.1. DANS L'ENSEMBLE: le phénomène de marmorisation est plus marqué dans la partie Est de la forêt que dans la partie Ouest. Nous y voyons une triple cause:

1° Dans l'Ouest, le relief est en moyenne beaucoup plus accidenté par suite de la proximité du niveau de base, qui est le confluent de la Loue et de la Clauge. Les croupes sont plus étroites, le drainage se fait mieux, la nappe aquifère perchée est plus rapidement évacuée. Dans l'Est, le relief est plus mou et les plateaux sont plus étendus.

2° Dans la partie orientale, le climat est sensiblement plus froid et plus humide, l'eau est moins vite évaporée.

3° La proximité des usines (forges de Fraisans, salines d'Arc-et-Senans) a causé une dégradation plus grande du peuplement, donc un découvert plus fort pendant plusieurs siècles, découvert qui a favorisé la molinie et la marmorisation.

1.2. DANS LE DÉTAIL: chaque langue tabulaire porte une hydro-séquence. (V. ch. IX 1.1. et PLAISANCE 1953 a et b).

2. VALLÉE DE LA SAONE:

1° SUR LA RIVE GAUCHE, les forêts de Chevigny, Pourlans, Seillon sont sur sol marmorisé.

REPARTITION DES TYPES DE SOLS

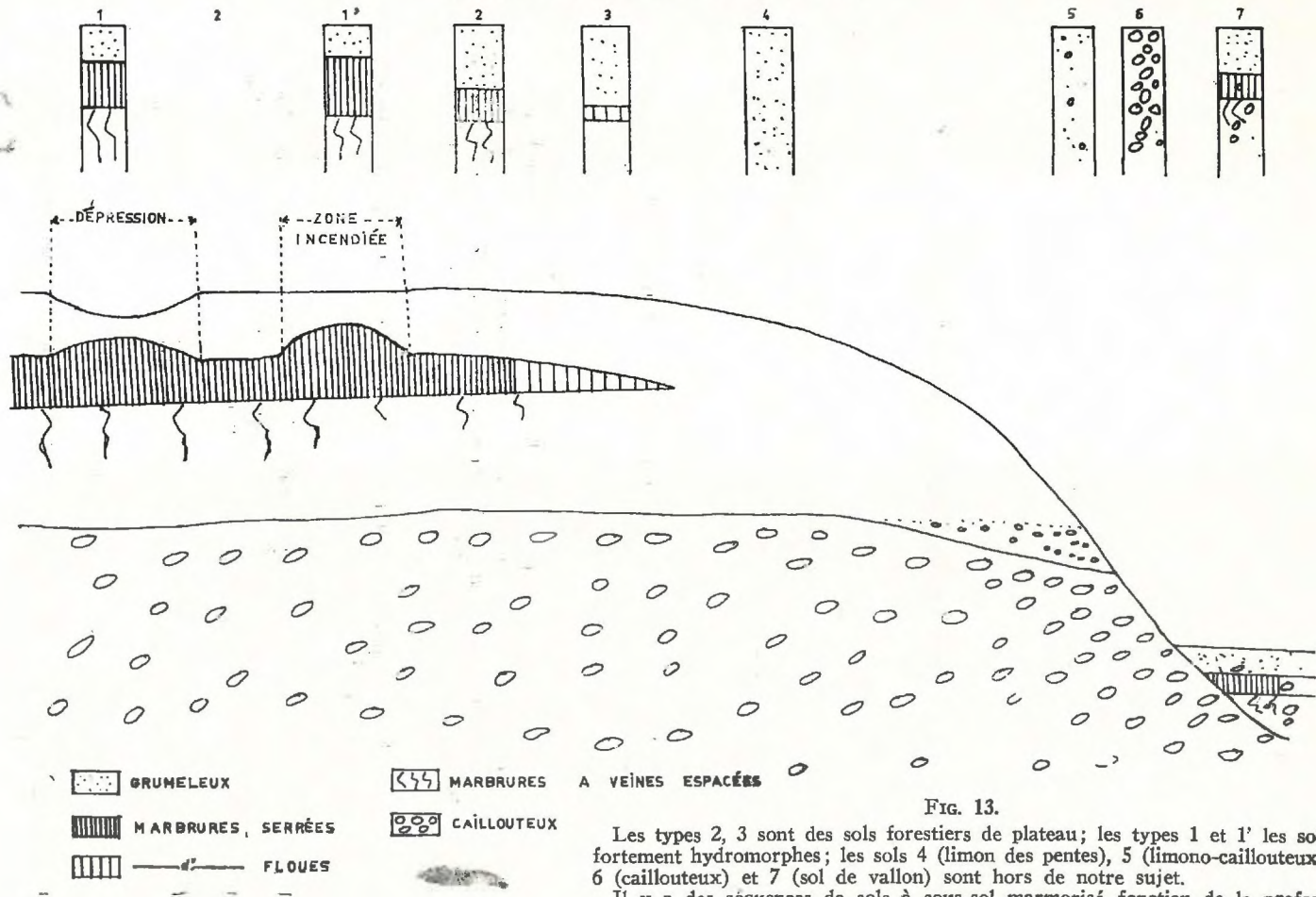


Fig. 13.

Les types 2, 3 sont des sols forestiers de plateau; les types 1 et 1' les sols fortement hydromorphes; les sols 4 (limon des pentes), 5 (limono-caillouteux), 6 (caillouteux) et 7 (sol de vallon) sont hors de notre sujet.

Il y a des séquences de sols à sous-sol marmorisé fonction de la profondeur ou de l'intensité des marbrures.

2° SUR LA RIVE DROITE, celles de Citeaux, Borne, Bornotte (voir Congrès A.I.S.S. 1956). La cartographie de la molinie facilite beaucoup la cartographie des sols à marbrures.

3. EN FRANCE :

Citons la forêt particulière de Bonnevaux (Isère), la forêt domaniale des Blaches ; dans la vallée de la Garonne : Bouconne, Montech ; dans celle du Rhin et la trouée de Belfort : Chavanne, Aspach. Il y a des sols analogues (« vieux lehms ») dans le Haut Sundgau (région d'Altkirch) où la forêt couvre 28 % de la surface. Dans la région méditerranéenne, MONTARLOT signale des horizons bigarrés dans les Ann. Agr. de Janvier 1952 ; BONIFAY signale un sol panaché près de Sanary-sur-Var ; DESAUNETTES a décrit ceux de Verargues et Bouillargues. J. DUPUIS a étudié des sols voisins (Moullisme, Vienne) avec bourdaine et saules à oreillettes. DUCHAUFOR 1961 a signalé un sol lessivé à pseudogley dans la forêt de la Contrôlerie, etc.

4. EN EUROPE :

Il y en a dans toute l'Europe Centrale. Par exemple en Allemagne on en a cité dans l'Eifel, dans les Leinswald, Rossauer Wald, Zellwand, Tharandter Wald, Taucherwald ; en Autriche, dans le Steiermark ; en Yougoslavie, dans la région de Kulasi ; en Belgique, dans l'Ardenne (massif de Saint-Hubert...).

Bibliographie : CAIN... 1958, DUDAL 1953, LUTZ 1940, PLAISANCE 1953 (a et b), STOUT (B.).

CHAPITRE XI

EVOLUTION ANCIENNE

En étudiant les sols de la forêt de Chaux, il nous est apparu nettement que les conditions actuelles ne suffisaient pas à expliquer les différences d'aspects constatées. On sait que de nombreux pédologues accordent une importance croissante aux phénomènes paléopédologiques (Gèze). Comment pourrait-on penser d'ailleurs que des climats très agressifs, comme le furent les climats antérieurs n'aient pas laissé de traces durables dans le matériel qui, dès les époques anciennes, était soumis à leur action. Ces climats furent d'ailleurs très variables dans le temps et ont déterminé des effets tantôt cumulatifs, tantôt soustractifs; CAVALLÉ pense même, à propos des boubènes, que les climats chauds interglaciaires ont pu effacer les effets des climats périglaciaires.

Nous ne devons pas oublier qu'à certains moments de leur histoire, les sols de la forêt de Chaux ont été situés à 30 km des glaciers de la montagne jurassienne: ils étaient donc indiscutablement placés sous des influences périglaciaires; tantôt il s'agissait du substratum actuel non encore recouvert, tantôt du sol superficiel actuel ou d'une couche peu érodée depuis. Nous allons étudier successivement ces diverses couches; ainsi apparaîtra qu'il s'agit d'un sol polycyclique dont certains caractères sont hérités des climats et des végétations anciennes disparues. On remarquera que, si l'hypothèse des lacs bressans, est exacte, il y a eu des parties émergées qui ont subi certaines actions: par exemple celle de climats paratropicaux au pliocène, alors que d'autres parties étaient recouvertes et, de ce fait, protégées. On notera qu'il y a eu tardivement des périodes chaudes et sèches (période xérothermique). On n'oubliera pas aussi que l'action périglaciaire ne s'est pas exercée une fois, mais bien 6 ou 7 fois successivement, au moins. Cette complexité est peut-être la cause de bien des variations de faciès qui nous étonnent aujourd'hui.

1. ACTIONS ANCIENNES DES CLIMATS SUR LES CAILLOUTIS QUI SONT LE SUPPORT DES LIMONS :

1.1. RUBÉFACTION : elles s'est produite sous climat chaud dans la masse des produits terreux provenant d'une désagrégation partielle des cailloutis pliocènes. Il est possible qu'elle ait donné lieu à des concrétionnements. En tout cas, la matrice a pris une couleur rouge qui est très visible (en particulier dans l'Est de la forêt) dans des masses de terre qui ont été protégées de l'action atmosphérique par la couverture.

1.2. FERRETISATION (ou ferro-manganisation) : elle s'est produite à une époque où le relief du grand glacis n'était que peu ou pas entaillé ; c'était une grande surface subhorizontale. Peut-être s'est-elle opérée pendant l'interglaciaire Mindel/Riss ? Nous ne pouvons affirmer qu'elle relève de climats très froids ; auquel cas elle dépendrait essentiellement de la couverture végétale de toundra. Sur un relief presque plat avec sous-sol imperméable (parce que gelé), des solutions très acides de végétation mal décomposée d'éricacées ont certainement attaqué le matériel. Sous ce faible relief, un écoulement latéral interne se produisit sur le sous-sol profond gelé ; il déterminait probablement la naissance dans les légères dépressions de forts concrétionnements, tels que ceux que nous avons découverts en 1^{re} série (blocs allongés d'un volume de 1 ou 2 m³). Peut-être s'agit-il, en réalité, de petites concrétions déplacées et réagglomérées ; dans ce cas, l'explication de la genèse des blocs reste sensiblement la même ; c'est un effet du climat très froid.

On peut imaginer, au contraire, que les deux phénomènes de rubéfaction et ferrétisation soient simultanés et dus aux grandes chaleurs sèches. Nous penchons plutôt pour l'autre hypothèse, celle des deux phénomènes successifs. Dans les deux hypothèses, les phénomènes ont affecté la surface des cailloutis alors qu'ils n'étaient pas encore recouverts par les limons supérieurs, ou lorsqu'ils n'étaient tapissés que d'une couche d'épaisseur inférieure à l'actuelle.

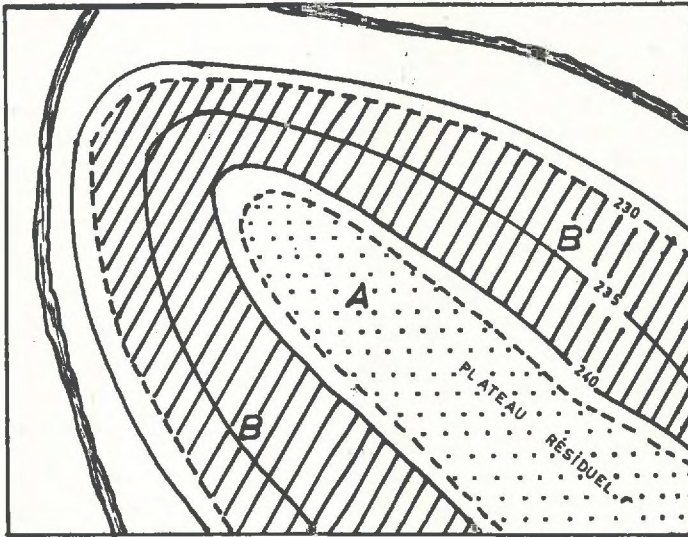
Aux mêmes causes, il faut probablement attribuer ces liserés ferromanganiques qui sont visibles dans les carrières de la Route des Italiens, à quelques 6 ou 8 mètres de profondeur : ce sont, en réalité, les intersections de surfaces gauches avec le front de la carrière. Ils ont été manifestement déformés ultérieurement par les compressions périglaciaires. Quoi qu'il en soit, ils résultent de précipitations, à une certaine profondeur, d'hydroxydes métalliques. Cette profondeur dépendrait probablement de l'épaisseur des cailloutis situés au-dessus (qui n'était pas forcément aussi grande que l'épaisseur actuelle). D'autre part, on pourrait admettre que des jus acides véhiculant les hydroxydes s'alcalinisaient peu à peu au fur et à mesure qu'ils descendaient à travers les cailloutis (dont

une partie était faiblement calcaire). La précipitation s'effectuait à un certain niveau (qui semble très profond aux pédologues européens); ce sont, en réalité, des macrosols.

