LES SOLS A MARBRURES
DE LA
FORÊT DE CHAUX
(Jura)

PAR

G. PLAISANCE

Ingénieur Principal des Eaux et Forêts
Docteur-Ingénieur

TABLE DES MATIERES

Préambule	449
Introduction	451

CHAPITRE I — CLIMAT

1. Caractéristiques contemporaines	453
1.1. Température	453
1.2. Précipitations	453
1.3. Indice d'aridité	453
1.4. Insolation	454
1.5. Etat hygrométrique	454
1.6. Brouillards	454
1.7. Evaporation	454
2. Influence du climat sur les sols	454

CHAPITRE II — ROCHE-MERE ET SUBSTRAT

1. Substrat caillouteux	456
2. Limons supérieurs des plateaux	457
2.1. Histoire géologique	457
2.2. Dénominations et caractères généraux	461

CHAPITRE III — LES FORMES DU TERRAIN

1. Massif de la forêt de Chaux	463
2. Autres régions	464

CHAPITRE IV — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

1. Texture	466
1.1. Etude des constituants	466
1.2. Etude d'ensemble	469
1.3. Conséquence de la texture	470
2. Structure	470
2.1. Formes de la structure	470
2.2. Stabilité de la structure	472
2.3. Densité apparente	477
2.4. Porosité	477

2.5. Compacité et dureté	478
2.6. L'air dans le sol	481
2.7. Surface spécifique	482
2.8. Température	482
3. Eau du sol	482
3.1. Formes de l'eau du sol	483
3.2. Teneur en eau (en poids)	483
3.3. Teneur en eau (en volume)	483
3.4. Potentiel capillaire	484
3.5. Contenu en eau	484
3.6. Humidité équivalente	485
3.7. Oxydo-réduction	485
3.8. Perméabilité	485
3.9. Bilan de l'eau	486
3.10. Nappe aquifère perchée	487
4. Résumé des propriétés physiques	490

CHAPITRE V — PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

1. Fer	492
2. Aluminium	492
3. Silice	493
4. Equilibres entre SiO_2 et oxydes	493
5. Manganèse	493
6. Cations (ensemble)	493
7. Calcium	493
7.1. CaO	493
7.2. Ca échangeable	493
8. Magnésium	494
9. Soufre	494
10. Phosphore	494
10.1. P_2O_5 total	494
10.2. P_2O_5 assimilable	494
11. Potassium K	494
11.1. K_2O total	494
11.2. K_2O échangeable	494
12. Matières organiques	495
13. Humus	495
14. Azote	495
14.1. Azote total	495
14.2. Azote minéralisable	495
14.3. Rapport carbone/azote	495

15. Tannin	495
16. Acidité	496
17. Minéraux argileux	496
17.1. Analyses	496
17.2. Ambivalence de l'argile	497
17.3. Propriétés physico-chimiques dues aux minéraux argileux.	497

CHAPITRE VI — PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES

1. Faune du sol	500
1.1. Mégafaune	500
1.2. Macrofaune	500
2. Microflore	501
3. Tests biologiques de fertilité	501
3.1. Semis de trèfle	502
3.2. Semis de lin	502

CHAPITRE VII — SYNTHÈSE DES PROPRIÉTÉS

(Ensemble du profil)

1. Le profil et les 3 couches	504
2. Défauts	504
3. Sol et sous-sol	509

CHAPITRE VIII — ASPECTS

1. Marbrures	510
2. Couleurs	512
3. Concrétions	514
4. Méthodes de description des sols	517
4.1. Caractères	517
4.2. Symboles de sols	517

CHAPITRE IX — VARIÉTÉS ET VARIANTES

1. Sol forestier à marbrures	519
1.1. Toposéquence	519
1.2. Accidents	519
2. Sols fortement hydromorphes des vides	520
2.1. Sols de dépressions	521
2.2. Sols de zones incendiées	521

3. Sols marmorisés de vallons	521
4. Sols marmorisés de pente	521
5. Sols à sous-sol plus argileux et plus riche	521
6. Sols regradés	522

CHAPITRE X — DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE

1. A l'intérieur de la forêt de Chaux	523
1.1. Dans l'ensemble	523
1.2. Dans le détail	523
2. Vallée de la Saône	523
3. En France	525
4. En Europe	525

CHAPITRE XI — ÉVOLUTION ANCIENNE

1. Actions anciennes des climats sur les cailloutis - Support des limons.	527
1.1. Rubéfaction	527
1.2. Ferrétisation	527
1.3. Cryoturbations profondes dans les cailloutis	528
2. Actions anciennes sur les limons de pentes	529
2.1. Actions cryergiques faibles	529
2.2. Lessivage latéral	529
3. Actions anciennes sur les limons des plateaux	529
3.1. Lehmification	529
3.2. Lessivage	529
3.3. Compacification, induration, cimentation	530
3.4. Marmorisation réticulée	530
3.5. Marmorisation tachetée	532
3.6. Création d'un microrelief	532
3.7. Solifluxion	533
3.8. Demi-boules de limon	533
3.9. Hypothèse de l'effacement de la marmorisation réticulée ..	534
3.10. Hypothèse des recouvrements	534
3.11. Hypothèse des emmarécagements localisés anciens	535
4. Evolution des minéraux argileux	536
4.1. Evolution présumée	536
4.1. Signification de cette évolution au point de vue de la genèse des sols bruns	536
4.3. Signification de cette évolution au point de vue de la mar- morisat ion	537

5. Examen morphoscopique des grains	538
5.1. Sol de plateau	538
5.2. Fractions de sol marmorisé	539
5.3. Sol de pente	539
6. Résumé	540

CHAPITRE XII — ÉVOLUTION RÉCENTE

1. Facteurs agissants	541
1.1. Facteurs premiers	541
1.2. Facteurs seconds	542
2. Notion de sols hérités	542
3. Evolution actuelle des sols marmorisés tachetés	543
3.1. Avec engorgement périodique par l'eau	543
3.2. Avec suppressions des engorgements	545
4. Evolution actuelle du sous-sol marmorisé réticulé	546
4.1. Avec engorgement périodique	546
4.2. Avec suppression des engorgements	547
5. Irrégularités	547
6. Dégradation des sols	548
7. Résumé des caractères généraux de la marmorisation	550

CHAPITRE XIII — COMPARAISONS

1. Comparaisons avec d'autres sols de la même forêt	551
1.1. Sols de position topographique différente	551
1.2. Sols sous végétation différente	553
1.3. Sols d'étangs	560
1.4. Sols dégradés	560
2. Comparaisons avec d'autres sols d'autres régions	562
2.1. En France	562
2.2. A l'étranger	562
3. Comparaison sommaire avec d'autres sols	562
3.1. Loess	562
3.2. Sols podzoliques	563
3.3. Sols à vrai gley (eugley)	563
4. Comparaison d'horizons marmorisés et non marmorisés	565
5. Comparaison des fractions grises et ocre (fractions voisines)	567
5.1. Propriétés physiques	567
5.2. Propriétés chimiques	567
5.3. Propriétés biologiques	567

CHAPITRE XIV — VÉGÉTATION

1. Flore actuelle	571
2. Les associations végétales	573
3. Peuplements forestiers	574
4. Histoire du couvert végétal	575
4.1. Histoire antérieure à 1875	575
4.2. Histoire récente	577

CHAPITRE XV — EFFETS DU SOL SUR LA VÉGÉTATION

1. Défauts anciens et nouveaux	580
2. Valeur forestière Production ligneuse	581
2.1. Aspects quantitatifs	581
2.2. Qualité du bois	582
3. Enracinement	583
4. Circonstances diverses des effets du sol	584
4.1. Plus favorables	584
4.2. Défavorables	584

CHAPITRE XVI — EFFET DE LA VÉGÉTATION SUR LE SOL

1. Effets généraux du couvert végétal (analyse de son action)	586
1.1. Fonctions d'une végétation véritablement forestière	586
1.2. Conséquences pour le sol	589
2. Effets spécifiques du couvert végétal	592
2.1. Chêne rouvre et pédonculé	592
2.2. Chêne rouge d'Amérique	593
2.3. Hêtre	593
2.4. Aune	593
2.5. Charme	594
2.6. Tremble	594
2.7. Coudrier	594
2.8. Bouleau	594
2.9. Bourdaine	594
2.10. Robinier	594
2.11. Pin sylvestre	594
2.12. Pin Weymouth	595
2.13. Epicéa	595
2.14. Douglas	595
2.15. Les divers sapins	595
2.16. Essences de transition	595

2.17. Molinie	595
2.18. Callune	597
2.19. Genêt	597
3. Effet de la litière	597
4. Effet du découvert	598
4.1. Effets divers	598
4.2. Coupe rase	599
4.3. Equilibre	599
4.4. Dégradations conjuguées	600
5. Effets de pratiques forestières diverses	600
5.1. Effet du soutrage et de l'exploitation du fourrage	600
5.2. Effet du pâturage	601
5.3. Actions directes sur le sol par l'exploitation en forêt	601
5.4. Effet des défrichements et des cultures vivrières en forêt ..	601
5.5. Effet des incendies	602
6. Effet du traitement forestier	603

CHAPITRE XVII — BASES DE L'AMÉLIORATION

1. Etude par nature d'amélioration	606
1.1. Amélioration physique	606
1.2. Amélioration chimique	610
2. Action complexe des agents biologiques	611
2.1. Végétation	611
2.2. Faune	614
2.3. Comparaison entre les deux agents pédofaune et rhizosphère.	614
3. Etude par couche	615
3.1. Couche supérieure	615
3.2. Couche moyenne	615
3.3. Couche inférieure	616
4. Démarmorisation	616
5. Etude par nature du sol	618
5.1. Sol de vide	618
5.2. Sol ordinaire de forêt	618
6. Principes généraux qui résultent des analyses précédentes	618
7. Preuves de la possibilité de restaurer les sols à marbrures	620