1.3. CRYOTURBATIONS PROFONDES DANS LES CAILLOUTIS: elles sont bien visibles dans la gravière des Prés-bas, par exemple: il y a des plans de décrochement; il y a des ondulations étonnantes; il y a aussi de grands coins remplis de limons avec cailloux redres-

LESSIVAGE LATÉRAL

Vue en plan



Profil

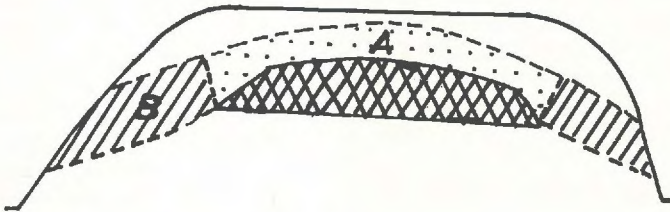


FIG. 14.

Les zones A et B sont à considérer comme d'énormes horizons d'un macroprofil oblique.

sés sur les bords: ce sont manifestement des coins de gel où le limon s'est substitué à la glace fondante. L'intérêt de les signaler est double:

1° Certaines de ces cryoturbations ont des répercussions locales sur les limons qui surmontent et les enracinements inclus, toutes choses qui sont sujet de notre étude.

2° C'est une preuve, s'il en fallait une, de l'existence de climats périglaciaires qui ont agi en même temps sur les limons déjà en place; ceci de façon, il est vrai, totalement différente; insoupçonnée jusqu'à ces dernières années, et encore un peu mystérieuses ainsi qu'il ressort des paragraphes 2 et 3 qui suivent.

2. ACTIONS ANCIENNES

SUR LES LIMONS DE PENTES:

2.1. ACTIONS CRYERGIQUES FAIBLES: elles semblent peu importantes, soit parce que les parties que nous voyons n'affleurent que depuis peu de temps (c'est-à-dire depuis l'ouverture des vallons: il s'agit de sols jeunes), soit parce qu'elles étaient recouvertes par les eaux, soit parce qu'il s'agissait de sol bien drainé où le gel avait moins d'action.

2.2. LESSIVAGE LATÉRAL: ainsi que nous l'avons décrit ailleurs, le lessivage latéral des sols de plateaux a un peu enrichi la masse des limons de pente en métaux (Fe, Mn) et en alcalino-terreux.

3. ACTIONS ANCIENNES

SUR LES LIMONS DES PLATEAUX:

3.1. LEHMIFICATION: s'il y a eu, comme nous le supposons, un dépôt éolien recouvrant les alluvions, sa transformation s'est probablement produite sous climat humide. Si donc c'était un vrai loess, il est normal qu'il se soit décarbonaté et lehmifié suivant le processus bien étudié en Alsace par FRANC de FERRIÈRE.

Les taïgas qui ont succédé à plusieurs reprises aux toundras ont vraisemblablement contribué à cette lehmification; nous ne pouvons affirmer que le matériau originel fût un loess calcaire. Nous avons même admis qu'il s'agissait plutôt d'un dépôt éolien formé de poussières siliceuses-silicatées (Ch. II, 2.1.).

3.2. LESSIVAGE: il est normal et probable que ce matériel éolien a subi un fort lessivage, qui explique partiellement l'enrichissement en argile à partir de 50 cm; *peut-être cette argile n'est-elle qu'un supplément ajouté à celle résultant des dépôts antérieurs plus argileux*: d'où l'accroissement d'un ventre préexistant dans le profil de la teneur en argile.

3.3. COMPACTIFICATION - CONSOLIDATION - CIMENTATION: la modification de structure sous l'effet du climat est un phénomène méconnu, mais certain sous des climats très agressifs — et on sait qu'il y en a eu — entre 0,50 m et 2 m, surtout sous les zones émergées; il y a eu des durcissements.

On pourrait penser qu'il s'agit du tassement sous-lacustre sous le poids de plusieurs dizaines de mètres d'eau du lac bressan: c'est douteux, car ce n'est pas le cas pour des limons d'autres régions non submergées.

Peut-être s'agit-il de compactification due aux alternatives du gel et dégel.

1° lors du gel, surpression, coincement de l'ensemble d'un horizon et, aussi, éclatement de structure, empilements des constituants.

2° lors du dégel, l'eau liquide rendue acide et stagnant sur le pergélisol agit dans le même sens en détruisant la structure et en attaquant les minéraux (en particulier les argiles). Le mécanisme exact nous échappe. Mais on sait aussi que le gel, en un point, soutire l'eau voisine. On peut donc supposer qu'il soit responsable de dessiccation cryogénique favorisant les reconcentrations et précipitations marmorisantes. Peut-être y a-t-il eu, de plus, une véritable cimentation par des oxydes non solubles entourant les grains de patines solides qui se relient les unes aux autres et donnent au matériau une forte cohésion; ce serait alors une conséquence d'un lessivage, ou même d'une première podzolisation supérieure très ancienne sous toundra.

En tout cas, nous devons constater que cette dureté, mesurable au pénétromètre, n'affecte ni la couche superficielle exposée depuis longtemps aux actions atmosphériques du climat tempéré, ni les couches très profondes restées à l'abri. Par contre, ses répercussions sur le développement des enracinements sont assurément très importantes.

3.4. MARMORISATION RÉTICULÉE: plusieurs mécanismes peuvent être invoqués pour l'action des grands froids:

a) On sait qu'une congélation interne en un point a pour effet d'attirer l'eau du sol périphérique qui vient grossir la lentille initiale (phénomène analogue aux concrétionnements). On peut supposer que le dessèchement qui en résulte à quelques centimètres crée une fente de dessiccation. S'il y a plusieurs centres de gélivation, il est normal que le réseau des fentes revête en coupe un aspect polygonal (parfois même hexagonal).

Les expériences au laboratoire de TRICART (orientées d'ailleurs dans un autre sens, puisqu'il s'agissait de faire des solifluxions artificielles) confirment cette hypothèse.

b) On peut aussi soutenir que le long d'une racine l'eau descend ; en gelant elle gonfle, crée une fente ; ultérieurement celle-ci se remplit d'eau, ce qui accentue l'hétérogénéité du milieu : bien que l'origine soit ponctuelle, ou tubulaire, ou annulaire, on conçoit que l'éclatement consécutif du sol se fasse suivant des surfaces gauches (assez peu courbées en général).

c) On sait que si la glace formée à 0° est portée à de très basses températures (— 30°) elle se rétracte, elle laisse donc des fentes, qui peuvent naturellement se disposer en réseaux ; ces fentes peuvent d'ailleurs se remplir de neige, qui passe à l'état de névé et de glace ; le phénomène tend de lui-même à s'amplifier à partir de petites hétérogénéités initiales (extrémités de racines...).

Le résultat des mécanismes décrits ci-dessus est la marmorisation réduite aux fissures : des lames grises se subdivisent et s'enchevêtrent dans un matériel ocre ; elles forment des réseaux entrecroisés.

Peut-être les deux explications invoquées au paragraphe précédent ne sont-elles pas inconciliables ; peut-être, au contraire, sont-elles successives : l'ouverture des fentes a pu être déclenchée par la sécheresse, ces fentes se seraient agrandies lorsque l'eau pénétrant en elles aurait gelé et augmenté ainsi de volume ; elles se seraient en même temps allongées par le bas. Les racines qui ouvrent des tubes cylindriques et qui se faufilent dans les fentes servent, pendant leur vie ou après leur mort, au déplacement de l'eau chargée de matière organique, donc à la perpétuation des divers processus : l'ouverture des fentes, leur écartement, la descente de matériaux fins (limon et argile), la réduction chimique, la déferrisation... On peut imaginer une alternance (peut-être saisonnière) de ces deux phénomènes, suivis de colmatage et provoquant en tout cas assez rapidement la structure polyédrique du sous-sol.

Nous ne pouvons administrer de preuves définitives. Disons seulement que c'est un mécanisme possible de la polyédrisation (qui se traduit en plan par une polygonation). En tout cas, le mécanisme serait le suivant :

a) une porte qui s'est ouverte pour une entrée de l'eau riche en acides organiques, donc une cause de réduction chimique et de déferrisation locale conséquente.

b) dans ces fentes entre-bâillées peuvent parfois descendre des éléments limoneux ou argileux provenant du lessivage des couches superficielles. Ce remplissage s'est donc effectué avec des matériaux en suspension non cimentés : ainsi s'explique l'hétérogénéité structurale des sous-sols au point de vue de la cimentation, et son comportement. Les racines des végétations ultérieures ont trouvé, dans ces fentes, un milieu plus meuble ; elles ont pu, à leur tour, déclencher d'autres fentes plus petites : ainsi s'est formé le réseau polyédrique avec fissures verticales, fissures obliques, et tubes de racines.

On pourrait imaginer que la cause est la dessiccation interne due à la chaleur provoquant des contractions et des craquelures. Nous pensons qu'il s'agit plutôt de l'action d'un froid dont l'existence est par ailleurs certaine. Nos observations rejoignent celles de POSER, TABER, CAILLEUX, BERTOUILLE...

3.5. MARMORISATION TACHETÉE: nous estimons indispensable de distinguer les marmorisations réticulées et les marmorisations tachetées:

a) l'aspect est bien différent; parfois la limite entre les deux est une ligne droite horizontale sans transition, comme s'il s'agissait d'un sol raboté et recouvert (voir ci-dessous 3.10.).

b) la teneur en argile des premières est nettement plus forte; cette argile répartie sur plusieurs mètres d'épaisseur ne peut provenir d'un lessivage d'horizons supérieurs disparus, aussi épais que l'on voudra: ils eussent été insuffisants à enrichir une couche de limons de plusieurs mètres.

c) la nature des minéraux argileux révélée par l'analyse est différente; dans le sous-sol profond il s'agit d'un matériau beaucoup plus altéré, contenant moins de vermiculite, davantage d'illite et d'interstratifiés 10-14 Å.

Nous considérons que la marmorisation ponctiforme ou maculiforme (marmorisation tachetée), qui donne des irisations ou des aspects nébuloïdes, est un phénomène actuel et nous l'étudions au chapitre suivant, mais il n'est pas exclu qu'elle se soit produite déjà, sous des formes d'ailleurs plus ou moins contrastées, dans les temps anciens. La marmorisation tachetée actuelle ne serait dans cette hypothèse, que la continuation du même phénomène ancien. Généralement, elle affecterait l'horizon immédiatement supérieur à celui anciennement marmorisé.

Notons, en effet, que cette marmorisation s'est déjà opérée à la surface des cailloutis: on observe en de nombreux points que ceux-ci sont noyés dans une masse fortement marbrée (1^{re} colonne): ceci prouve l'ancienneté du phénomène.

3.6. CRÉATION D'UN MICRORELIEF (actuellement enfoui): nous avons noté, bien souvent, des irrégularités du sol (auxquelles correspondaient d'ailleurs les irrégularités du peuplement, et c'est cela qui est important pour le forestier); elles s'expliquent probablement:

a) soit par des bosses de toundra, laissant entre elles des petites dépressions; depuis, tout s'est aplani ou a été recouvert;

b) soit par des compressions latérales dues au gel et au dégel.

On sait que le couvert des mousses et des lichens, ainsi que l'humus acide du sol en cours de podzolisation favorisent la cryotur-bation (TRICART 1963, p. 80). Quoi qu'il en soit, le sous-sol de la forêt pourrait bien avoir conservé le souvenir de ces vicissitudes. Une des conséquences de cet état de chose est la grande variation à peu de distance des niveaux de la nappe perchée : sa surface très bosselée n'est que le reflet de l'imperméabilité irrégulière du sous-sol. (Voir aussi ch. X 3).

3.7. SOLIFLUXIONS : leur réalité est bien sensible en plusieurs points :

a) dans diverses gravières, en particulier celles de la Fontaine des Prés-Bas, on voit de magnifiques paquets de limons qui ont glissé du plateau sur les graviers, se sont même introduits dans les graviers, et ont ainsi été arrêtés à mi-pente ; ils avaient été marmorisés *avant* leur glissement ; ils ont été recouverts d'une couche de graviers probablement soliflués eux aussi ultérieurement.

b) il nous est arrivé fréquemment de constater l'existence, en surface, de petites taches de molinie sur des pentes assez fortes : le sous-sol se révélait marmorisé localement sur quelques mètres carrés : manifestement, il s'agit de paquets de terre solifluée.

c) parfois même il y a des champs de molinie sur de légères pentes, ce qui ne laisse pas d'être surprenant : ce sont probablement des épandages anciens de matériaux plus compacts : il s'agit alors plutôt de fort ruissellement que de solifluxion.

d) on peut imaginer que les limons bruns des pentes soient descendus du plateau voisin sous forme de large coulée boueuse ou de ruissellement, en se démarmorisant : c'est une hypothèse que nous ne ferons que signaler, car nous pensons que ce sont plutôt des limons alluviaux antérieurs au dépôt éolien.

e) notons aussi que pour certains glissements une autre explication peut être proposée : celle de glissements sous-lacustres, mais elle reste fort hypothétique et conjecturale.

3.8. DEMI-BOULES DE LIMON : nous avons observé, près de la Châtelaine et près de Mont-sous-Vaudrey, des demi-boules de limon insérées dans le cailloutis avec un redressement des cailloux à leur voisinage qui résulte manifestement de la compression exercée par la masse de limon. Ces demi-boules avaient environ 2 à 3 m de diamètre ; leur partie supérieure n'a pu être bien étudiée que lorsqu'il s'agissait d'ouverture de routes ; dans certains cas, leur partie supérieure était passée à l'état de sol meuble (terre forestière) par suite des actions atmosphériques. Nous ignorons donc leur passé. Par contre, la partie inférieure est anciennement mar-

morisée et intacte: il s'agit probablement de morceaux de limon gelés détachés des berges de rivière, qui ont roulé et qui se sont déposés à leur emplacement actuel.

3.9. HYPOTHÈSE DE L'EFFACEMENT DE LA PARTIE SUPÉRIEURE DE LA MARMORISATION RÉTICULÉE: on peut imaginer que la marmorisation réticulée s'est formée sur une épaisseur nettement plus forte que celle où elle est visible actuellement. Dans ce cas, les fentes de gel auraient eu, à l'origine, une ouverture en gueule nettement plus grande (5 à 10 cm par exemple); une partie, peut-être, aurait été rabotée par l'érosion. En tout cas, une partie, celle située immédiatement au-dessous, aurait subi une reptation sous forme de mollisol (*) sur le sous-sol gelé [pergelisol (**)]. Cette reptation sur pente faible aurait étiré et déformé la couche; elle aurait ainsi brouillé le dessin; les fractions grises des fentes auraient été brassées avec les fractions ocre d'entre les fentes. Le matériau aurait ainsi acquis son aspect actuel, c'est-à-dire:

a) en surface une couche de 20 à 30 cm, fortement modelée par les agents atmosphériques sous un climat tempéré et sous une végétation abondante: cette couche serait devenue humifère, meuble, grumeleuse.

b) la partie inférieure (30 à 70 cm), subissant depuis plusieurs millénaires l'action de la nappe perchée intermittante aurait pris son aspect bariolé (marmorisation tachetée).

c) la marmorisation réticulée profonde, lorsqu'elle existe, serait dans cette hypothèse, le souvenir d'une période plus ancienne.

Nous ne présentons cette explication que comme une hypothèse commode pour rendre compte des 3 couches que l'on observe, par exemple dans la parcelle 706; nous ne pouvons affirmer qu'il s'agit de la réalité des faits.

3.10. HYPOTHÈSE DES RECOUVREMENTS: on pourrait aussi imaginer que le sol craquelé du périglaciaire a été raboté, puis recouvert par un ou plusieurs nouveaux sédiments éoliens, l'un ayant subi postérieurement la marmorisation tachetée, l'autre, supérieure, ne l'ayant pas subie.

Mais ce que nous savons de la marmorisation et des possibilités de démarmorisation par action climatophytogénique nous évite d'avoir recours à une telle explication qui, certes, rendrait compte aisément de la présence des trois couches, mais que rien ne justifie et qui est plutôt controuvée par l'étude morphoscopique des grains de terre (Voir § 5 ci-dessous).

* sol pédiodiquement dégelé.

** sol constamment gelé et dur.

3.11. HYPOTHÈSE DES EMMARÉCAGEMENTS LOCALISÉS ANCIENS: le profil un peu spécial des vides à molinie peut s'expliquer ainsi:

1° sur le plateau primitif non entaillé (sauf sur les bords) existaient, aux époques glaciaires, des mares ou grandes flaques disséminées dans la toundra, installées dans les minimales dépressions; des sols « aquatiques », avec horizons tourbeux fortement hydromorphes, s'y sont développés. Cette hypothèse d'anciennes mares rend bien compte du litage du sous-sol que nous avons observé (similivannes de II 14).

2° les mares ou flaques se sont vidées, par suite de l'enfoncement du réseau hydrographique, lorsqu'elles ont été atteintes par la remontée des têtes de vallon. Lors de l'envahissement par la végétation forestière, c'est la molinie (déjà installée?) plutôt que les arbres qui se seraient maintenues sur ces surfaces à sol tourbeux et ingrat. Cette molinie fut l'occasion, dès l'arrivée de l'homme (et même avant, par la foudre) d'incendies, favorisant son pullulement: molinie et feux conjuguèrent leur action pour freiner l'installation d'un boisement.

L'horizon noir actuel ne serait autre que celui de l'ancien marécage. La différence de niveau étant faible n'est pas visible à l'œil. On pourrait même imaginer un certain colmatage lité et toujours marécageux comblant la minimale dépression primitive.

Si cette hypothèse est exacte, ces sols de « mauvais vides » n'ont jamais été boisés ou ne l'ont été que de façon médiocre; ces sols « de mauvais vides » sont donc de véritables sols pratogènes de marais, « sols palustres », d'où peut-être la difficulté de les reboiser (en réalité de les « boiser » s'ils ne l'ont jamais été); leur évolution en sol forestier exigerait une « dégradation » au sens courant des pédologues (inverse du sens commun) assez longue et difficile.

A cette hypothèse de cuvettes anciennes périglaciaires, une variante peut être proposée: il y aurait eu recouvrement du sol marécageux (intact ou après troncature) par des limons éoliens comme de tout le restant de la surface; mais cette couverture aurait été arrachée en priorité, lors de l'abaissement du niveau de base et de la remontée des zones de départ de ruisselets; il est certain qu'un sol gorgé d'eau est plus sujet au ruissellement puisque la descente des eaux tombées est freinée ou arrêtée. Par conséquent, l'érosion dans les vides (alors qu'elle est quasi-nulle sous forêt) peut devenir notable: peut-être cette explication jouerait-elle aussi pour rendre compte de la moindre épaisseur de sol utile au-dessus de la couche marbrée dans les sols de vides artificiels qui ont souffert à maintes reprises des incendies: elle résulterait de troncature discrète.

On pourrait d'ailleurs imaginer une érosion tronquant le sol de mare, suivie d'un colmatage, mais tout ceci est conjectural. Dans cette hypothèse, la couche noire serait également le résultat de l'ac-

tion (pendant un temps, il est vrai, moins long) de la molinie installée dans ces cuvettes. Dans tous ces cas il s'agirait non d'un sol forestier modifié par la molinie, mais d'un sol totalement prairial (sol de moliniaie): Sur ce sujet on consultera aussi le ch. IX 2.

4. EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX:

4.1. EVOLUTION PRÉSUMÉE: la comparaison entre les argiles des sols bruns des pentes et celle des sols de plateau montre qu'il y a des différences de natures d'argiles attestées par divers caractères: une ouverture de feuillets donnant des minéraux interstratifiés, la perte des caractères microcristallins des anciennes argiles micacées et chloritiques, l'apparition d'argiles amorphes, la perte des cations insérés entre les feuillets, l'augmentation relative des quartz très fins (stériles) (par action désagrégante du climat sur les grains de quartz?). On sait, en effet, que par lessivage, l'argile, non seulement descend dans le sol, mais aussi se transforme *en descendant*; elle peut aussi se transformer *sur place* sous l'action prolongée de l'eau stagnante.

En particulier, selon Mme CAMEZ et M. FRANC de FERRIÈRE, la vermiculitisation est due à l'hydrolyse par l'eau de pluie. Elle consiste en un écartement des feuillets de l'illite par perte des ions K^+ qui formaient tenons, et dans la disparition des feuillets brucitiques de la chlorite, avec départ du Mg^{++} ; il y a ainsi apparition d'édifices interstratifiés. Probablement l'acidité des eaux sous des végétations périglaciaires (toundra à éricacées, taïgas résineuses) a-t-elle accéléré cette vermiculitisation.

Il est normal que cette altération soit plus marquée sur les sols de plateaux, depuis plus longtemps exposés aux effets atmosphériques que ceux des pentes; il est probable aussi qu'elle a été plus intense dans les stations maintenues longtemps découvertes (vides à molinie existant depuis, par exemple, plus de 300 ans); pour 500 ans, la quantité d'eau qui l'a traversé est par exemple, de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2$ au lieu de 350 sous forêt, et la stagnation de la nappe perchée y a duré $300 \times 200 = 60\,000$ jours au total, au lieu de $300 \times 50 = 15\,000$ jours.

4.2. SIGNIFICATION DE CETTE ÉVOLUTION AU POINT DE VUE DE LA GENÈSE DES SOLS BRUNS DES PENTES: pour ces sols la netteté des pics du diagramme de diffraction aux rayons X indique la présence de minéraux argileux en très bon état microcristallin; ils ont peu ou pas subi l'influence des facteurs météoriques, en particulier celle du gel. Il s'agit vraisemblablement d'un sol érodé jeune peu évolué très voisin, sur toute son épaisseur, de la roche-mère; il semble donc que ce soit une alluvion rhénane fine (fin de cycle sédimentaire). La vermiculite, dont le pic à 14 Å n'est pas amoindri ou déplacé par le traitement au glycérol, provient probablement

non de l'altération de l'illite, mais d'une ancienne chlorite après destruction des feuillets brucitiques. La faible quantité de chlorite restante se trouve à l'état d'interstratifié. L'étude des argiles conduit ainsi à un double résultat sur l'origine et la valeur des limons de pente.

4.3. SIGNIFICATION DE L'ÉVOLUTION AU POINT DE VUE DE LA MARMORISATION: l'étude d'un sol de vide à molinie de plateau (II/14) donne:

a) *Deuxième sous-sol profond* (— 85 cm): il y a surtout des feuillets d'interstratifiés 10-14 m et 10-14 v; ils sont en très bon état microcristallin. Il y a beaucoup moins de vermiculite que dans le sol de pente. La roche-mère a été fortement altérée par les eaux d'infiltration. *On peut penser qu'il s'agit d'un vieux dépôt éolien.*

La présence de montmorillonite (minéral argileux très fin) joue sans doute un certain rôle dans l'imperméabilité de cet horizon, donc dans la marmorisation supérieure qui en résulte.

b) *Horizon lessivé* (— 25 à — 30 cm): l'état microcristallin est encore bon. Il y a beaucoup de vermiculite, indice d'une destruction des argiles primitives par lessivage sous l'effet des eaux météoriques. La vermiculite provient probablement d'une chlorite (moins résistante que l'illite. Sol superficiel noir riche en humus; le diagramme est mauvais (pas de pics nets): le complexe 10-14 Å reste permanent; le quartz a mieux résisté, mais les argiles se sont dégradées: peut-être y a-t-il eu naissance d'argile amorphe, du type allophane, dont la fertilité est nulle. Si l'on compare avec des sols de Lieussaint établis sur loess récent würmien, on constate que ceux-ci n'ont pas subi de vermiculitisation d'où leur richesse en bases échangeables qui, d'ailleurs, a été accentuée par les fumures agricoles apportées régulièrement à Lieussaint.