CHAPITRE XVIII — TECHNIQUE DE L'AMÉLIORATION PAR LES MOYENS NATURELS (Pratique)

1. Mesures à prendre	623
1.1. Suppression des enlèvements de litière	623
1.2. Suppression de l'incinération des rémanents	623

1.3. Suppression du surpâturage et même du pâturage	623
1.4. Suppression des incendies	623
1.5. Maintien du taillis sur pied	624
1.6. Suppression de l'exportation des petits bois	624
1.7. Allongement de la révolution	624
1.8. Protection des oiseaux	624
2. Mesures prises dans la Forêt de Chaux	624
3. Effets à escompter	625
3.1. Effets pédologiques	625
3.2. Effets sylvicoles	625
4. Prospective végétale. Evolution naturelle théorique (pénécliclimax) ..	626

CHAPITRE XIX — AMÉLIORATION PAR LES MOYENS SEMI-ARTIFICIELS

1. Assainissement	627
1.1. Fossés simples	627
1.2. Rigoles (1.2.1.) et tranchage (1.2.2.)	627
1.3. Puisards	628
1.4. Drainage à la charrue-taupe	629
1.5. Explosifs agricoles	629
2. Culture du sol	629
2.1. Culture du sol superficiel	629
2.2. Culture du sous-sol	629
3. Remodelage de la surface	629
3.1. Buttes	629
3.2. Billons	629
3.3. Grands ados	629
4. Couverture artificielle de la surface	630
5. Amendements - Engrais	630
5.1. Amendements minéraux	630
5.2. Conditionneurs	631
5.3. Amendements organiques	631
5.5. Engrais minéraux	632
5.6. Roches volcaniques broyées	632
5.7. Activeurs biologiques	632
5.8. Inoculation de terre à très bonne activité biologique	632
5.9. Inoculations fauniques	632
6. Repeuplements artificiels	633
6.1. Principes généraux	633
6.2. Plantations	634
6.3. Semis directs	634
6.4. Evolution du paysage forestier	634
6.5. Bilan financier	634

CONCLUSION	636
ABRÉVIATIONS	639
BIBLIOGRAPHIE	640
RÉSUMÉ	677
ZUSAMMENFASSUNG	678
SUMMARY	679

TABLE DES FIGURES

Figure

1 Profil-type d'une langue tabulaire	457
2 Genèse des sols en forêt de Chaux	459
2 bis Hypothèse des sédimentations diverses	460
3 Glacis de la Forêt de Chaux	464
3 bis Carte des plateaux	465
4 Profil textural de Crissey	467
5 Courbes cumulatives: comparaison avec les loess	468
6 Courbes de fréquence de granulométrie	468
7 Indice de stabilité de la structure	474
8 Enfouissement	479
9 Evacuation latérale de la nappe perchée	488
10 Profil Chaux I 14: propriétés physiques	505
11 Profil Chaux I 14: propriétés diverses	507
12 Aspects schématiques d'une coupe de sol	511
13 Répartition des types de sols	524
14 Lessivage latéral	528
15 Formation des concrétions	539
16 Irrégularités du sol et de la nappe	547
17 Coupe schématique	574
18 Les 3 écrans	581
19 Effet d'un arbre sur les niveaux d'eau	587
20 Démarmorisation - Ancienne carrière du Bizard	628
20 bis Démarmorisation - Butte de la M.F. du Grand Contour	628

N.B. On trouvera une carte pédologique du Quart Nord-Ouest de la forêt dans la Revue Forestière Française de septembre 1953.

TABLE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Photographies en noir

I Niveaux d'eau	659
II Sol de vide	660
III Sous-sol consolidé	661

IV	Détail de sous-sol marbré	662
V	Photographie aérienne de vides	663
VI	Paysage de trouée à molinie	664
VII	Envahissement de la molinie	664
VIII	Carte de la forêt en 1725	665
IX	Bourdaie	666
X	Embroussaillage spontané	667
XI	Excavatrice	667
XII	Charrud	668
XIII	Billons de charrue	669
XIV	Action du hêtre	669
XV	Chênes rouges d'Amérique	670
XVI	Hêtraie de conversion	671

Photographies en couleurs

A	Profil de sol (Crissey 11)	673
B	Profil de sol de moliniaie	674
C	Coupe horizontale de sous-sol	675
D	Coupe horizontale (marches d'escalier)	676

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 DUCHAUFOUR, 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 CTRY, 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, Mine 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. POCHON 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'Ecole 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 lehmeux 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
$\overline{0.2}$	$\overline{2.3}$	$\overline{6.8}$	$\overline{11}$	$\overline{14}$	$\overline{17.4}$	$\overline{19.1}$	$\overline{18.4}$	$\overline{14.9}$	$\overline{10.3}$	$\overline{5.7}$	$\overline{2.7}$

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 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 fractions 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 DEPÉRET, 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 subséquent	

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.

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 démarморisés 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: *aubue*, *arbue*, *erbie*, *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 (DUCHAUFOR, 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 marmoroïde*; *sol à fragipan*; *Toniger Lehm*; *Schufflehm*; *Lösslehm*; *Staublehm*... — Noms dialectaux: en Allemagne, les *Missenböden*, *Klebsandböden*, *Mölkensböden*, *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 pannonique 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; DIETRICH, 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 hariolé (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, DOUVILLÉ 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.

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 nomi-

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. *Limon*: 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.

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 chénaies, 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 2 000 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 pro- fondeur (35 cm)	pH	Argile			Limon			Sable	Sable	H ₂ O	Matières organiques
		a	b	c	d	e	fin	gros.			
		< 1 micron	1 à 2 microns	2 à 5 microns	5 à 10 microns	10 à 20 microns	20 à 200 microns	200 à 2 000 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 amenouissement (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 pauvreté 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 *battance* 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 racelles 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 (hêtraie)	30 %	15 %	37 %	5 %	9 %	4 %	0 %
		52 %					
CHAUX XI (chênaie)	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 (chênaie)	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'agréats 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 (Feuill. 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	13,8	3,45	52,3	4	9,6
Sol à 10 cm quart en réserve de Crissey (limon des pentes)	9.50	14,25	6,15	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 lessivés.

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 Tannenberg, 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 (NITZSCH 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).

c) 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 chê- naie, mais sous-sol marmo- risé)			
10 cm	14	36	50
50 cm	4	38	42

2.5. COMPACITÉ 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:

Echan- tillon n°	Prof. cm	Indice C.B.R.	Pression Kg/cm ² pour un enfonce- ment 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	46	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	15	4	9.5
10 cm	5	2	3.5
40 cm	5	5	5
50 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	55.9	- d° -
	XIII 5	Vide, trou C { profondeur 5 - 12 cm { profondeur 29 - 32 cm	9.6 7.2	43.3 54.5	2.3 1.8	63.6 50.9	52.9 51.7	Mauvais Très mauvais
	- d°	Trou B, zone intermédiaire entre le peuplement normal et le vide	12	36.6	3	47.8	50.6	
21.7.47	I 12	Vide, embranchement route Chien rendu : { à 5-12 cm profondeur { à 45-50 cm de profondeur	26 19.1	29.6 35.1	6.8 4.1	46.6 50.1	35.6 45.2	Sol forestier bon
	IX 4	{a} sous taillis vieilli {b} vide	10.0 8.4	46.1 48.5	2.8 1.5	51.7 55.3	56.1 56.9	Mauvais Très mauvais
	XII 5	Hétraie (conversion) { à 15 - 20 cm { à 50 - 55 cm	34.4 29.4	19.8 23.3	7.3 4	46.9 47.7	54.2 52.7	Sol forestier très 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*: Échantillons 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.

	Témoïn	Tassement observé
	—	—
1	Témoïn (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° + humaby	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	témoïn 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 témoïn couvert n'a probablement pas reçu assez d'humidité et de lumière pour assurer la végétation.

Le témoïn 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 pèlosol 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° Dégénération 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 pommier »; 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 placeaux 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'aggrégation, 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	} 365 jours
77 niveaux 20 à 40 cm de profondeur .. 104	
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, HOOGHOUTD 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 pseudogleys 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'épuisement.

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 déplorables, 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, CAILLEUX 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 (SiO_2):

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 SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 :

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 Mn_2O_3 , 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 roulure 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.L.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.

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. MINÉRAUX 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-stratifié 10-14 _m	illite	10-14 _a	10-14 _v vermiculite
sol brun uni-forme de perle parcelle I/13	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 parcelle II/14	2778	sol superf. A ₀	tr		tr	tr	tr
	2779	1° sous sol éluv. 2 A (25 à 30 cm)			tr	2	6
	5828	2° s/sol illuv. B (80 à 65 cm)	2	3	tr	3	2
Baraques Juppille (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: rappelons 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

Eaplacement		S %	P. ass. %	K ass. %	Pe %
Fraieans 3	{	2.81	0.044	0.012	1.37
		1.73	0.016	0.150	1.65
Chaux I 14	{ 40 cm { rougeâtre { blanchâtre { 55 cm avec con- crétions	0.25	0.005	0.031	1.85
		0.32	0.005	0.049	0.50
		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	0.32
II 3	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	"Kauvais 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	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, FRANÉ 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
Citeaux	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. DEFANTS:

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

506

LES SOIS A MARRURES DE LA FORÊT DE CHAUX

	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	40.39	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 0.002 à 0.02	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		0.88		0.61		0.53		0.44		0.39	
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 Surface	m ² /g	Densité apparente	Rétention d'eau à pF 3 en poids	Rétention d'eau à pF 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 feuillet 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 litées 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 MARMOROÏDE

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 déferriée. 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 grossières;
- 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 boubènes, 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

516

LES SOIS A MARMURES DE LA FORÊT DE CHAUX

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)	Fissures subdivisées et raccordées, sur fond ocre rougeâtre
Couche supérieure	Couche supérieure	Couche moyenne ou profonde	Couche profonde seulement
		Compacte par tassement, mais non très dure	Indurée ou cimentée
		Contrastes plus ou moins marqués, plages de transition	A forts contrastes
		Parfois avec concrétions manganoferriques noires	Sans concrétions
		Plus récente	D'âge ancien
		Éphémère	Durable
		Sous climat actuel	Due à des climats très agressifs (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 glacis 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 (Moulisme, 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: CAYN... 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 (Géze). 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; CAVAILLÉ 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 macro-profil 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 (I^{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 démarquant: 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, grumelleuse.