Horizons du profil de Lieussaint	profondeur	Minéraux argileux		
		Kaolinite	illite ouverte	Montmorillonite et interstratifiés (10-14 Å)
A Limon des plateaux superficiel	0.30 m	2	5	3
B Terre à brique argileuse	1.00 m	2	4	4
C Ergeron calcaire	1.40 m	2	4	4

L'illite des sols de la forêt voisine de Mouchard s'est révélée beaucoup moins évoluée que celle des sols de la forêt de Chaux: cette forêt est, en moyenne, de meilleure venue que la forêt de Chaux, ce qui confirme les hypothèses.

5. EXAMEN MORPHOSCOPIQUE DES GRAINS :

5.1. SOL DE PLATEAU (I 14) : l'examen par M. BERTOUILLE des grains inférieurs à 35 microns des 3 niveaux 35, 60, 160 cm a donné les résultats suivants :

5.1.1. *Micro-concrétions* (les auteurs classiques, sauf KUBIENA n'en ont pas parlé) :

1° petites concrétions noires sphériques craquelées, soit très pures, soit cimentant de minuscules grains de quartz (jamais de gros grains). Elles représentent 65 % de la fraction supérieure à 500 microns, mais seulement 10 % des particules inférieures à 80 microns.

Dans l'échantillon à 60 cm, il y a des sphérules un peu plus grosses.

Dans l'échantillon à 100 cm, elles sont encore plus grosses. Toutes semblent anciennes et allochtones.

2° concrétions jaunes miel, anguleuses, cimentant les plus gros quartz ; elles représentent (comptés en nombre de grains) 10 à 30 % de l'ensemble des concrétions ; elles paraissent récentes et semblent produites « in situ ».

3° concrétions mixtes, les jaunes englobant les noires et les gros quartz ; elles semblent récentes également.

Dans l'échantillon marmorisé à 35 cm, il y a souvent une zone blanchâtre (cortex), entourant le type jaune 2, qui englobe lui-même un ou plusieurs noyaux noirs.

Il y a aussi, au niveau de 35 cm, des pellicules d'encroûtement autour de radicales.

5.1.2. *Quartz* : le quartz représente 1 % du sédiment brut environ. Le quartz constitue la majeure partie (comptés en nombre de grains) des moins de 60 microns, mais 16 % seulement des plus de 50 microns. La proportion est sensiblement la même dans les 3 échantillons.

Les grains à 35 cm sont très propres ; en profondeur ils sont moins propres ; les enduits ont été moins bien décapés.

Les constituants de moins de 100 microns sont presque tous « non usés » (98 %) ; la moitié des plus de 100 microns sont surtout « émoussés-luisants », picotés (par un façonnement éolien très incomplet). Les « ronds-mats » sont rares, ils représentent 1/5 dans la fraction supérieure à 200 microns.

5.1.3. *Interprétation* :

1° il ne semble pas y avoir de coupure stratigraphique entre 0 et 100 cm.

2° il y a eu 2 phases de minéralisation: la 1^{re} (type 1) de type subtropical (pliocène) (oolithes craquelées); la 2^e (types 2 et 3): marmorisation tachetée peu contrastée.

3° l'ensemble du dépôt semble éolien, mais avec faible transport (forte proportion d'émousés-luisants, moins façonnés que les ronds mats).

4° l'horizon à 60 cm est un horizon d'accumulation avec 30 % de grosses concrétions, tandis que celui de 35 cm est un horizon éluvial (13 %) de même teneur que l'horizon profond à 100 cm (13,5 %): ceci confirme qu'il y a eu un lessivage avant marmorisation ou contemporain d'elle.

FORMATION DE CONCRÉTIONS

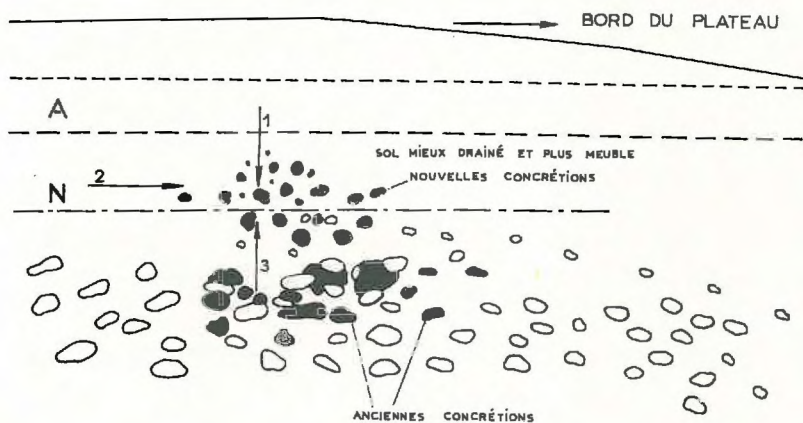


FIG. 15.

Le schéma tente de montrer la triple origine de certaines concrétions (lessivage vertical descendant; lessivage latéral; remontée capillaire à partir des forts concrétionnements de la surface des cailloutis).

5.2. FRACTION DE SOL MARMORISÉ: dans la fraction blanc sale les grains sont sans pellicules; dans celles ocre il y a des pellicules et un tassement plus marqué; il y a enfin des parties brun foncé qui sont cimentées; les éléments structuraux y sont cloisonnés par des plans; le fer imprègne la masse, le manganèse est présent sous forme de revêtements; les aspects de l'érosion sont fossilisés.

5.3. SOL DE PENTE NON MARMORISÉ I 28: l'observateur a retrouvé les concrétions de type 1 ancien, mais pas celles jaunes de type 2 et 3. L'origine première du matériel semble donc la même, mais la pédogenèse différente.

Il n'y a pas de grains ronds-mats repris, mais des ronds-mats cassés, signe d'un transport autre qu'éolien. Il y a de nombreux grains de quartz plus gros, non picotés, non éolisés. C'est probablement une colluvion d'alluvions, non un loess lehmifié en place. Ces constatations rejoignent les autres études du matériaux, en particulier celle des argiles.

6. RESUME DE L'EVOLUTION ANCIENNE :

En résumé, l'histoire ancienne de ces sols est riche de vicissitudes, les unes dues aux périodes chaudes et sèches (à forte évaporation et dessiccation), les autres aux périodes extrêmement froides des glaciations.

En ce qui concerne celles-ci, on peut leur attribuer, soit de façon hypothétique, soit de façon très probable :

- 1° des microcryoclasties génératrices de limons fins.
- 2° des microconcrétionnements et la formation de microenduits (voir ci-dessous le Ch. XII 8).
- 3° des lessivages podzolisants (dus à l'acidité de la couche supérieure recevant les débris de toundra).
- 4° des stagnations d'eau et des lessivages latéraux importants sur le pergélisol.
- 5° des déclenchements de fentes contribuant à la marmorisation.
- 6° des cryoturbations dans les cailloutis entraînant des mouvements des limons de recouvrements.
- 7° des solifluxions des limons, tantôt localisées, tantôt généralisées.
- 8° la formation de microreliefs.

Nous ne sommes pas ici dans le domaine des certitudes, mais nous sommes à l'aube d'un progrès dans la compréhension de la genèse et des accidents de nos sols.

En résumé, l'eau joue actuellement le rôle dominant, mais les forts gels ont probablement agi fortement dans le passé lointain sur le microrelief, sur les mélanges de sols par déplacement latéral, sur la consolidation, sur la fissuration, sur la dégradation des minéraux argileux.

(Voir ch. XII).

(Voir aussi ch. IX).

Bibliographie: BOURDIER 1961, CAILLEUX... 1954, CASTELA... 1958, CIRY (d.d.), FINK (d.d.), FITZPATRIK 1956, LECKWISK... 1957, MACAR... 1958, MANIL 1958, PECSI 1964, SCHENK 1960, SCHÖNHALS (d.d.), TABER (d.d).

CHAPITRE XII

EVOLUTION RECENTE

1. FACTEURS AGISSANTS :

1.1. FACTEURS PREMIERS :

1.1.1. *L'eau*: c'est évidemment elle qui est la cause première de la marmorisation tachetée, ainsi que cela résulte de notre étude attentive des niveaux d'eau et des aspects du profil aux niveaux correspondants. Il ne s'agit pas d'eau pure, mais bien d'eau chargée de gaz carbonique et de matières humiques (humus de chênaie, ou de hêtraie, ou de pineraie, ou de moliniaie, les faciès étant probablement quelque peu différents suivant le peuplement.

1.1.1.1. *Lessivage vertical*: il est du type classique bien étudié par de nombreux pédologues; la descente des pseudosolutions est freinée lorsqu'elle arrive au sous-sol très compact.

1.1.1.2. *Lessivage latéral* (fig. 9 et 14): nous l'avons signalé dès 1949. Les preuves sont constituées par un ensemble de constatations :

1° Les observations de suintement et d'écoulement que nous avons faites sur les parois de fossés orientés suivant les courbes de niveau: *ces écoulements se font soit autour des racines, soit, surtout, par les canaux provenant d'anciennes racines.*

2° Décoloration de la couche médiane sur les plateaux et particulièrement au centre de ces plateaux.

3° Présence de concrétions nombreuses en bordure immédiate des plateaux (non exclusivement, il est vrai) et dans les fonds de vallon adjacents.

4° Enrichissement (en manganèse...) des sous-sols de pente bordant les plateaux.

5° Imperméabilité totale du sous-sol.

Si l'on tente un bilan de l'eau reçue et consommée, on s'aperçoit qu'il est vraisemblable que 5 % au moins est évacué latéralement, pour disparaître, en grande partie, sous forme d'évaporation sur les pentes.

1.1.2 *Pauvreté chimique*: la marmorisation ne prend ses aspects nets que sur des sols chimiquement pauvres, en particulier pauvres en cations: c'est le cas de ceux de la forêt de Chaux.

1.2. FACTEURS SECONDS:

1.2.1. *Texture*: la stagnation de l'eau est assurément fonction de la texture pour les couches concernées: nous renvoyons au chapitre IV.

1.2.2. *Pente*: depuis longtemps nous avons insisté sur l'existence de toposéquences. La marmorisation est assurément inversement proportionnelle à l'efficacité du drainage. Le centre des plateaux les plus étendus et les légères dépressions de ces plateaux sont les zones les plus affectées.

1.2.3. *Découvert*: on verra plus loin, au chapitre XV, l'importance du découvert qui augmente la quantité d'eau entrant dans le sol et dégrade la structure. Voir aussi ch. IX, 4.1.

1.2.4. *Climat*: certes, le climat dans son ensemble ne change guère; néanmoins, les fluctuations de pluie et de température (particulièrement celles de la saison de repos de la végétation et de défoliation) peuvent jouer un rôle sur les poussées de marmorisation ou de démarmorisation. Il reste entendu que c'est directement sur la végétation plutôt que sur le sol qu'agissent les épaisissements de la nappe (due aux facteurs climatiques) lors des périodes de plus fortes croissances des racines.

2. NOTION DE « SOLS HERITES »:

Nous avons vu au chapitre XI que l'action du climat et de la végétation récente ou contemporaine ne s'est pas exercée sur un matériau vierge (roche désagrégée), mais bien au contraire, sur un matériel déjà fortement perturbé par de multiples actions phytoclimatiques antérieures. On peut donc dire qu'il s'agit d'un « sol hérité » et l'évolution actuelle se fait forcément à partir de ce matériau très hétérogène. Par exemple, les mouvements de faible amplitude du fer et du manganèse se font à partir de concrétions déjà préexistantes; de même les minéraux argileux divers varient

avec les horizons par suite des vicissitudes anciennes et cela se répercute sur la chimie des micro-horizons superposés. Cette notion trop négligée nous paraît capitale; certaines insuffisances physico-chimiques s'expliquent pas lessivage latéral ancien.

La consolidation ancienne profonde (et peut-être même une véritable cimentation) empêchent les racines d'exercer leur action fousseuse, ou la ralentissent de façon considérable et catastrophique, car elles diminuent les ressources en eau au niveau des coiffes actives de ces racines.

3. ÉVOLUTION ACTUELLE

DES DIVERS SOLS (marmorisation tachetée):

Nous sommes amené à considérer au moins deux cas nettement différents:

3.1. AVEC ENGORGEMENT PÉRIODIQUE PAR L'EAU:

3.1.1. *Sols sous forêt*: il conviendrait de distinguer les états boisés plus ou moins serrés; mais, pour simplifier, nous ne considérerons qu'une seule catégorie: la couche supérieure est ocre clair ou beige assez bien structurée, la couche moyenne est marmorisée avec des marbrures plus ou moins contrastées.

Que se passe-t-il dans l'enceinte de la nappe perchée? On sait qu'un milieu aqueux est plus favorable qu'un milieu aérien aux évolutions physico-chimiques. Pendant les périodes d'engorgement, il reste quelques lacunes avec un peu d'air. A chaque pluie, l'eau acide apporte de minimes quantités de fer et manganèse dans des complexes résultant de l'attaque des silico-aluminates. Et partout, ceux qui se trouvent dans l'enceinte (dépôts antérieurs, concrétions) sont attaqués, ou au moins redissous; ils sont plus ou moins remis en mouvement (légers mouvements verticaux et latéraux de la masse liquide dans les interstices; mouvements de diffusion dans la masse liquide elle-même).

Lorsque les pluies s'arrêtent pendant une phase sèche, l'évaporation prédomine, la surface supérieure de la nappe baisse, en même temps que baisse le taux d'humidité de la couche immédiatement supérieure. Les parois des petites lacunes qui ont subsisté se trouvent ainsi dans des conditions plus oxygénées puisque l'air venant d'en haut remplace les solutions du sol, et moins acides puisque l'acide reste liés aux solutions: des précipitations ocre se font sur ces parois. En particulier aux environs des extrémités des radicales où il y avait accumulation d'ions H^+ fourni par la plante; la dissolution a été plus énergique, le contraste est plus marqué, la précipitation est plus forte, elle peut revêtir la forme de petites

concrétions. D'ailleurs une concrétion antérieure ferro-manganique constitue un lieu privilégié: elle s'accroît par nouvelle précipitation (autauxie).

Si les phénomènes dus à la dessiccation l'emportent, les marbrures sont nombreuses, les parties ocre sont fortement dessinées (surtout si l'eau est très acidifiée lors de son passage dans la litière), des concrétions naissent. C'est le cas des sous-sols à granulométrie plus grossière, de ceux situés sous hêtres (qui pompent fortement) surtout, probablement, si la hêtraie succède à d'anciennes bruyères acidifiantes.

Si au contraire, la nappe se reproduit fréquemment et longuement, les phénomènes de réduction, de diffusion, de déferrisation l'emportent; il y a peu de parties ocre, peu de concrétions, la teinte grisâtre domine; parfois même, si l'action de l'eau est plus durable, elle devient très légèrement bleutée et le pseudogley tend vers le vrai gley.

Parfois, d'ailleurs, il y a une couche dans son ensemble plus décolorée que les autres, c'est celle qui est la plus longtemps délavée.

On peut ainsi considérer le « marmorisation » comme une « micropodzolisation » et une « endopodzolisation » où les transports s'effectuent dans toutes les directions suivant des distances variant du millimètre à quelques centimètres: c'est une podzolisation à l'intérieur d'un horizon (celui affecté par la nappe perchée) une « micropodzolisation ».

3.1.2. Sols de vides: il s'agit de sols fortement hydromorphes « pratogènes » qui relèvent de deux types:

a) ceux de cuvettes, c'est-à-dire de légères dépressions. Depuis très longtemps l'eau tend à s'accumuler, en général sur plusieurs hectares.

b) de vides artificiels où la quantité d'eau qui entre dans le sol est plus grande; l'évolution présente deux caractères assez nets: d'une part il naît une couche humifère tourbiforme noirâtre due à la mauvaise aération, de 5 à 15 cm. Elle est due à la mauvaise décomposition, en conditions anaérobies des feuilles de la molinie. D'autre part, le délavage est très accentué, d'où une forte décoloration; la marmorisation inférieure est très contrastée, en même temps que cet horizon est très tassé. La nappe d'eau vient, en effet, pendant un grand nombre de jours par an jusqu'à 20 ou 25 cm de la surface ou même moins, exerçant ses ravages sur la microflore, sur les racines et sur la structure. Soit qu'il s'agisse d'un phénomène ancien en rapport avec la position de la zone considérée, soit qu'il s'agisse d'une conséquence de cette stagnation récente

mais périodique et répétée de la nappe perchée. Le sous-sol profond, déjà altéré par les actions paléopédologiques, semble se détériorer encore plus à notre époque. Il semble, en effet, plus dur.

En résumé, *la marmorisation tachetée correspond à un ensemble de phénomènes étroitement liés les uns aux autres: destruction de la structure par l'eau, compaction, stagnation de l'eau sur le plancher imperméable dans la couche moyenne, asphyxie, acidification, perte de bases, destruction des argiles, donc diminution du taux d'argile et abaissement du complexe absorbant, appauvrissement en éléments nutritifs, destruction de la structure par suite de la diminution des colloïdes minéraux et des bases, micromigrations, microprécipitations.* La modification de couleurs (décolorations et surcolorations), ainsi que l'accentuation de l'hétérogénéité ne sont que des *conséquences* des micromigrations; il y a aussi léger entraînement de certaines substances (Fe, Mn) dans le sous-sol (plancher).

a) ou bien il y a engorgements périodiques, mais de longue durée, les phénomènes réducteurs l'emportent, l'horizon se décolore de plus en plus, les fractions grises tendent à dominer; il y a tendance à formation de vrai gley.

b) ou bien les phases sèches l'emportent: dans l'horizon considéré les teintes rougeâtres et brunâtres s'accroissent; l'aspect de « nougat » s'affirme.

On notera que *les faciès les plus marmorisés sont ceux des sols les plus anciens, c'est-à-dire, en particulier, les plus élevés en altitude* soit parce que plus anciennement émergés, soit parce que moins tronqués par l'érosion (la pente au sommet de chaque langue est plus faible que sur les bords, en tout cas depuis plus longtemps exposés à la « météorisation » et à l'acidification.

3.2. AVEC SUPPRESSION DES ENGORGEMENTS: les effets inverses se produisent, c'est-à-dire que la marmorisation tend à s'atténuer. Il convient, toutefois, de distinguer deux cas:

3.2.1. (Cas purement théorique). Aucun agent vivant n'intervient: le sol reste identique à lui-même; nous avons pu le constater avec des échantillons placés dans des bocaux au laboratoire (sol brut).

3.2.2. Avec intervention de racines et petits animaux; le sol tend à prendre une teinte moyenne ocre généralisée; les contrastes s'atténuent; ceci résulte vraisemblablement des brassages, de l'humidité.

fication plus forte, d'une meilleure circulation de l'eau qui en résulte (à l'échelle microscopique).

Aspects des marmorisations tachetées: fonction de l'action des eaux pluviales stagnantes locales

	Prédominance des phases sèches	Conditions intermédiaires	Prédominance des phases humides
Actions hydriques faibles (oscillations lentes)	Ocre clair ou beige avec traînées plus claires	Intermédiaires plus ou moins marbrés	Beige avec traînées rouille
Actions hydriques fortes (oscillations brutales; sol plus poreux, humus plus acide...)	Marbrures contrastées avec concrétions dures noires		Blanc-gris avec taches rouille et concrétions

4. EVOLUTION ACTUELLE DU SOUS-SOL MARMORISE RETICULE:

4.1. AVEC ENGORGEMENT PÉRIODIQUE: cette évolution est extrêmement lente, donc faible. On peut considérer ces sous-sols comme « plus que mûrs », séniles, quasi-morts. Nous avons l'impression que les fentes grises tendent à s'accroître au détriment de la masse ocre indurée qui l'entoure. *Chaque fente provoque une invagination de la nappe perchée* (fig. 12). Cette eau acide attaque les parois et les ameublît.

D'une part, cette ouverture facilite la pénétration des racines dans le sous-sol et celui-ci s'enrichit en humus. La fente s'allonge vers le bas; la traînée grise qui l'accompagne s'allonge et s'élargit. Il semble qu'il y ait une pseudogleyification descendante d'origine ancienne et d'extension actuelle excessivement lente.

D'autre part, il y a faible descente des argiles et limons des couches supérieures. Il est possible que le bilan de ces actions soit positif au point de vue de la végétation; nous ne pouvons l'affirmer. Cette attaque du sous-sol est, en tout cas, peu forte et elle est limitée aux bords des fentes.

Notons aussi, en passant, que les fines petites racines très ramifiées qui s'installent dans les fentes, si elles jouent un rôle notable dans l'évolution du sous-sol marmorisé réticulé, n'en jouent pratiquement aucun dans la nutrition des arbres dont elles proviennent, tant elles sont fines et situées dans un matériau infertile.

4.2. AVEC SUPPRESSION DES ENGORGEMENTS: nous n'avons pas eu l'occasion d'observer ce qui se passerait, mais il est probable que le processus serait le même que pour les marmorisations tachetées, c'est-à-dire que s'il y avait humectation normale (sans engorgement) et dessiccation normale, humification, brassage par les petits animaux, il y aurait disparition des contrastes entre les fentes et le matériel qui les enrobent. En fait, si le sol est travaillé, donc aéré et fumé, il y a *démarmorisation*.

5. IRREGULARITES D'EVOLUTION :

On peut tenter d'expliquer certaines irrégularités apparentes de répartition des marmorisations (fig. 16).

1° La surface des cailloutis est probablement accidentée, soit par les inégalités de sédimentation, soit par suite de creusements anciens; ces cailloutis recèlent des lentilles d'argile qui arrêtent l'eau et accentuent localement l'hydromorphie.

2° Le niveau compactifié est lui-même bosselé par suite des conditions de drainage ancien et actuel en fonction de diverses causes.

3° Les îlots de bonne végétation ancienne et actuelle ont créé des entonnoirs à végétation meilleure, tandis que sur les parties à sol moins profond subsistaient des îlots de mauvaise végétation qui ont maintenu le sol dans son état médiocre.

IRRÉGULARITÉS DU SOL ET DE LA NAPPE

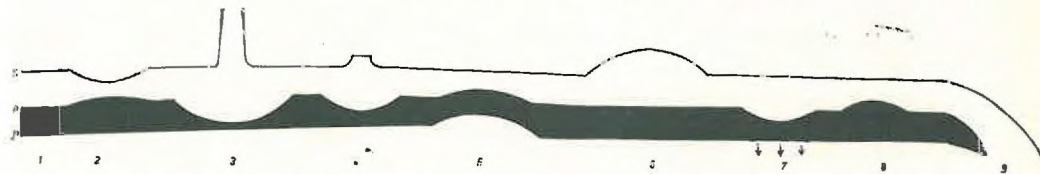


FIG. 16.

S : surface — p : plafond — P : plancher

- 1 Epaisseurs normales de terre meuble et de la nappe perchée intermittente.
- 2 Petite cuvette (à laquelle correspond généralement une bosse du plafond de la nappe).
- 3 Entonnoir dû à un arbre (actions conjuguées de l'enracinement et du couvert) ou à un bouquet d'arbres.
- 4 Entonnoir dû à une souche ou à une ancienne souche disparue.
- 5 Bosse du plancher imperméable.
- 6 Bosse externe (ancien chablis, ou accumulation éolienne au pied d'un bouquet d'arbres).
- 7 Dépression du plafond due à un sous-sol localement moins imperméable.
- 8 Surépaisseur de la nappe due à un sous-sol localement moins imperméable.
- 9 Pente forte et disparition du plancher.

L'épaisseur de terre utile résulte des niveaux respectifs de la surface externe (s) et du plafond (p).

4° Même le limon supérieur présente des accidents :

- a) l'érosion a rapproché le niveau compact de la surface en certains endroits longtemps déboisés ;
- b) des dépôts éoliens anciens, localisés, de poussières (par exemple au pied d'un bouquet d'arbres) ont vraisemblablement créé des buttes en faible surélévation (10 à 30 cm).