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 démararmorisation 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 pédioliquement 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^o 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 (simili-varves de II 14).

2^o 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 serait maintenue 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 minime 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. ÉVOLUTION 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 désagrégeante 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 $14 \text{ \AA}$ 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 feuillet 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 feuillet 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 radicelles.

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.

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.), FITZPATRICK 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 fouisseuse, ou la ralentissent de façon considérable et catastrophique, car elles diminuent les ressources en eau au niveau des coiffes actives de ces racines.

3. EVOLUTION 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 longtemps, 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 « microendopodzolisation ».

3.1.2. *Sols de vides*: il s'agit de sols fortement hydromorphes « protogènes » 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'hum-

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 trainées plus claires	Intermédiaires plus ou moins marbrés	Beige avec trainées 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 ameublit.

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 trainée 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 compacité 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.

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 compaction 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 cendreuse.

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, MIGNIEN (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^o 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^o 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^o 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 déarmorisé: 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	0.16	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	0.03	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 minimales 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	
C %/an	39.4	43.0	
N %/an	1.95	2.20	
C/N %	20.2	19.5	
			Ces résultats ne permettent pas de tirer 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,	Surface	65.7 %	67.1 %
	15 cm	42.4 %	44.4 %
le lendemain d'une pluie	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 , K_2O , P_2O_5 sont faibles; toutes les teneurs en CaO et P_2O_5 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 cumulées 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.*

Ou bien il y a des différences génétiques — non apparentes — dans les plants utilisés; ou bien le chêne rouge est spécialement sensible à un facteur qui se trouve ici à un seuil (lequel?); ou bien même il y a des différences entre les placeaux, différences dues à la végétation antérieure (emplacement d'un chêne, d'un hêtre, d'un tremble?) non indiquées par l'analyse (qualité de l'humus?).

Numéro du sujet	0	1	2	3	4
<u>Analyse granulométrique % de la terre fine</u>					
Sable grossier (2 mm - 0.2 mm)		2.5	2.5	2.0	2.5
Sable fin (0.2 mm - 0.05 mm)		4.0	4.5	5.0	6.0
Limons grossiers (0.05 mm - 0.02 mm)		26.0	26.0	23.5	32.0
Limons (0.02 mm - 0.002 mm)		48.5	51.5	48.0	43.0
Argile (Inférieur à 0.002 mm)		19.0	15.5	21.5	16.0
<u>Analyse chimique % de la terre fine</u>					
pH	4.6	5.5	5.1	5.3	4.6
Azote organique (Kjeldahl)	1.82	2.2	1.7	0.8	1.8
Potasse échangeable (m.e. %)	0.18	0.16	0.16	0.08	0.14
Carbone	28.3	37.5	33.8	11.7	26.4
C/N	15	17	19	15	15
<u>Test Morgan-Barbier (mg/kg de terre)</u>					
Acide phosphorique	2	4	2	1	2
Potasse	40	40	50	10	30
Capacité d'échange } milli-équivalents	11.0	15.3	12.2	6.7	10.5
Calcium échangeable } pour 100 grammes	1.1	7.1	3.6	3.1	1.1
Magnésium échangeable } de terre	0.4	1.2	0.3	0.2	0.3
Sodium échangeable } de terre	0.12		0.12		0.13
Taux de saturation du complexe		56 %	29 %	51 %	14 %
<u>Teneur des feuilles</u>					
Ca %	0.96	1.29	0.94	1.0	0.89
Mg %	0.28	0.23	0.31	0.30	0.27
K %	0.58	0.60	0.69	0.51	0.32
P ₂ O ₅ %	0.26	0.31	0.28	0.28	0.22
Niveau d'eau dans un trou de sondage voisin, le 29 novembre 1958	néant	néant	82 cm	40 cm	55 cm
Porosité	62 %	51 %	73 %	65 %	62 %
<u>Hauteur en octobre 1959 (en m)</u>					
Hauteur en 1963 (en m)	9.50	7.40	4.0	1.5	0.62
Circonférence au pied (en cm) en 1963	14	12	7.85	4.17	2.65
Circonférence à 1 m (en cm) en 1963	58	45	26.5	10	10.5
Circonférence à 1 m (en cm) en 1963	36	30	15.5	6.5	5
Volume (assimilé à un cône) (en m ³)	0.127	0.066	0.015	0.0011	0.0007

En tout cas :

1° toutes les différences constatées dès 1958 sur les plants mis en place se sont maintenues et accrues normalement.

2° alors que les stations 0 et 1 apparaissent très favorables, les stations 2, 3, 4 apparaissent pratiquement défavorables.

3° les seules différences décelées qui sont peut-être responsables des autres sont :

- plans d'eau plus rares pour 1 et 2,
- taux de saturation plus fort pour les premiers,
- teneurs en N, Ca, Mg plus élevés pour ceux-ci.

4° la présence de la molinie pour les stations n°s 2, 3, 4 est peut-être le facteur nocif.

1.3. SOLS D'ÉTANGS: ces sols d'étang sont constitués par les mêmes éléments repris, triés et déposés: la texture de plusieurs sols d'étang est très voisine de celle des sols en place, 0,4 à 7 % de sable grossier, 11 à 22 % d'argile. La matière organique est plus forte (jusqu'à 7,3 %); ils sont chimiquement plus riches (1,5 à 3 fois).

1.4. SOLS REGRADÉS:

1.4.1. *Sol de butte*: (comparaison entre un échantillon marmorisé et un autre échantillon démarmorisé d'une butte). Nous les avons pris dans une butte de déblai de route: vraisemblablement, la butte était un ancien déblai formé primitivement en totalité de sol marmorisé. La forte teneur en Fe et Si semble confirmer qu'il s'agit bien d'un ancien sous-sol ramené à la surface. S'il en est ainsi, ce matériau de sous-sol s'est complètement bruni en moins de 100 ans.

Nous avons étudié 3 échantillons: un dans le marmorisé en profondeur (n° 40), un dans le marmorisé en bordure de la limite (n° 2, ou n° 39), un au-dessus dans la couche brunifiée (n° 1 ou n° 38). Comparons surtout ces deux derniers: la granulométrie du 1^{er} est un peu plus grossière; la perte au feu est plus forte dans le 1^{er} (3,59 %) que dans le 2^e (2,80 %); le pH est un peu plus élevé, le K₂O égal, le Na₂O est plus faible (0,10 m.e. % contre 0,30); le MgO égal, la capacité d'échange double, la proportion de cations dans la capacité d'échange pour le Na 4 fois plus faible, pour le Ca plus faible (11,1 % contre 15,9 %), pour le Mg plus faible (9,9 % contre 15,9 %); la surface spécifique double (40 m²/gr contre 20), le P₂O₅ plus élevé (0,024 % contre 0,017 %), le Fe₂O₃ plus élevé

(3,19 % contre 1,72 %), le rapport $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 1,07 contre 0,70.

Il semble donc qu'il y ait eu un certain lessivage, mais il y a des résultats un peu contradictoires. Il est très vraisemblable qu'il s'agit bien d'un même matériau dont les propriétés chimiques sont devenues meilleures par l'air et les végétaux (aération et restructuration). *La forme courbe de la limite des marbrures, parallèle à la surface externe montre bien que c'est le voisinage de l'atmosphère qui agit: son action ne pénètre qu'à une profondeur déterminée* (fig. 20), celle où on peut parler de météorisation (WEATHERING).

De même à la carrière du Bizard, l'ancien front de carrière montre des terres éboulées (originellement marmorisées), devant le front vertical: une couche meuble et non marmorisée la recouvre. Elle a une épaisseur constante (fig. 20).

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 elongation 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 fourmière:

	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 fourmière	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 (houlbènes).

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 GALOUN; 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 *déferrisation*, 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 manganeeuse 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_2O_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 original 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.

5. COMPARAISON DES FRACTIONS VOISINES GRISES ET OCRES DES MARBRURES:

A l'œil, les 2 fractions grise et ocre (ou rougeâtre) d'un même horizon marmorisé ont un aspect *tout différent*. Que faut-il en penser?

5.1. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES: la comparaison de plusieurs analyses, non insérées ici, nous a montré qu'il n'y avait pas de différences caractéristiques des parties rougeâtres et grises en ce qui concerne les teneurs en limons et argiles.

La circulation de l'eau semble souvent beaucoup plus aisée dans la fraction grise du matériau que dans la fraction rougeâtre, qui est plus ou moins agglomérée et cimentée.

Lors d'un essai, un fragment de sous-sol marmorisé placé dans une allonge ne laissait passer aucune eau; après l'émiettement, il était perméable (1 cm³ en 1"), mais lors d'une 2^e et 3^e infiltration, l'écoulement était 2 fois plus lent, puis 7 fois plus lent.

Nous avons essayé l'effet d'additions de calcaire et de chaux: le calcaire agit 2 fois plus que la chaux.

Nous avons étudié les remontées capillaires; une remontée de 19 cm s'effectue dans la fraction grise en 6 h. 30, dans la fraction ocre en 3 h. 45.

5.2. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES: grosses différences en ce qui concerne le fer libre (1 % contre 0,67 %; 2,5 % contre 0,23 %; 2,92 % contre 0,27 %). On peut donc dire que le fer libre est 10 fois plus abondant dans les fractions rougeâtres, la teinte chaude étant évidemment due à cette richesse en oxydes de fer. Le manganèse est aussi plus abondant dans la fraction rougeâtre (0,039 % contre 0,030 %).