Il en résulte, en particulier :

- a) que l'intensité de l'hydromorphie varie d'un point à un autre,
- b) que l'épaisseur de terre disponible pour les racines est extrêmement variable d'un point à un autre, sans qu'on en connaisse la raison exacte ; et ceci est lourd de conséquences lors des repeuplements, du fait même que l'épaisseur utile a justement, fort souvent, une valeur critique pour les arbres. (Voir fig. 16, 18, 19).

6. DEGRADATION DES SOLS :

Le mot « dégradation » en matière pédologique prête en réalité à équivoque : veut-on parler des phénomènes qui ont altéré la roche-mère suivant un certain processus normal et qui constituent en somme la genèse même du sol examiné (lehmification, marmorisation naturelle primitive...)?

Les changements de bariolage ne coïncident pas toujours avec les différences de dureté (d'ailleurs peu faciles à déceler, même en frappant sur les parois avec un objet de métal). L'eau imprègne aussi bien le sous-sol qu'une certaine fraction du sol plus ou moins épaisse.

Destruction lente des ciments des parties indurées ocre, micro-migration, affaissement des structures des microzones qui avaient été restructurées par une racine, ou un animalcule ou des bactéries.... tout cela est simultané. Tout cela se produit à chaque retour de l'eau dans l'enceinte engorgée entre plancher et plafond, et les phénomènes les plus apparents se produisent dans les zones où il y a un embryon de structuration.

Par le mot « dégradation », veut-on exprimer la dégénérescence qui a fait anormalement évoluer le sol dans un sens distinct, mais de façon durable, inscrit dans le profil textural, par suite de changements climatiques ou de traitements forestiers (*tout traitement forestier est d'ailleurs anormal, par rapport à l'état normal qui est la forêt vierge*).

Ou bien veut-on exprimer les défauts supplémentaires qui affectent le sol du type considéré par suite des *mauvais* traitements subis (défauts éphémères) ; ces défauts, surtout structuraux, diminuent la productivité au-dessous du niveau optimum réalisable avec le type de sol donné, dans des conditions de végétation et de couvert normaux, mais ils sont partiellement réparables.

Il n'en reste pas moins vrai que l'état second est moins satisfaisant que l'état premier; l'horizon est malade; il y a contamination vers le haut.

Autrement dit, *la frontière entre le sol mort et le sol vivant a plutôt tendance à remonter au cours des temps si les chutes de pluie au sol augmentent et si la végétation n'oppose pas son action freinatrice et régénérante de structure, c'est-à-dire si le sol est découvert.*

Ainsi donc l'état « dégradé » d'un sol n'est pas aisé à définir de façon simple. Dans le cas des sols de la forêt de Chaux, on peut considérer qu'il y a eu localement *aggravation de défauts initiaux*, ou acquisition de défauts nouveaux, par :

1° remontée de la compacification de la couche inférieure, par suite du lessivage de l'argile et par affaissement de la structure.

2° apparition de colorations bigarrées dans la couche moyenne (celle utile aux racines).

3° appauvrissement chimique par exportations répétées de litière et de petits bois.

4° intoxication de tout le profil par les composés dérivés du tanin.

5° dislocation des argiles, écartement des feuillets, libération d'aluminium (?), remplacement des cations minéraux par des ions H^+ .

6° appauvrissement en cations par lessivage latéral.

Tous ces phénomènes sont en partie naturels sous l'effet de l'eau chargée de CO_2 et acides humiques (compte tenu de la topographie et de la végétation normale sous le climat local), en partie accrus par les errements suivis en matière de traitement forestier.

On notera que la naissance d'une nappe aquifère perchée (mince et rare) est normale dans nos sols de forêt de Chaux. En fait, elle est beaucoup plus épaisse et plus fréquente par suite de l'action de l'homme.

Il faudrait supputer dans quelle mesure l'homme est responsable de l'état déficient des sols actuels. S'il avait conservé un état du couvert comparable à l'état primitif, la production annuelle serait au moins deux fois plus forte; il n'y aurait que quelques zones un peu plus claires et enherbées, moins productives, dans le peuplement forestier.

En résumé, *il y a eu, par suite du traitement passé, une remontée des marbrures et du tassement à partir d'un plancher imperméable profond qui était la cause initiale de la dégradation.*

7. RESUME DES CARACTERES GENERAUX DE LA MARMORISATION :

1° Elle est due à l'eau stagnante intermittente (sous-sol imperméable).

2° Elle crée une microendopodzolisation, c'est-à-dire une destruction des argiles (qui deviennent plus fines, qui migrent, qui perdent leur pouvoir de rétention) et aussi un remaniement du fer et du manganèse sur place.

3° Elle s'accompagne d'un lessivage latéral, de sorte qu'on a un immense horizon A sous le plateau et un immense horizon B périphérique sous les pentes bordant le plateau (fig. 14).

4° Le faciès marmorisé recouvre aussi bien des horizons illuviaux que des horizons éluviaux (il n'y a aucune différence de texture au-dessus et en dessous de la limite des marbrures), mais il affecte principalement ces derniers ; ce délavage est tout différent d'un lessivage vertical ; il agit comme un « masque », les apparences dues à l'hydromorphie devenant dominantes dans la physionomie du sol.

5° La marmorisation s'apparente à la podzolisation, mais elle en est nettement différente : il n'y a pas de fractions cendreuses.

6° La marmorisation a probablement commencé sous des climats différents qui lui ont donné par endroits des aspects spéciaux ; elle se continue actuellement sous la forme tachetée floue.

7° Certaines marmorisations, celles qui sont maculiformes floues, n'ont pas un caractère irréversible et définitif comme c'est le cas de certains phénomènes pédologiques ; elles peuvent s'effacer si le régime hydrique devient différent.

8° De lui-même, le phénomène tend à s'accroître. On assiste, lorsque les conditions restent favorables (c'est-à-dire défavorables à la végétation forestière), à une remontée progressive des marbrures. Ceci tout au moins jusqu'à un certain plafond qui est fonction de l'intensité de l'évapotranspiration au lieu considéré.

Bibliographie : DAUBRÉE (d.d.), DROSDOFF... 1939, FRANC DE FERRIÈRE (d.d.), JOFFE 1935, KRAUSS... 1939, MAIGNIEN (d.d.), MILLOT... 1957, WINTERS (d.d.), ZAKOSEK (d.d.).

CHAPITRE XIII

COMPARAISONS

1. COMPARAISONS AVEC D'AUTRES SOLS DE LA MEME FORET (Voir tableau page suivante):

1.1. SOLS DE POSITIONS TOPOGRAPHIQUES DIFFÉRENTES: nous pouvons considérer un sol de pente I 13 (1^{er} chiffre) et un sol de plateau II 14 (2^e chiffre, en italique).

Le sol de pente est plus riche en sable grossier, en sesquioxydes, en chaux échangeable. Toutes les autres caractéristiques sont très voisines. Mais il n'y a jamais de niveau d'eau et la molinie n'y pousse pas.

En ce qui concerne l'origine des sols de pente, on peut émettre diverses hypothèses:

1° Ce serait l'affleurement d'une couche alluviale *inférieure* à celle des couches marmorisées supérieures; elle ne serait pas altérée parce qu'elle aurait été exposée depuis beaucoup moins longtemps aux injures atmosphériques.

2° Leur origine serait la même que le limon supérieur; ils auraient été déposés après l'entaille de l'érosion, mais n'auraient pas subi l'action marmorisante par suite de leur jeune âge et de la position en pente.

3° Ce serait un ancien sol de plateau primitif marmorisé, puis arraché sur les bords, descendu par ruissellement, ayant recouvert le substratum caillouteux, de ce fait démarmorisé: sans pouvoir être catégorique, nous penchons vers la première hypothèse, confirmée par l'étude des minéraux argileux.

Horizons	0 cm	25-30 cm	80-85 cm
Sol de pente	0 cm	20 cm	
Sol de plateau (marmorisé)			
—	—	—	—
Sable grossier	8.9 2.1	6.9 1.5	6.6 1.4
Sable fin	30.2 39.7	33.0 36.8	32.6 37.2
Limon	37.2 40.4	39.0 41.8	39.0 35.3
Argile	16.5 13.8	16.2 15.5	17.0 30.8
Perte au feu	4.8 6.0	2.6 2.8	2.5 1.8
Humidité	1.7 1.4	1.5 1.0	1.5 3.0
Sesquioxydes	0.7 0.6	1.5 0.6	1.5 0.5
pH	5.2 6.2	5.1 6.3	5.1 6.2
N ‰	1.65 1.90	1.00 0.95	0.95 0.35
P ₂ O ₅ ass. ‰	0.07 0.12	0.04 0.06	0.05 0.02
K ₂ O ass. ‰	0.12 0.07	0.04 0.05	0.03 0.05
K ₂ O éch. ‰	0.12 0.07	0.04 0.04	0.04 0.06
CaO éch. ‰	0.40 0.36	0.18 0.11	0.28 0.58

1.2. SOLS SOUS VÉGÉTATION DIFFÉRENTE :

1.2.1. *Hêtraie et moliniaie:*

a) Nous avons comparé des sols de hêtraie et des sols de moliniaie.

	Hêtraie	Moliniaie
Constituants inférieurs à 16 microns	50.7 %	51 %*
Limite de plasticité	24.2 %	26.4 %*
Indice de plasticité	8.2 %	10.2 %*
C/N surface	14.0 %	13.7 %
profondeur	11.0 %	9.1 %
pH surface	4.8 %	4.7 %
profondeur	5.2 %	5.2 %

* Moyenne de 4 chiffres.

La similitude est remarquable, elle ne saurait être fortuite: il est évident que ce ne sont pas 2 matériaux différents.

1° Le sol de vide reçoit dans le même temps 2 fois plus d'eau. Il présente une nappe perchée pendant une durée double. Son sous-sol est saturé pendant beaucoup plus longtemps. Il subit donc un tassement séculaire plus grand et il est davantage marmorisé dans sa couche moyenne. Autrement dit, *il vieillit 2 à 4 fois plus vite.*

2° Il subit l'action de la molinie qui se décompose mal sur sol saturé d'eau: son humus noircit la couche supérieure des 20 premiers centimètres; elle lui donne une porosité élevée, mais peu stable, donc une perméabilité relativement faible; elle agit peut-être par d'autres processus défavorables tant qu'elle est présente (et même quelque temps après).

b) Comparaison d'une moliniaie et de la hêtraie voisine (Chaux 751, Fourg 2).

Horizons	pH	C %	N %	Mat. org.	C/N	Ca m.e. %	K m.e. %	Mg m.e. %	P ₂ O ₅ ‰
Fourg - Surf.	4.7	4.79	0.35	8.2	13.7	1.17	0.27	0.10	0.02
- 12 cm	4.9	2.34	0.18	4.0	13.0	0.14	0.07	0.06	0.01
- 20 cm	5.1	2.12	0.17	3.6	12.5	0.14	0.07	0.04	traces
- 40 cm	5.2	0.64	0.07	1.1	9.1	0.14	0.05	0.04	traces
CHAUX - Surf.	4.8	5.90	0.42	10.1	14.00	3.20	0.34	0.12	0.02
- 12 cm	5.0	1.72	0.14	2.9	12.3	0.17	0.10	0.05	0.02
- 20 cm	5.1	0.71	0.06	1.2	11.8	0.14	0.05	0.04	0.01
- 40 cm	5.2	0.55	0.03	2.9	11.0	0.14	0.05	0.05	0.01

De part et d'autre de la sommière de la Réserve se trouvent, à l'Ouest en forêt communale de Fourg, un taillis-sous-futaie avec des trouées à molinie dont une a été spécialement étudiée, et à l'Est en forêt domaniale de Chaux (P. 761) un beau perchis de hêtre de 50 ans provenant de conversion: le peuplement est complet, et il est de fort belle venue. Il était donc intéressant de rechercher si la différence frappante de végétation et de production avait des causes profondes et nécessaires, ou s'il s'agissait d'un accident.

Notons seulement que, d'après ce que nous savons de l'histoire de l'évolution des peuplements, il y a de grandes chances pour qu'avant 1827 le peuplement Ouest ait été semblable à celui situé à l'Est sur le même plateau, taillis-sous-futaie de chêne dégradé envahi par la molinie. C'est donc l'effet de l'invasion de hêtre que nous pouvons espérer saisir.