La teneur en azote est un peu plus forte dans la fraction rougeâtre, celle en P₂O₅ égale (0,055 ‰), celle en K₂O (SCHLOESING) un peu supérieure (0,049 contre 0,031 ‰).

Le calcium échangeable serait un peu plus riche dans la fraction grise.

5.3. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES: nous avons fait des essais de culture en pots.

Des semis de lupin ont bien mieux réussi sur la fraction grise que sur l'autre. Le milieu y est meuble. La microconduction de l'eau est probablement meilleure.

Bien que résultant d'une altération par l'eau des fractions rougeâtres, les fractions grises constituent un milieu à plus forte activité biologique. Ils sont plus « vivants ».

En fait, les racines se trouvent exclusivement dans la fraction grise, elles s'y étalent et s'y ramifient, probablement parce qu'elles y trouvent un milieu moins dur, plus frais, mieux vitalisé par la microflore.

	Couche marmorisée	
	Fraction ocre	Fraction blanc grisâtre
<i>CHAUX I/14 à 60 cm</i>		
Argile à 60 cm		
inférieure à 1 micron	3.7	13.5
1 à 2 microns	9.5	3.75
Limon	40.7	45
Sable fin	43.1	35.8
Sable grossier	1.0	0.9
pH	5.4	5.4
<i>CHAUX I/14 à 130 cm</i>		
Argile		
inférieure à 1 micron	27	35.75
1 à 2 microns	3.5	3.5
Limon	34.5	32
Sable grossier	1.7	0.7
Sable fin	30.9	24.6
<i>CHAUX I/14 à 100 cm</i>		
H ₂ O	1.5	1.7
pH	5.6	5.4
<i>CHAUX à 60 cm</i>		
Fe %	2.92	0.27
N ⁰ / ₁₀₀	0.07	0.05
P ₂ O ₅ acide citrique ⁰ / ₁₀₀	0.05	0.05
K ₂ O ⁰ / ₁₀₀	0.049	0.030
Mn %	0.039	0.030
Ca échangeable	2.0	2.8
m.e. % (à — 100 cm)		
Microbiologie	3 boîtes stériles + 1 peuplée moyennement	4 boîtes peuplées moyennement
	3 microorganismes : 2 bactéries 1 aspergillus flavus	7 microorganismes 1 bactérie 1 levure 5 champignons
Humidité	15 %	20 %
Germination du trèfle		
commencée après	9 jours	3 jours
terminée après	12 jours	6 jours
<i>CRISSEY :</i>		
Matières organiques	0.45	0.50
C à 45 cm	0.27	0.30
Fe à 45 cm	3.04	0.27

D'autres mesures ont donné :

Horizons	pH	Limon	Sable fin	Sable gros.	H ₂ O	Mat. org.	A R G I L E S		Fe
							2 μ	1 μ	
- 60 cm Fraction ocre	5.4	38.75	33.1	1	1.8	0.35	5.5	19.5	2.92
							25.0		
Fraction blanc gris	3.4	45	38.85	0.9	0.75	0.25	3.75	13.5	0.27
							17.25		
Témoïn	5.4	36	34.85	1	1.85	0.30	4.5	21.5	2.58
							26.0		
-130 cm Fraction ocre rouge	5.4	34.5	30.9	1.7	2.2	0.30	3.5	27	2.4
							30.5		
Fraction blanc gris	5.4	32	24.65	0.7	2.9	0.50	3.5	35.75	0.30
							39.25		
Témoïn	5.4	40.25	25.6	1.1	2.25	0.30	3.5	27	2.1
							30.5		

Si l'on compare globalement les 2 fractions, on peut dire que la fraction ocre a une texture plus fine que la fraction grise, elle est cimentée et non tassée, moins riche en eau, 10 fois plus riche en fer, moins favorable à la vie bactérienne et radicaire.

5.4. ETUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX DES DEUX FRACTIONS: Mlle PAQUET a bien voulu faire l'analyse aux rayons X de deux fractions gris clair et ocre du sous-sol de la parcelle 704 (I 14).

	Fraction grise	Fraction ocre
Montmorillonite	—	—
Interstratifié gonflant	4	4
Vermiculite	2	2
Illite	2	2
Chlorite	2	2
Kaolinite	traces	traces

Elle note dans les deux échantillons une forte proportion de quartz très fin, ce qui n'est pas pour étonner.

La similitude est frappante. Toutefois, note Mlle PAQUET, la fraction ocre montre des raies plus floues que l'autre, ce qui peut être dû, soit à des minéraux argileux moins bien cristallisés, soit à la présence d'une substance (par exemple de nature ferrique) qui perturbe la diffraction: c'est cette deuxième hypothèse que nous adopterons.

A ce détail près, les deux matériaux sont de composition identique. La conséquence pour nous est très importante:

1° *la marmorisation est bien un phénomène à deux aspects qui affecte une même masse sans modifier totalement sa constitution intime.* Cette analyse confirme pleinement les autres études des deux fractions.

2° *la descente de matériaux terreux dans les fentes a été probablement très faible ou insignifiante; il s'agit plutôt d'une réduction et de ferrisation au contact des parois par l'eau descendue dans la fente.*

CONCLUSION: Nous avons essayé de situer les sols à marbrures par rapport à d'autres sols malades. D'autre part, nous avons tenté l'étude différentielle des marbrures. L'absence de différences systématiques pour plusieurs grandeurs tend à prouver que *le matériel marmorisé n'est pas aussi différent du matériel primitif que ne le laissait penser les contrastes de couleurs.*

S'il en est bien ainsi, il s'agirait d'un phénomène relativement fugitif et *ce serait de bonne augure pour la restauration des sols.*

Bibliographie: ANDERSON... 1958, CARLISLE... 1957, CAVAILLÉ (d.d.), DECKERS 1956, DEJOU 1963, DENIZOT... 1952, DUPUIS 1958, FRANC DE FERRIÈRE 1935, GAIN... 1958, GILE 1958, HUNGER 1963, JANKOVIC (GJURO) 1961, KNOX 1957, LIWERANT 1946, MANIL... 1954, MAROCKE 1961, MENGAUD 1924, MÉRIAUX (d.d.), MÜCKENHAUSEN (d.d.), PECROT... 1958, RIEDEL... 1951, SCHMIEDEL (d.d.), SCHÖNHALS (d.d.), TAVERNIER... 1957, YASSAGLOU... 1960, ZAKOSEK (d.d.).

CHAPITRE XIV

VEGETATION

La forêt de Chaux avait, du début de ce siècle jusqu'en 1956, l'aspect d'un taillis-sous-futaie traité à la révolution de 30 ans sur la majeure partie de la surface (14 séries) et d'un perchis résultant de conversion (3 séries : 3^e, 6^e et 10^e).

Ce qui frappait l'observateur, c'était l'extrême variété des peuplements.

1. FLORE ACTUELLE:

Les chênes occupent encore plus de 80 % de la réserve des taillis-sous-futaie. Le chêne rouvre supporte parfois bien les plans d'eau élevés du fait de son enracinement superficiel; il se contente de sols plus pauvres que le pédonculé; mais il préfère tout de même les sols mieux drainés, c'est pourquoi il domine dans l'Ouest de la forêt dont le relief est plus accidenté. C'est un compagnon naturel du hêtre, de sorte qu'on le trouve presque toujours dans les îlots de hêtre (que nous considérons comme les résidus d'une hêtraie ancienne plus étendue).

Le chêne pédonculé demande des sols un peu plus fertiles et moins souvent secs. Il se trouve surtout dans l'Est, sur les plateaux.

Dans l'ensemble, le couvert du chêne (celui du rouvre, et plus encore celui du pédonculé) est clair, ce qui, sur ce type de sol, est un défaut grave, sensible en particulier au moment des régénérations.

Le hêtre occupe 10 %; il devient très branchu en taillis-sous-futaie, mais il l'est peu s'il est traité en futaie; il est isolé ou mélangé au chêne; sa hauteur, ici, est beaucoup plus faible que sur les lehms riches ou loess tels que ceux de la région de Mulhouse (Tannenwald); mais son bois est de bonne qualité.

Le pin sylvestre (3 %) est bien venu dans les « vides », où il a été introduit après 1875.

Le charme occupe les sols assez bons ou bons, c'est-à-dire assez bien drainés. Il ne s'accommode guère des conditions très favorables à la molinie. Il a été propagé par l'exploitation répétée en taillis. Peut-être a-t-il remplacé le hêtre en bien des endroits?

Le coudrier fait figure, au niveau du sous-étage, d'occupateur de places vides: il couvre de grandes surfaces sur des plateaux, accompagnant assez souvent une claire réserve de chêne pédonculé, supportant bien les sols marmorisés.

Le saule à oreillettes, *Salix aurita* (variété androgyne selon MICHALLET) est abondant dans les vides, surtout les plus mauvais.

La bruyère, *Calluna vulgaris*, est assez abondante quoique en nette régression. Elle disparaît à l'ombre, mais occupe encore des peuplements clairs sur cailloutis, les sommières et leurs bords, certains vides à sol hydromorphe.

Le genêt à balai se trouve dans les peuplements clairs sur sol bien drainé, voire caillouteux.

La fougère grand aigle est très répandue: elle indique des sols un peu moins asphyxiants que la molinie. Elle se couche en hiver et gêne les régénérations.

La molinie bleue, *Molinia caerulea* de MOENCH, var. *arundinacea* est très répandue. Les feuilles sont un mauvais fourrage; elles absorbent mal le purin et constituent donc une mauvaise graminée pour formation de fumier. Elle était exploitée, autrefois, faute de mieux. A partir de novembre, elle jaunit et se couche par terre. Dans toute la vallée de la Saône, son extraction systématique causait l'appauvrissement progressif du sol (TRIPIER 1901). On en exportait, en particulier, vers les pays voisins du vignoble.

Lorsque les conditions lui sont favorables (c'est-à-dire très mauvaises pour les autres plantes), elle forme des *touradons* (mottes qui s'élèvent progressivement).

Chose étrange, elle préfère les conditions alternantes, tantôt très humides, tantôt très sèches; tout au moins elle les supporte, alors qu'aucune autre espèce ne les tolère et ne peut lui faire concurrence.

Elle aime la lumière, souffre en dessous de 15 % d'éclairement, ne supporte pas moins de 4 %.

Les luzules, en particulier *Luzula albidula*, sont assez fréquentes, elles fuient les sols à humidité trop alternante, mais supportent les sols les plus secs, fertiles ou non (de ce fait, elles ne semblent pas caractéristiques).

Les carex, en particulier *Carex brizoides*, viennent dans des sols à humidité assez constante, et relativement fertiles (fonds de vallon).

2. LES ASSOCIATIONS VÉGÉTALES :

Les actions humaines répétées ont apporté des perturbations profondes qui rendent difficile le rattachement des associations existantes à des types phytosociologiques qui sont censés être naturels.

Nous avons adopté les classifications ci-dessous :

a) pour les petites espèces :

- 1° Type à carex (vallons frais et fertiles).
- 2° Type à canche cespiteuse (rare) (sols assez constamment frais et assez fertiles).
- 3° Type à molinie :
 - I. — en « touradons » proéminents (brèves périodes sèches),
 - II. — très couvrante, mais sans touradons,
 - III. — claire (longues périodes sèches) (mais il faut tenir compte de l'éclairement).
- 4° Type à luzule (sol bien drainé, mais de fertilité très variable, mauvais ou bon chêne rouvre, hêtre...).
- 5° Type à canche flexueuse (sol bien drainé, mais pauvre et séchard : sol caillouteux).
- 6° Type à pervenche : limon sur sous-sol calcaïque.

b) par les grandes espèces : d'après la nature du taillis :

- 1° Taillis de chêne rouvre (médiocre).
- 2° Taillis de charme (assez constamment frais et assez fertile).
- 3° Taillis de coudrier (sol à oscillations hydriques plus fortes).
- 4° Aune et bourdaine (sol temporairement gorgé).
- 5° Sans taillis (moliniaie).

Les vides ont été un des éléments essentiels du paysage. Ils ont été envahis par la molinie, grande graminée haute de 2 mètres en année humide et par des saules à oreillettes disséminés, ainsi que par la bourdaine.

Généralement, il y a, de loin en loin, quelques chênes ou même des hêtres. Ils sont signalés dans les descriptions des XVII^e et XVIII^e siècles : en 1688 (Jean SANGUINIÈRE) 5 888 ha ; en 1724 (4 800 ha) ; dans celle de 1821 (1 500 ha) ; dans celle de 1888 (1 000 ha).

En 1955, les vides nets ne couvraient guère que 250 ha, mais de nombreuses zones clairiérées étaient (et sont encore) des témoins de ces grands vides du passé. Rares sont ceux qui ont une origine

récente (coupes définitives en séries de conversion). Généralement, ce sont d'anciens grands vides. *Ils sont tous en voie de fermeture naturelle* (même quand ils n'ont pas fait l'objet de plantations depuis 1948). On peut en voir encore d'assez typiques dans les parcelles 27, 312, 314, 636, 917.

Nous croyons pouvoir affirmer nettement qu'en l'absence de coupes et incendies, il n'y a nulle part de stades régressifs naturels. Il n'y a, sous l'effet des seuls processus naturels que des stades progressifs et sylvatiques.

3. PEUPELEMENTS FORESTIERS (fig. 17):

Coupe schématique

FIG. 17.

A_0 = Epaisse couche humifère noire due à la molinie (tourbiforme).

A_{1d} = Couche éluviale délavée par la nappe perchée.

M_1 = Marmorisation tachetée.

M_2 = Marmorisation réticulée (fossile).

Les sols fortement hydromorphes (occupant les faibles dépressions ou les vides par incendies répétés) sont occupés par une végétation surtout graminéenne (molinie).

Aspects de la végétation forestière: sur les sols bruns des pentes, les fûts de chêne sont élancés (12 m), les hêtres sont bien venants, le taillis est à dominance de charme.

Sur les sols à marbrures très profondes, il en est de même. Le coudrier prend une certaine importance relative.

Sur les sols à marbrures peu profondes, le fût est moins long (8 à 10 m), les branches relativement plus importantes; les hêtres sont moins beaux; le taillis est plus clair, plus malingre, formé de bois blanc (coudrier...).

Sur les sols noirs de vides à molinie, les arbres sont rares, leur houppier est globuleux, étalé, on dit qu'ils sont « en pommier »; parfois même, ce ne sont que des arbustes rabougris. Le bois y est fréquemment gelivé et roulé; les hêtres ont un fût court et sont extrêmement branchus (3 stères par m³ de bois d'œuvre). Le taillis se réduit à quelques cépées de bourdaine, saule à oreillettes, aune glutineux,

4. HISTOIRE DU COUVERT VEGETAL:

4.1. HISTOIRE ANTÉRIEURE A 1875: qu'était la composition de la forêt primitive? il est difficile de la préciser. Certainement, elle était beaucoup moins riche en chêne; le hêtre, qui en a été chassé volontairement, occupait (peut-être par îlots) 3 à 6/10. Nous supposons avec ETTER, MORIER, GENOUD 1963 qu'il y avait une proportion notable d'essences « secondaires ».

La végétation primitive (pour fixer les idées, disons 2 000 ans avant notre ère) était formée:

1° de quelques aunaies allongées dans les fonds de vallon à eau courante (Clauge, Tanche).

2° de charmaies, avec chênes plus ou moins nombreux sur des sols bruns caillouteux des pentes.

3° de rouvraies basses et claires sur les sols les plus caillouteux.

4° sur la majorité de la surface, de hêtraies et hêtraies-chênaies (chêne en proportion variable).

5° par place, de peuplements un peu plus clairs à majorité chêne, avec quelques taches de molinie apparaissant après la chute des grands arbres morts: ces vieillards ne succombaient qu'à des âges avancés (150 ans sur mauvais sol, 250 ou plus sur les moins mauvais).

6° dans les légères dépressions du glacis quelques moliniaies avec chênes et bouleaux disséminés.

Lorsque la forêt a envahi les anciennes toundras périglaciaires, elle ne fut que faiblement attaquée par l'homme en raison de la difficulté du travail d'un sol compact et mouilleux; ce fut une futaie irrégulière à base de hêtre et (plus ou moins) de chêne; elle était un peu plus claire dans les zones à mauvais drainage, où déjà apparaissaient quelques taches de molinie. Quelques feux furent provoqués par la foudre et favorisèrent localement cette graminée; d'autre part, et surtout, les premiers incendies allumés par les chasseurs ou les bergers contribuèrent à l'ouverture des peuplements. Les populations s'installèrent en bordure, grâce aux conditions offertes par les Seigneurs, et grignotèrent la forêt; au Moyen Age et au XVI^e siècle l'accroissement de la population riveraine et l'accroissement des besoins unitaires par foyer déterminèrent une exploitation plus forte (surtout en bois de feu).

Il est probable que l'évolution sous l'influence de l'homme a provoqué:

1° une régression considérable du hêtre (de 60 % à 21 %) réduit actuellement dans le taillis-sous-futaie, à quelques îlots résiduels de hêtre-chêne.

2° une extension énorme du chêne,

3° une extension de la molinie, qui a décuplé sa surface; avec elle ont augmenté la bourdaine et les saules.

On peut se demander les raisons de la prédominance du chêne. Nous pensons qu'elle résulte d'une longue évolution guidée par l'homme. Ces raisons sont:

1° le chêne était recherché pour son gland, pour son bois de charpente, son bois de fente, son écorce à tan.

2° il résistait bien à l'incendie, tandis que le hêtre en mourait.

3° il supportait bien la lumière et les remontées du plan d'eau accompagnant l'état clair nécessité par le pâturage; il se régénérât bien à l'état clair.

4° il rejetait bien, tandis que le hêtre rejetait mal.

5° le feuillage de chêne était un fourrage un peu meilleur que celui du hêtre (motif pour le favoriser).

6° les verriers recherchaient la fougère dont l'extension exigeait l'élimination du hêtre, non celle du chêne.

Ainsi à la hêtraie-chênaie a succédé une chênaie en grande partie artificielle.

En 1607, un Edit interdit la coupe de jeunes hêtres « moindres que la grosseur d'un essieu de chariot »; il exige qu'on « garde forêt », c'est-à-dire qu'on n'extrait que 2 tiges sur 3, ou 3 sur 5: ce souci est admirable.

Des cordons de futaies sont conservés sur le bord des coupes pour les délimiter et pour assurer une certaine réserve permanente des gros bois.

Des vicissitudes nombreuses, dues au besoin des industries locales, firent le plus grand tort à la forêt. Le dernier aménagement était celui de 1889 qui était encore en taillis-sous-futaie. Dans l'ensemble, on peut dire que, pendant au moins 3 siècles, le sol a été découvert pendant 15 ans sur 30, que la couverture végétale fut formée de taillis plutôt que de futaies et que cette couverture fut à dominance de chêne. La connaissance de cet état de chose est capitale, pour la compréhension de l'état actuel dégradé du sol; heureusement les forestiers ont agi, surtout après 1878, dans un sens conforme aux intérêts de la forêt, en serrant les balivages. Le nombre des baliveaux à l'hectare est passé de 1824 à 1947, de 24 à 142, celui des modernes de 5 à 60; celui des anciens de 1 à 25. La réserve moyenne ($\frac{1}{3}$ des baliveaux + modernes + 3 fois les anciens) est passée ainsi de 16 à 182. Il convient de rendre hommage à certains forestiers: LORENTZ, Conservateur GRANDJEAN, Inspecteur de MONTFERRAND, Inspecteur adjoint VAULOT, Inspecteur adjoint LAINEZ.