Précisons qu'il s'agit d'un perchis né de semis, après vieillissement du taillis-sous-futaie, sans découvert total (seulement quelques minimes éclaircies) de 1830 à 1890. Le couvert s'était refermé depuis 1850. Il ne fut interrompu (non complètement d'ailleurs) que pendant la durée de la régénération pendant une trentaine d'années après 1890.

Les deux fosses sont distantes de 40 m. Les 2 sols présentent de fortes marbrures à partir de 35 cm. La principale différence visible est la teinte gris-noirâtre en surface dans l'échantillon de Fourg. Une autre différence constatée est la dureté plus grande du sous-sol sans molinie. Ce peuvent être des caractères acquis:

A. — Ressemblances

1° *Propriétés physiques*: l'analyse mécanique a montré une remarquable similitude (aux niveaux comparables).

2° *Propriétés chimiques*: l'analyse chimique donne en profondeur des valeurs peu différentes de C et N, de C/N 9,1 à 40 cm dans la moliniaie contre 11 dans la hêtraie; le Ca dosé a été de 14 m.e. pour 100 gr dans les 2 cas, le K de 0,05 m.e., le Mg de 0,04 et 0,03.

Les pH sont analogues, 4,8 et 4,7 en surface, 5,2 en profondeur.

B. — Différences

1° *Propriétés physiques*:

a) Différence de taux d'humidité. Nous avons le même jour (27 avril 1960) mesuré les taux d'humidité:

	Futaie de hêtre	Moliniaie
Surface	38.8 %	50.8 (en % de terre sèche)
15 cm	34.3 %	44.5
50 cm	31.7 %	32.5

En profondeur, la différence est nulle, mais les couches supérieures du sol de moliniaie sont beaucoup plus humides, ce qui est dû à l'entrée d'eau plus grande et à l'évapotranspiration plus faible. En surface, l'humidité équivalente (pF 3) est obtenue pour un taux d'humidité plus bas sous hêtraie (26 % au lieu de 36 %) : ces conditions sont plus favorables aux végétaux.

b) Différence de niveau de nappe perchée. Elle a été plus élevée dans la moliniaie de 10 à 30 cm; elle était de $50 - 42 = 8$ cm le 2 juin 1963, ce qui montre que l'interception et le couvert agissent dans le cas de la hêtraie pour réduire l'alimentation de la nappe, donc l'asphyxie du sol.

c) Le volume des pores est plus élevé dans la moliniaie de 8 %, mais si l'on en déduit le volume d'eau retenue à pF 3 la différence n'est plus que de 3 % ; le pouvoir réducteur de la matière organique de molinie est moins actif que celui du hêtre.

d) La surface spécifique est quelque peu différente (1/3 en plus sous moliniaie).

2° Propriétés chimiques:

a) La matière organique est plus abondante sous la moliniaie (4 %) que sous la hêtraie (2,9 % en surface). D'où les différences en perte au feu et en humus.

b) Les teneurs en carbone sont beaucoup plus fortes sous la moliniaie que sous la hêtraie: en surface, 2,34 % contre 1,72 %, celle en N sont 0,18 % et 0,14 % ; les C/N sont, il est vrai, peu différents, 13 et 12,3.

c) La teneur en milliéquivalents K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Mn , et la capacité d'échange CEC, sont un peu plus grandes en surface dans la moliniaie ; les capacités d'échange en cations K, Na, Ca, Mg sont nettement plus faibles dans la moliniaie: la surface du sol de la hêtraie s'est déjà nettement enrichie par l'apport des feuilles (qui avaient tiré des racines profondes d'arbres leur richesse minérale).

En particulier, la teneur en Ca en surface est de 3,2 m.e. % sous hêtraie contre 1,17 m.e. % sous moliniaie. Les horizons de surface sont nettement différents, mais *les horizons profonds sont très voisins pour presque toutes les caractéristiques.*

On note toutefois que le sous-sol de Fourg est 1,5 fois plus riche en SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3 (les rapports restant les mêmes). Ce fait est peut-être en rapport avec la plus grande dureté appréciée à la tarière.

Il est clair que ces deux états chimiques sont dus à l'histoire végétale du peuplement (histoire récente dans le cas de la hêtraie),

Il s'agit d'une transformation des horizons supérieurs par la végétation récente. Pratiquement, il y a de grandes chances pour que le sol de la hêtraie soit le même que celui de la moliniaie, mais amélioré par 130 ans de couvert continu, dont 50 ans de hêtraie.

Si cette hypothèse est exacte, on peut avoir bon espoir en ce qui concerne la restauration naturelle des sols de la forêt de Chaux.

Quant à l'étude microbiologique, elle a été faite par M. POCHON et Mlle de BARJAC en 1958. La microflore totale n'a pas été augmentée sous la hêtraie. Cette étude microbiologique a donné plutôt des résultats négatifs, peut-être justement parce que les différences ne sont qu'accidentelles et récentes.

En résumé, sur un même matériau originel, l'évolution préhistorique et historique a été semblable. Mais après 100 ans de régime plus protecteur, des signes sont déjà nettement perceptibles. Ils sont tous en faveur de la hêtraie. Seule la porosité plus forte pourrait paraître un avantage pour le sol de moliniaie. Mais il est contrecarré par d'autres inconvénients.

1.2.2. *Taillis et moliniaie*: nous avons étudié 2 placeaux situés sur le même plateau de part et d'autre d'une même sommière en XVI^e série, à 15 m de distance: l'un est un taillis de 25 ans de charme et tremble en bon état, l'autre une trouée à molinie sans arbres.

	Taillis	Trouée à molinie	
	—	—	
pH surface ...	4.4	4.7	
Ca en m.e % ..	0.9	1.3	Ces résultats
C %/100	39.4	43.0	ne permettent pas
N %/100	1.95	2.20	de tirer
C/N %	20.2	19.5	de conclusions.

Niveaux d'eau: les niveaux d'eau ont été mesurés dans 4 trous pour chaque placette, le 17 novembre 1958; sous taillis, moyenne 21 cm; sous moliniaie, moyenne 6 cm; différence 14 cm; puis le 20 février 1959: moyenne sous taillis 27 cm; sous moliniaie 5,7 cm; différence 21,3 cm; puis le 11 mars 1959: moyenne sous taillis 18 cm; sous moliniaie 5,7 cm. Du 23 avril 1960 au 2 juin 1960, il y a une différence moyenne de 15 cm environ (10 à 32 cm suivant les jours), ceux sous taillis étant, naturellement, toujours plus

bas. Après les pluies qui ont précédé le 22 septembre, il y a une remontée brusque jusqu'à 15 cm sous moliniaie; elle ne se produit pas sous le taillis.

Taux d'humidité		Taillis	Moliniaie
le 30 avril 1960, le lendemain d'une pluie	Surface	65.7 %	67.1 %
	15 cm	42.4 %	44.4 %
	40 cm	34.4 %	36.9 %

On voit qu'il y a un peu plus d'humidité dans le sol de moliniaie, mais la différence est faible; si l'on compare aux chiffres donnés le 27 avril 1960 pour le couple futaie de hêtre/moliniaie (voir 1.2.1), on voit que l'action du taillis est beaucoup plus faible que celle de la futaie.

		Total	Air
Porosité:	Sous taillis	68 %	11 %
	Sous moliniaie	67 %	1 %

Interprétation: les deux matériaux formant les sols sont les mêmes; le hasard (ou plus exactement les accidents de traitement) a fait que d'un côté le taillis a été conservé, de l'autre, il a disparu et laissé la place à la molinie; il en est résulté une dégradation de la structure, d'où un mauvais comportement hydrique; à la longue, si toutefois est conservée la différence de végétation, une détérioration plus durable peut s'ensuivre. Cette constatation négative n'est pas sans intérêt.

1.2.3. *Bon vide et mauvais vide:* nous avons essayé de comparer un sol où la molinie nous a paru d'installation récente (I 14) (molinie assez claire) avec un autre où elle est installée depuis plus longtemps (molinie plus dense, plus haute, en touradons) qui est noir en surface (II 14). Les propriétés physiques sont peu différentes. Les propriétés chimiques sont quelque peu différentes en ‰ :

	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
« Bon vide » I 14	0.018	0.019	0.014
« Mauvais vide » II 14	0.036	0.012	0.016

Les différences de teneur en CaO, K₂O, P₂O₅ sont faibles; toutes les teneurs en CaO et P₂O₅ des horizons profonds semblent un peu plus grandes dans le « bon vide ». Ainsi donc:

1° les différences sont peu marquées; *c'est une raison d'espérer une restauration.*

2° *une légère différence initiale en profondeur peut être une des causes de l'envahissement plus ancien de la molinie.*

3° *l'humus de molinie semble être par lui-même une cause de mauvais résultats forestiers dans les vieux vides.*

1.2.4. *Sols sous jeunes Chênes Rouges d'Amérique de croissance très inégale:* Comparaison des 5 chênes rouges de la parcelle 1317: nous avons, en 1958, repéré 5 chênes rouges d'Amérique plantés en 1949, sujets provenant certainement de la même pépinière et de graines du même lot. Or, situés sur le même plateau à sous-sol marbré (P. 1316, 1317) dans le même environnement général, sous le même climat local, à moins de 150 m l'un de l'autre, ces 5 chênes présentaient déjà en 1958 des différences énormes.

Ces différences systématiques de croissance annuelle se sont accumulées depuis cette époque; elles sont ainsi devenues spectaculaires.

Végétation environnante:

Chêne n° 0: ronces, coudrier

Chêne n° 1: tremble et bouleau

Chêne n° 2: idem

Chêne n° 3: tremble, un peu de molinie

Chêne n° 4: idem

(sujet planté sur déblais de fossés mais qui ne semble pas avoir bénéficié du drainage).

Voir la page suivante.

Caractéristiques du sol (haut du tableau) et des chênes (bas du tableau) classés dans l'ordre 0, 1, 2, 3, 4 de hauteurs décroissantes.

Interprétation: on est frappé par les analogies physiques des diverses analyses de sols. Toutefois les n° 1 et 2 semblent peu affectés par le plan d'eau, au contraire de 3 et 4. Quant aux propriétés chimiques, elles sont à peu près décroissantes dans l'ordre 1, 2, 3, 4, surtout en ce qui concerne le N et le Ca. Le n° 0, bien que portant le plus beau plant, ne semble pas être sur le sol chimiquement le meilleur: celui-ci serait plutôt le sol n° 1.

Les analyses de feuilles n'ont pas donné de résultats probants.

L'étude de ces 5 chênes n'est pas terminée. *Il reste difficile d'expliquer les différences énormes de croissance et allure qui ont été constatées.*

Partout on peut faire la même constatation: il est clair que, jusqu'à une certaine profondeur de la surface sur laquelle agissent les agents atmosphériques, il y a démararmorisation lorsqu'il y a longue exposition à l'air.

1.4.2. Sol assaini:

a) les parois des fossés montrent souvent un aspect plus poreux. Les peuplements de chêne crus sur des sols assainis il y a 100 ans (en VIII^e série par exemple) donnent l'impression d'être de meilleure qualité (meilleure élongation des fûts et tares moins nombreuses); mais il faut être prudent, car nous n'avons pas de bouquets témoins sur sol non assaini rigoureusement comparable.

1.4.3. Déjections de lombrics: exemple de mesures:

	Surface spécifique m ²	Humus %	N %	CaO %	K ₂ O ‰	P ₂ O ₅ ‰
Sol ordinaire témoin	26	1.39	0.053	0.018	0.019	0.014
Déjections de lombrics ..	40	8.33	0.274	0.314	0.016	0.073

D'autres mesures ont donné des résultats dans le même sens.

Après passage dans le tube digestif d'un lombric, la surface spécifique est presque doublée; la teneur en humus 7 fois plus forte, celle en azote 7 fois plus élevée, celle en calcium 30 fois plus forte; celle en P₂O₅ 5 fois plus grande. Seule la teneur en K₂O est la même. Ce sont donc justement les éléments faisant défaut dans le sol ordinaire qui se sont accrus. Cet enrichissement en N, Ca et P explique bien les belles réussites de nos cultures en pot sur déjections de lombrics.

Notons que les sols ainsi formés sont mieux drainés, qu'ils sont toutefois comparables aux sols ordinaires, en ce qui concerne Mg, Al, Fe, Si, K, et plus pauvres en manganèse.