En 1945 est apparue évidente à tous les Officiers l'opportunité de convertir en futaie. Le projet fut donc élaboré et présenté en

1956. La conversion par une méthode originale et bien adaptée aux caractères des diverses 1 403 parcelles, présente de nombreux avantages pédologiques (meilleure structure, plus grande profondeur utile, meilleure activité biologique), sylvicoles (diminution des incendies, régénération mieux assurée, peuplements plus stables), économiques (produits plus utiles, revenus triplés). Certes, elle exigera un personnel plus nombreux et, au début, nécessitera des investissements, mais sa réussite nous paraît assurée de façon absolument certaine.

4.2. HISTOIRE RÉCENTE: dès avant la conversion décidée en 1956, deux mesures étaient apparues très favorables:

4.2.1. *Viellissement de taillis*: il y a 60 ans, la mévente des bois de feu avait amené les exploitants à laisser sur pied de mauvais taillis.

Ils permettent de fructueuses observations sur les modalités du retour de la forêt sur mauvais sol (développement de la chênaie sur souches, fermeture progressive du couvert, régression nette de la molinie, installation de semis...). Nous-même avons, entre 1946 et 1956, décidé le vieillissement de zones délimitées à la peinture rouge, celles assez riches en hêtre ou celles trop dégradées.

4.2.2. *Balivages intensifs*:

a) c'est avec raison que l'aménagement de 1889 préconisait — ce qui malheureusement ne fut pas exécuté — la réserve de nombreux baliveaux à la périphérie des vides.

b) une expérience des plus intéressantes a été faite par l'Inspecteur adjoint LAINEZ. Pendant 3 ans (1933-1936) cet officier forestier a procédé à des balivages intensifs, réservant le maximum de « lances » dans le taillis, en particulier celles de hêtre, soit 1 000, ou plus, à l'hectare.

Or, après 30 ans, l'évolution des coupes ainsi martelées a été excellente: le couvert ne comporte plus de trouée; il s'est relevé, le hêtre prospère, la transformation en futaie sur souches s'opère, le sol est beaucoup plus propre, la molinie éliminée. L'expérience est concluante.

4.2.3. *Bilan de la conversion en futaie de 3 séries au XIX^e siècle*: il s'agit d'une expérience à grande échelle puisqu'elle porte sur 1 500 hectares (ancienne 3^e, 6^e et 10^e séries) et sur longue période (puisque'elle a commencé vers 1827).

Elle présente un caractère qui la rend spécialement intéressante, c'est qu'elle porte sur les sols de natures les plus diverses et sur les diverses formes de terrain de la forêt de Chaux. On y trouve, en effet, des sols caillouteux et limono-graveleux (surtout en 6^e

série), des sols de limons bruns des pentes non hydromorphes, des sols de limons à marbrures de plateaux aux divers stades d'hydromorphie.

Le peuplement primitif était un taillis-sous-futaie très varié avec des vides à molinie. Un cahier-affiche des ventes de 1835 nous a même donné des précisions numériques; il y avait 9/10 de chêne, 1/10 seulement de hêtre.

Or, à la suite de l'intervention de LORENTZ, prouvée par une lettre de lui, le vieillissement a été prononcé, le taillis fut ainsi maintenu sur pied, dans les diverses parcelles au cours d'une période de 30 ans.

Malgré les efforts de certains forestiers pour maintenir le chêne, le hêtre s'installa presque partout. Encore, en 1910, l'Inspecteur local recommandait au garde général d'ététer les hêtres au profit des chênes: ce fut en vain.

Le hêtre, essence d'ombre, envahit la surface sur 7/10; une partie, 1/10 seulement, fut conquise par le chêne, 1/10 occupé par le charme; 1/10 resta en trouées ou petits vides (surtout en X^e série).

Mais, sauf dans ces trouées, et malgré les erreurs sylvicoles (dues en particulier à la guerre 1914-1918), la régénération fut assurée, aussi bien sur les plateaux à sous-sol marmorisé que sur les pentes mieux drainées.

Le hêtre forme des perchis ou de jeunes futaies de 30 à 90 ans. Les diamètres vont de 10 à 40 cm. Le couvert est à peu près complet. La molinie (sauf dans quelques trouées) a disparu. Le sol est propre. C'est une réussite éclatante.

4.2.4. *Plantations*: on a planté anciennement des pins sylvestres dans les sols caillouteux et dans certains vides: le résultat a été excellent. On a planté récemment des sapins pectinés dans 4 parcelles: le résultat est bon. On a planté des épicéas: le résultat est moins bon. Depuis 1946, nous avons planté environ 3 500 000 plants de résineux divers.

Nous avons semé 16 tonnes de glands de *Quercus borealis*, qui ont donné environ 250 000 plants d'avenir.

Les résultats sont, dans l'ensemble, satisfaisants, sauf dans les plus mauvaises conditions (sols très hydromorphes), où les plants boudent.

Les essais de tremble hybrides sur mauvais sol n'ont pas bien réussi.

Les techniques opératoires trop expéditives au début ont été perfectionnées; par exemple l'emploi de la tarière-plantoir, qui lisse les parois, est à déconseiller.

Pour conclure, nous dirons que sous l'effet des usages traditionnels et des pressions économiques, la forêt a été, au point de vue du sol, très mal conduite depuis 20 siècles, particulièrement de-

puis 4 siècles. La connaissance de cette histoire nous fournit ainsi indirectement un argument pour sa restauration: on peut légitimement supposer qu'en changeant de méthode, et en prenant le contrepied des anciennes, on peut provoquer une révolution inverse, donc favorable. *Elle nous invite d'autre part à rester vigilant, car rien ne dit que des pressions analogues n'aient pas dans le futur, les mêmes effets catastrophiques. « Errare humanum est ».*

Bibliographie: BERCHEN 1951, DEUSE (d.d.), ETTER... 1963, GOOR (d.d.), GUINOCHET... 1950, HENRY 1943, MALLET... 1956, MATHON 1954, PLAISANCE 1949 (a et b), 1953 (c), TRIPIER, VAULOT 1910, WILDE (d.d.), ZITTI 1939.

CHAPITRE XV

EFFETS DU SOL SUR LA VÉGÉTATION

1. DÉFAUTS ANCIENS ET NOUVEAUX:

Le sol influe sur la végétation, c'est bien connu; mais comment faire la part de son état initial et de son état actuel, conditionné lui-même par la végétation antérieure ainsi qu'il est expliqué au chapitre XVI? C'est bien difficile. Essayons néanmoins d'analyser les défauts provenant les uns de la roche-mère et les autres de l'évolution fâcheuse ultérieure dans des forêts trop claires et sous des vides. Efforçons-nous d'étudier les répercussions sur la végétation forestière présente. Les défauts initiaux sont la richesse chimique insuffisante et la texture trop fine, non colloïdale. Les défauts acquis sont:

a) la saturation temporaire en eau asphyxiante de la couche moyenne, surtout si le couvert est insuffisant.

b) la dessiccation excessive, en été, due à la mauvaise structure, surtout si le couvert est insuffisant.

c) la pauvreté chimique (moins de 20 % d'argile et minéraux argileux peu fertiles). On sait (FRANC de FERRIÈRE) que les interstratifiés déjà appauvris par l'ouverture des feuillets fixent assez fortement les ions K^+ provenant de la litière ou des engrais, mais en libèrent peu au profit des racines des arbres. En ce qui concerne la vermiculite, la fixation est encore plus forte et la libération plus faible. Quant aux argiles amorphes, elles sont extrêmement pauvres, incapables de fixer et libérer des ions.

d) l'insuffisance d'humus en profondeur.

e) l'activité biologique insuffisante.

On peut ainsi considérer qu'il y a 3 écrans superposés dont chacun s'oppose à la descente des racines (fig. 18):

1° un écran supérieur intermittent constitué par la couche gorgée d'eau,

- 2° un écran inférieur (mais souvent trop haut placé) constitué par le sous-sol compactifié par l'action de l'eau,
- 3° un autre écran plus profond formé par le sous-sol qui a été induré ou cimenté par des phénomènes paléopédologiques; cette dureté, qui s'accompagne d'absence d'« eau utile », empêche la pénétration des racines et la vie des micropopulations.

En résumé, par suite de la présence de ces 3 écrans, il y a une diminution notoire de la profondeur meuble et vivante; dans les plus mauvais cas, il s'y ajoute la nature de l'humus qui, soit par son origine (molinie), soit par les conditions de sa formation (en milieu gorgé d'eau) est de mauvaise qualité.

L'examen visuel, l'essai au pénétromètre, la mesure de la densité apparente, celle des indices de structure aux divers niveaux du sol, la mesure des niveaux d'eau après une pluie permettent de jauger la valeur des sols.

LES 3 ECRANS

FIG. 18.

S	Surface
Cu	Couche utile.
E ₁	Premier écran partiel et intermittent: celui du niveau supérieur de la nappe perchée.
E ₂	Deuxième écran constitué par la partie supérieure de la couche marmorisée (toujours plus ou moins tassée mais non indurée).
E ₃	Troisième écran constitué par la partie supérieure de la couche indurée (action ancienne paléopédologique).
SSP	Sous-sol profond non induré.

En ce qui concerne leurs qualités chimiques, elles peuvent être attestées par des cultures en pots; d'ailleurs le simple examen de la végétation donne à un forestier des éléments d'appréciation très utiles: rectitude des fûts, longueur des pousses annuelles, accroissement en diamètre, allure de la ramification, couleur du feuillage...

2. VALEUR FORESTIERE, PRODUCTION LIGNEUSE:

2.1. ASPECTS QUANTITATIFS: des statistiques ont donné une exportation de 0,6 m³/ha/an de bois d'œuvre et 3 st./ha/an de bois de feu, soit au total environ 2,3 m³/ha/an, mais ces chiffres ne

correspondent pas à la production réelle, car il est d'usage, dans la région de l'Est, d'enrichir la réserve du taillis-sous-futaie, donc d'exporter moins que la production. L'accroissement des peuplements riches en chêne, compte tenu de la capitalisation, doit être d'environ 4 m³/ha/an, celle des peuplements riches en hêtre de 6 m³/ha/an.

Il est certain que les racines étriquées ou les racines brunes (en milieu asphyxiant) donnent une production moindre.

Quoi qu'il en soit, l'analyse des peuplements obtenus par conversion montre que la forêt de Chaux n'a rien à envier, dès la première génération de semis, à d'autres forêts de valeur moyenne. Ainsi, en 4^e Affectation en 1956, on a inventorié à l'hectare, à 45 ans, 900 tiges et 115 m³. Ces chiffres sont fort honorables, ils témoignent d'une densité et d'une croissance normale et satisfaisante.

2.2. QUALITÉ DU BOIS: nous avons constaté que les sols à marbrures portaient 3 ou 4 fois plus de chênes gélivés et roulés que les sols bruns profonds. La qualité est d'ailleurs forcément meilleure si les peuplements sont plus serrés, car il y a un meilleur élagage, même si l'humus est un humus doux. Nous n'avons pu établir la présence certaine d'éléments toxiques, mais l'hypothèse de cette existence n'est pas à rejeter. Il est incontestable que, sur mauvais sol, la croissance sérienne est freinée par la croissance des racines: la forme du houppier dépend étroitement de la forme des enracinement et la forme « en pommier » est en grande partie une conséquence du sol; elle se produit sur des sols n'ayant que 25 cm de profondeur. Au-delà de 60 cm on a, en général, des fûts élancés et un bois de bonne qualité. Entre 25 et 60 cm, il y a tous les intermédiaires.

M. le Conservateur LACHAUSSÉE a émis l'hypothèse très plausible que la gélivure était en relation avec l'état chimique.

	Ca	Fe	Rapport Ca/Fe
	—	—	—
Chaux (gélivé)	0.0312	0.0089	3.5
Saint-Aubin (non gélivé)	0.0589	0.0064	9.2

L'insuffisance de calcium et, peut-être, l'excès relatif de Fe expliquent-ils la fréquence de gélivure?

Richesse chimique: nous avons fait analyser des sols de la forêt de Fraisans sous chêne gélivé et non gélivé.

	Gélivé	Non gélivé
N %	2,81	1,73
P ₂ O ₅ ass. ^{0/100} (acide nitrique)	0,044	0,018
K ₂ O ass. ^{0/100}	0,012	0,150
Fe libre (acide oxalique) %	1,37	1,65
Mn total %	1,25	0,30

Il semble certain, dans ce cas, que l'insuffisance de P₂O₅, et surtout l'excès de Mn, sont responsables de la gélivure.

3. ENRACINEMENT :

L'étude de la forme et de l'importance des enracinements est bien souvent insuffisante. On peut citer en exemple les travaux de la *Forestry Commission*, ceux de SAUVAGE et MARION au Maroc, ceux de KRAUSS, HARTEL, MÜLLER, GARTNER et SCHANZ 1939 en Allemagne.

KREUTZER en 1961 a étudié les enracinements de jeunes arbres de 20 à 40 ans sur sols à pseudogley analogues à ceux de la forêt de Chaux ; il a trouvé que les racines de sapin pectiné pénétraient davantage que celles d'épicéa dans le sous-sol marbré. Ce résultat est important pour la reforestation artificielle.

Nous avons observé des enracinements en forêt de Chaux :

Chêne: une grosse racine centrale et quelques fortes racines obliques. Elles se subdivisent en racines plus petites. Quelques-unes, de très petite taille, surtout chez les vieux arbres, pénétrant dans la couche marmorisée, soit qu'elles se soient accommodées des conditions qui y règnent, soit que les marbrures aient légèrement remonté depuis l'installation de l'arbre à sa place.

Chêne rouge d'Amérique: les principales racines sont obliques, mais certaines s'étendent au loin en suivant les inégalités du sous-sol dur ; de fines racines descendent vers la profondeur, elles sont plus nombreuses que dans le chêne indigène.

Hêtre: enracinement très adapté aux mauvaises conditions régnautes parce que superficiel et doté de nombreuses fines racines sub-horizontales qui échappent aux inconvénients des défauts des couches profondes.

Pin Weymouth: un enracinement bien adapté, assez peu ramifié, suffit pourtant à assurer une bonne croissance des pins; mais probablement améliore-t-il peu la couche explorée.

4. CIRCONSTANCES DIVERSES:

4.1. CIRCONSTANCES PLUS FAVORABLES (qui expliquent la meilleure venue de certains peuplements): ce sont la présence, en profondeur, d'un sous-sol argileux formé d'une meilleure argile (VIII/25), la texture plus grossière en surface, le drainage interne local meilleur, la marmorisation plus profonde et moins marquée, la conversion en futaie qui augmente, certes, l'exportation de bois, mais qui augmente encore plus le circuit nutritif et la quantité de matières organiques retournant au sol, régime qui, d'ailleurs, exporte des produits chimiquement moins épuisants.

4.2. CIRCONSTANCES DÉFAVORABLES: les gelées printanières, les fortes pluies printanières, la sécheresse estivale, toutes les causes de tassement du sol.

La médiocrité de la végétation forestière au centre des plateaux s'explique par:

1° l'absence de drainage latéral (compacité des couches moyennes) et vertical (imperméabilité quasi-totale des couches profondes):

EVOLUTION DE LA VEGETATION ET DE SOL DE PLATEAU

l'imperméabilité primitive a été aggravée par le lessivage ancien (en particulier celui de la montmorillonite).

2° la désagrégation des minéraux argileux (surtout dans les horizons superficiels des zones à molinie) provoquant l'appauvrissement chimique d'un matériau initialement peu riche.

Nous ne pouvons toutefois nous montrer pessimistes. Il y a un peu partout des signes prouvant que, lorsqu'est pratiquée une sylviculture prudente et adaptée, la végétation peut être fort satisfaisante, car ici, comme ailleurs, la végétation forestière sait tirer un bon parti de sols réputés « mauvais ».

Bibliographie: DUCHAUFOUR (d.d.), KREUTZER 1961, LACHAUSSÉE 1950, MATHY 1939, RID 1958, ROUSSEAU 1960, SMITH 1945, WILDE (d.d.).

CHAPITRE XVI

EFFET DE LA VEGETATION SUR LE SOL

1. EFFETS GENERAUX

DU COUVERT VEGETAL (analyse de son action):

1.1. FONCTIONS D'UNE VÉGÉTATION VÉRITABLEMENT FORESTIÈRE: l'analyse de ce que les forestiers appellent d'un seul mot le « couvert forestier » aboutit aux fonctions:

1° *Fonction-parapluie*: nos mesures ont montré que la quantité d'eau entrant dans le sol était fortement diminuée.

2° *Fonction-écran* au sol par la litière: nous l'avons mesurée, voir paragraphe ci-dessous. Le glaçage et l'érosion sont diminués ou empêchés.

3° *Effet-pompe*: (qui envoie dans l'atmosphère l'eau excédentaire de la nappe perchée). L'eau qui entre dans le sol sert à accroître le taux d'humidité du sol, à nourrir la nappe qui vient de naître, et à alimenter les racines.

Si l'on multiplie la matière sèche produite à l'hectare, soit 7 000 kg par 500 litres d'eau (quantité évaporée pour 1 kg), on trouve 3 500 m³, soit une lame d'eau de 0,35 m par an.

Les teneurs en eau du sol s'accroissent après les pluies de, par exemple, 25 % pour amener le sol à saturation; au-dessus, l'eau forme nappe. Pour faire passer le sol de 10 à 30 % d'eau (avec une porosité de 50 %) il faut une lame d'eau d'environ 10 cm.

L'effet total de la fonction-parapluie et de la fonction-pompe est de provoquer un abaissement relatif du niveau d'eau dans le sol de 10 à 30 cm (fig. 20).

4° *Fonction-parasol*: l'écran de verdure et celui de la litière empêchent la dessiccation excessive en été. Le couvert forestier normal enlève de 50 % à 98 % de la lumière. L'évaporation est fortement

FIG. 19.

Les mesures de niveau d'eau ont montré l'existence nette d'un entonnoir à l'aplomb des arbres.

- - - - - id — 30cm.

- - - - - id — 130cm.

ralentie en été; le taux d'humidité du sol est légèrement augmenté. Cet effet favorise la pullulation de la petite faune édaphique et de la microflore.

5° *Effet-affouillant des racines profondes*: ailleurs, elles parviennent à désagréger les roches; elles arrivent, pour les sols qui nous occupent, à diviser les sous-sols consolidés, donc à y faire pénétrer l'eau, l'air, l'humus. Ce sont surtout les arbres de futaie et, parmi eux, les plus vieux, qui exercent cette fonction, surtout ceux à racines pivotantes ou obliques.

6° *Approvisionnement en matières organiques*, donc en humus (rémanents, feuilles, racines):

a) résidus ligneux (rémanents) non exportés; c'est même la totalité de la production ligneuse qui reste sur place dans le cas de *réserve totale* du peuplement (« mise à ban »).

b) racines qui pourrissent dans le sol même, à divers niveaux.

c) fixation de l'azote de l'air.

Ces matières organiques agissent directement sur la structure (action directe).