En définitive, on voit l'importance de l'action des lombrics qui enrichissent le niveau des racines, des deux éléments P et Ca qui, justement, font le plus défaut aux végétaux.

1.4.4. Terre de fourmilière:

	Surface spécifique	Humus	N %	CaO %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %
Sol ordinaire	26	1.39	0.053	0.018	0.019	0.014
Terre de fourmilière	40	1.88	0.234	0.207	0.016	0.051

Ces terres sont probablement formées du mélange de terre de surface et de profondeur avec des débris organiques. La densité apparente et la surface spécifique sont intermédiaires entre leur valeur en surface et leur valeur à 40 cm. La richesse en azote est 3 fois plus forte qu'en surface; la teneur en K_2O analogue à celle du sol ordinaire; celle du P_2O_5 , 4 fois plus grande. Ces sols sont donc fortement améliorés, mais moins que par les lombrics.

2. COMPARAISON AVEC D'AUTRES REGIONS :

2.1. EN FRANCE: en forêt d'Arne, ils sont réduits à de petits îlots (le drainage général est meilleur). Entre Loue et Orain, ils sont analogues à ceux de Chaux, mais leur qualité diminue de l'Est (voisinage de la côte calcaire) à l'Ouest (Rahon).

Dans toute la vallée de la Saône, nous avons retrouvé des sols analogues sur les sommets des langues résiduelles subhorizontales.

Lorsque le sous-sol est plus riche, ils sont un peu meilleurs par suite des remaniements dus aux ruissellements, et par suite des remontées dues aux circuits racines-branches-feuilles ou aux basculements de chablis.

Dans d'autres régions, il y a des études concordantes de: DEJOU (Nivernais), JOUIS (Seine-Inférieure), GURTIAN (Bretagne), Mme PÉRIGAUD (Brenne), RIEDEL (Brie), FRANC DE FERRIÈRE (Alsace), BONNEAU, MENGAUD, LIWERANT (boulbènes).

2.2. A L'ÉTRANGER: ont étudié des sols analogues ou voisins: en Belgique: TAVERNIER et MARÉCHAL (Sols à fragipan), puis PÉCROT et AVRIL, ainsi que GALOUX; en Suisse: F. RICHARD; en Allemagne: KRAUSS, HARTEL, MÜLLER, puis LAATSCH, MÜCKENHAUSEN, ZAKOSEK, SCHÖNHALS, BRUNNACKER, ARENS...; en Autriche: FRANZ, FINK; en Yougoslavie: GJURO JANKOVIC; aux U.S.A.: B. STOUT, CARLISLE (F.-J.), KNOX (E.-G.), WINTERS et SIMONSON, SMITH (G.); en Angleterre: FITZPATRICK, GLANTWORT (*compact till, gumbotil, fragipan*).

3. COMPARAISON SOMMAIRE AVEC D'AUTRES SOLS :

3.1. LOESS: leur granulométrie est voisine, ce qui permet de supposer qu'une partie au moins (la partie supérieure des sols de la forêt de Chaux) est un remaniement éolien. Mais la surface spécifique est moitié moindre, le total des bases échangeables est 10 fois plus petit, le Ca éch. est 20 à 50 fois plus faible, la capacité d'échange des cations 3 à 5 fois plus petite; seule la teneur en potasse est parfois plus forte (mais pas toujours); ils sont donc beaucoup moins fertiles agronomiquement et forestièrement.

3.2. SOLS PODZOLIQUES: les sols à sous-sols marmorisés ne présentent pas de différenciation par couches horizontales. Par contre, ils ont subi, comme les sols podzoliques, une destruction des argiles (LAATSCH 1937), probablement par suite de l'action des acides dérivés du tanin. On peut expliquer ainsi la différence de 6 % de teneur en argile entre les parties blanches et les parties ocres.

3.3. SOLS A GLEY: le mot *gley* a été employé dès 1905 par les pédologues russes, mais il est entré dans la littérature française vers 1930. Le mot *pseudogley* date d'environ 1950. Les sols à vrais gleys ou *eugleys* ont des caractères différents.

Ceux-ci s'expliquent si l'on précise les différences de formation. Les sols à *pseudogley* sont dus à l'eau météorique tombée sur leur surface même (croupes ou plateaux; en Autriche, on les appelle, pour cela, des *Tagwassergley*) et qui s'évapore vite. Dans les *vrais gleys*, l'arrivée de l'eau se fait en dessous, latéralement, parce que ce sont des sols en position basse et cette eau ne s'évapore que lentement.

Dans la *gleyification*, il y a transformation chimique, changement sur place de forme du fer de la plus grande partie de la masse. Dans la *marmorisation*, il y a, lors des dessiccations périodiques, des micromigrations et des précipitations localisées.

D'où les différences:

1° Les *gleys* résultent d'engorgements aqueux durables, quasi continus; les *pseudogleys* d'engorgements intermittents souvent de très courtes durées.

Conséquences:

- a) l'aspect des *gleys* est souvent moins contrasté que celui des *pseudogleys*; la décoloration générale y est plus forte.
- b) il y a des teintes bleuâtres ou verdâtres par suite de la présence de fer *ferreux* abondant; les décolorations des *pseudogleys* sont grises par *déferri-sation*, ce qui est tout différent.
- c) la végétation ne subit pas, dans les *gleys*, l'action des longues phases sèches, comme c'est le cas dans les *pseudogleys*; la croissance y est de ce fait plus continue.

2° Les *gleys* résultent de l'action d'une nappe profonde épaisse. L'horizon hydromorphe est généralement profond et épais. Les *pseudogleys* résultent d'une nappe superficielle: l'horizon affecté est situé près de la surface et il est mince.

3° Les eaux formant des *gleys* sont des *eaux minéralisées* par leur passage dans le sous-sol voisin, celles formant les *pseudogleys* sont des *eaux de pluie* qui ont traversé l'humus, *non minéralisées et même souvent acidifiées par cette traversée*. Elles déclenchent des mouvements du fer et surtout du manganèse, d'où des *déferrisations* et *démanganisations* donnant au fond une teinte générale grise (tandis que dans les *gleys* la teinte dominante due à la forme ferreuse ou manganéuse est verdâtre ou bleutée). Par suite de cette minéralisation des eaux, les *gleys* sont souvent plus riches que les *pseudogleys*.

4° D'autre part, le matériel *gleyifié* est souvent plus argileux que le matériel *marmorisé*; cela résulte probablement de la situation même; mais aussi du fait que le matériel argileux se dessèche moins facilement que le matériel limoneux ou sablonneux: celui-ci est plus sujet à marmorisation.

5° Les bactéries qui jouent un rôle important dans la *gleyification* empruntent leur énergie à la matière organique entraînée par l'eau descendant de la surface pour transformer le fer ferrique en fer ferreux. Dans le cas du *vrai gley*, elles agissent vraisemblablement dans la masse et dans le cas du *pseudogley* surtout dans les fissures. La microflore est vraisemblablement d'ailleurs toute différente, à cause des phases sèches, dans le deuxième cas.

Après avoir marqué les différences entre *gley* et *pseudogley*, il faut néanmoins remarquer qu'il y a des analogies, en particulier le fait qu'il s'agit non de types de sols, mais de *faciès*, tous deux hydromorphes, pouvant affecter des horizons superposés, de texture et d'origine différente, provenant d'une autre évolution passée, actuelle, ou présente.

Il y a aussi continuité des uns aux autres:

a) Il y a de légères dépressions de plateau et des concavités dans la forme de la couche imperméable, donc des approvisionnements latéraux en eau de pluie sur quelques mètres ou quelques dizaines de mètres; l'accumulation ainsi réalisée forme une sorte de lac interne: le *pseudogley* peut prendre localement des caractères de *gley*.

b) Si la pluviosité est, une année, plus abondante, les phénomènes de réduction chimique sont plus marqués.

c) Une végétation plus acide peut favoriser la réduction, donc le faciès *gley*.

d) Un couvert forestier plus complet réduisant la quantité d'eau entrant dans le sol favorise, à priori, plutôt les aspects de vrai *pseudogley*, en accroissant les temps de sécheresse du sol au détriment des temps d'engorgement. Effectivement, il y a souvent des concrétions dans des sols anciennement mieux boisés.

4. COMPARAISON D'HORIZONS MARMORISÉS ET NON MARMORISÉS :

Des échantillons marmorisés et bruns uniformes ont des aspects très différents. Est-ce que ces différences d'aspect correspondent à des différences radicales de constitution et de propriétés? Pour répondre, nous avons comparé 2 à 2 les échantillons de plusieurs couples :

a) Comparaison de 2 horizons (à 40 cm) sous un vide à molinie (XII 15) et sous belle futaie (I 28). Il s'agit de 2 sols de granulométrie très voisine (sauf les constituants de plus de 60 microns, plus abondants pour la belle futaie).

Sont très voisines les teneurs en K_2O , Na_2O , CaO , FeO , TiO_2 , Al_2O_3 , N, K éch., fixation de K, capacité d'absorption en m.e. %.

Pour la belle futaie, la teneur en Mn_3O_4 est très supérieure (20 fois). Supérieures sont celles en MgO (1,5 fois) et P_2O_5 (2 fois).

b) Comparaison entre deux échantillons d'un même profil dans un mauvais vide à molinie II 14, l'un au-dessus de la ligne d'apparition des marbrures (n° 8), l'autre en dessous (n° 9). Le volume des pores du sol au départ est le même. La rétention d'eau du deuxième (22,6 %) est un peu plus faible que celle du 1^{er} (24,4 %). La teneur du sol en humus du 2^e est 2,24 %, un peu plus forte que celle du 1^{er} (1,03 %). La perméabilité du 2^e est plus faible que celle du 1^{er}; par suite du passage de l'eau, le volume des pores diminue davantage.

c) Comparaison entre des portions de sols marmorisés et des portions non marmorisées. Trois stations ont fourni des couples. De la comparaison détaillée non insérée ici, *il semble résulter que le matériau n'est pas originellement très différent; c'est bien l'hydromorphie qui est la cause des très fortes différences physiologiques*; tout se passe comme s'il y avait un seuil: à partir des caractéristiques physiques fondamentales capables de retenir l'eau stagnante, celle-ci agit sur les caractéristiques physiques plus fugitives; elle agit sur les caractéristiques chimiques par dissolution et attaque, elle parvient à altérer l'aspect et créer les bigarrures.

Recherche du seuil de marmorisation:

Il se produit, semble-t-il, quand le nombre de jours de stagnation dépasse 50, quand la teneur en limon + argile dépasse 54 %, quand les agrégats de plus de 2 mm sont inférieurs à 5 % et les « non agrégés » supérieurs à 50 %; la comparaison des teneurs en K_2O , P_2O_5 , humus, n'apparaît pas probante,

Ci-dessous, on trouvera quelques chiffres auxquels il faut se garder de donner une valeur absolue, car il peut y avoir des compensations d'une grandeur par l'autre.

	Non marmorisé	Marmorisé	Différence
Densité apparente	1.86	1.90	très faible
Limite de plasticité (%)	22	19.7	très faible
Surface spécifique (m ² /g) --	20 40	23 20	
Perte au feu (%)	3.63	2.92	faible
Rétention d'eau à pF3	35.7	39.2	
Volume des pores	41.8	37.8	
pH	4.33 5.1	4.40 5.00	très faible
Eh	175	180	
rH	24.4	25	
CaO (%)	1.34 0.039	1.00 0.034	faible
MgO	1.2	1.0	négligeable
C.E.C.	12.1	6.3	différence notable (due à l'activité biologique)
Fe ₂ O ₃	3.19	1.72	assez forte
SiO ₂ (Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃)	2.6	0.5	importante
k (perméabilité)	5.6 × 10 ⁷	4 × 10 ⁷ dimi- nue un peu plus vite quand la pression s'accroît	

De ces comparaisons, il résulte que la différence entre « marmorisé » et « non marmorisé » n'est pas aussi grande qu'on pouvait le penser ; elle n'est pas toujours dans le même sens ; la plupart des caractéristiques héritées du matériau originel sont assez peu différentes.

Les propriétés les plus affectées par la marmorisation sont celles relatives à l'humus, et à la répartition des hydroxydes.

On peut supposer que la marmorisation n'est, dans une certaine mesure, qu'une maladie passagère du sol, et qu'elle est beaucoup moins irrémédiable que la podzolisation classique par horizons entiers.