Les acides humiques eux-mêmes qui en résultent ont, eux aussi, une action multiple:

a) ils agissent sur la structure: les micro-enduits forment des voiles sustentateurs permettant une structure érigée poreuse.

b) ils absorbent de l'eau et augmentent ainsi la réserve hydrique disponible.

c) par leurs propriétés adsorbantes, ils augmentent la capacité d'échange puisque leur adsorption s'ajoute à celle des colloïdes minéraux (argiles feuilletées).

d) ils augmentent l'assimilabilité du phosphore et du potassium, et ils facilitent la libération de l'azote.

e) ils favorisent l'activité microbienne, qui est fixatrice d'azote, et, à son tour, génératrice de bon humus.

f) par contre, l'apport de tanin est nuisible. En définitive, leur action est généralement bénéfique.

Il faut noter, toutefois, que les matières organiques mal décomposées n'ont pas les mêmes effets, ni certains de leurs dérivés, en particulier ceux nés en milieu gorgé d'eau et asphyxiant. Dans ce cas, il peut y avoir rétention excessive d'eau et propriétés chimiques défavorables.

7° *Effet restituitif*: restitution aux couches supérieures d'éléments minéraux arrachés au sous-sol par celles des racines qui sont

les plus profondes : ainsi sont rendus disponibles pour la végétation forestière elle-même (ou pour toute autre qui la remplacerait) des éléments qui sont mis sous forme aisément assimilables. Ainsi P_2O_5 , K_2O , CaO .

8° *Effet biotique*: les matières organiques accroissent la petite faune qui est mieux nourrie et les racines sont les véhicules d'une microflore rhizophile.

9° *Acidification de l'eau de pluie*: elle acquiert des propriétés faisant évoluer le sol minéral : action lessivante et marmorisante. C'est le cas :

a) de celle qui a traversé la litière,

b) de celle qui lave les feuilles et les écorces : on a constaté que l'eau qui avait coulé le long des troncs de hêtre avait un pH de 4,5 tandis que celle des troncs de chêne avait un pH de 7 : on peut donc attribuer une partie des particularités du sol à l'aplomb d'un hêtre à cet écoulement de l'eau sur les feuilles.

10° *Effet assainissant du réseau de conduits* formés par les grosses racines vivantes et mortes.

1.2. CONSÉQUENCES POUR LE SOL (fig. 16, 18, 19) :

1.2.1. *Diminution d'épaisseur et surtout de durée de la nappe aquifère perchée à éclipses* (voir chapitre IV).

1.2.2. *Structure et porosité*: nous avons fait de nombreuses mesures qui ont montré que sous les meilleurs peuplements ces facteurs étaient meilleurs. Or, on peut légitimement penser qu'ils ne sont pas forcément situés sur des sols meilleurs, mais souvent sur des sols originellement identiques. Voir aussi RICHARD 1950.

1.2.3. *Propriétés chimiques*:

1.2.3.1. *Pouvoir améliorant*:

1.2.3.1.1. *Données de divers auteurs* (WITTICH, LUTZ): les analyses foliaires rendent de grands services, mais leur interprétation appelle les observations suivantes :

1° les teneurs des feuilles dépendent dans une certaine mesure de la teneur du sol : sur sol pauvre, elles sont plus faibles ; mais les différences ne peuvent guère suffire à caractériser un sol.

2° par contre, il y a une sélection spécifique pour chaque essence ; chacune peut puiser en sous-sol certains minéraux et les restituer à la surface ; si elle restitue davantage, elle a ainsi un rôle améliorateur marqué. Sous la réserve de l'observation précédente, les analyses foliaires renseignent donc sur les qualités améliorantes des diverses essences.

1.2.3.1.2. *En forêt de Chaux:*

a) les analyses foliaires ont été faites par le laboratoire de la Station d'Agronomie de Dijon.

	Ca %	Mg %	K %	P ₂ O ₅ %	S %	N %
Charme	0.94	0.35	1.04	0.31	0.13	1.10
Molinie	0.23	0.16	0.52	0.14	0.15	2.12

Sauf en ce qui concerne l'N et le S, les chiffres sont très inférieurs pour la molinie: c'est un peu le reflet de la pauvreté du sol, c'est en tout cas l'indication que la restitution est plus faible, que le sol se maintient à un niveau de fertilité plus bas.

Le calcium est arraché aux rares minéraux calciques existant dans la couche-support (à l'extrémité des racines) et ramené en surface, d'où il descend dans la couche moyenne explorée par la plupart des racines.

On peut donc penser a priori, que le charme (et à moindre degré le hêtre) sont des améliorateurs du sol superficiel puisqu'ils l'enrichissent en calcium. Au contraire, l'effet de la molinie est nul à ce point de vue.

b) on a comparé les teneurs des feuilles de chêne rouvre (prises sur l'arbre) sur bon sol et sur mauvais sol (chêne « en pommier »). (Analyses faites au Laboratoire de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace).

		Rouvre		Pédonculé	
		Bon sol	Mauvais sol	Bon sol	Mauvais sol
N	%	2.19	2.30	2.53	2.91
P ₂ O ₅	%	0.33	0.23	0.37	0.33
K 20	%	0.69	0.65	1.24	1.10
CaO	%	2.07	0.98	1.29	1.23
MgO	%	0.46	0.44	0.40	0.46

La S.C.P.A. a fait également une série d'analyses:

1 — chêne rouvre, sol graveleux	8 — hêtre sur sol siliceux pauvre à sous-sol marmorisé
2 — chêne rouvre, bon sol	9 — aulne sur mauvais sol
3 — chêne rouvre, sur arbre « en pommier »	10 — bourdaine sur mauvais sol
4 — chêne pédonculé sur bon sol	11 — coudrier sur mauvais sol
5 — chêne pédonculé sur mauvais sol	12 — charme (bord de vide)
6 — hêtre sur calcaire	13 — molinie sur sol à sous-sol marmorisé
7 — hêtre sur sol siliceux à per-venche	14 — chêne rouge d'Amérique,

N°		1	2	3	4	5	6	7
	N %	2.62	2.19	2.30	2.53	2.91	2.24	2.17
P ₂ O ₅	%	0.41	0.33	0.23	0.37	0.33	0.36	0.45
K ₂ O	%	0.97	0.89	0.85	1.24	1.10	1.36	1.42
CaO	%	0.95	2.07	0.98	1.29	1.23	1.43	1.51
MgO	%	0.56	0.46	0.44	0.40	0.46	0.42	0.44

N°		8	9	10	11	12	13	14
	N %	2.24	2.70	2.69	2.57	2.41	1.90	1.99
P ₂ O ₅	%	0.36	0.32	0.40	0.31	0.33	0.32	0.32
K ₂ O	%	1.20	1.02	1.72	1.20	0.80	1.93	1.08
CaO	%	1.54	1.12	1.40	1.54	1.26	0.34	1.23
MgO	%	0.44	0.56	0.64	0.64	0.62	0.38	0.44

Le chêne pédonculé et l'aune ont les feuilles les plus riches en azote.

Le hêtre sur sol à pervenche est le plus riche en P₂O₅.

La molinie et la bourdaine sont les plus riches en K₂O.

Le chêne rouvre sur bon sol est le plus riche en CaO (2,07 %).

Le hêtre a une teneur moyenne (1,5 % et 1,54 % peu différentes suivant le sol).

Le coudrier est le plus riche en MgO.

La molinie est de toutes les espèces la plus pauvre en CaO (0,34 % contre 0,95 à 2,07 %).

1.2.3.2. *Pouvoir dégradant*: les feuilles (ou les aiguilles) qui se décomposent mal donnent, on le sait, un humus acide à fort C/N; ce peut être le cas des pins. En ce qui concerne le hêtre, cette décomposition un peu lente des feuilles mortes ne nous paraît pas mauvaise, car elle a l'avantage de former un matelas protecteur de structure et ralentisseur de l'évaporation; le danger de dégradation par le hêtre est certainement beaucoup plus faible que dans des régions plus froides et plus humides.

Par contre, on peut considérer comme ayant une action nocive le chêne et l'épicéa dont les feuilles fabriquent beaucoup de tanin (LAATSCH 1937: expériences de laboratoire). En ce qui concerne la molinie, il est probable que son action est très néfaste, il est possible que ce soit par la présence d'acide cyanhydrique (ZIRTTI 1934); certainement, en tout cas, par sa richesse en silice et sa pauvreté en bases.

Teneurs en tanin: Ecorce: de chêne 7 à 20 %; de chêne rouge d'Amérique 5 à 6 %; d'aune glutineux 15 %; de saule 10 %; d'épicéa 2 à 8 %; de bouleau 4 %; de hêtre 2 %.

Bois: de châtaignier 8 %.

Racines de chêne de forêt de Chaux (Lyon 1964) 2,6 %; sciure de racine de chêne (Lyon 1964) 2,2 %.

Souches de bruyère 10 %.

1.2.4. *Effets indirects*: l'augmentation du couvert a des effets sur le peuplement végétal qui se répercutent sur le sol. C'est ainsi qu'il se produit l'envahissement du hêtre dont la fonction-parapluie et la fonction-pompe sont nettement plus marquées.

C'est ainsi qu'elle conduit à la disparition de la molinie, donc à l'amélioration de l'humus.

2. EFFETS SPECIFIQUES DU COUVERT VÉGÉTAL:

2.1. CHÊNE ROUVRE ET PÉDONCULÉ - *Avantages*:

a) il supporte bien les conditions de sol compact et pauvre ainsi que la nappe intermittente.

b) sa régénération est relativement facile si on prend soin de l'amélioration de l'humus.

Inconvénients:

a) son couvert est peu dense, surtout dans le cas du pédonculé, d'où une fonction de parapluie relativement réduite.

b) sa croissance est relativement lente.

c) son bois sur sol pauvre est de mauvaise qualité; il est fréquemment roulé et gélivé.

d) son tanin est nuisible au sol.

e) son enracinement est peu ramifié, d'où un pompage relativement faible.

f) sa dépouille est relativement faible.

Tous ces défauts sont une raison de l'éliminer partiellement.

Néanmoins, les sols de taillis vieilli de chêne ont tendance à s'améliorer lentement; aux endroits où il est installé on peut profiter, comme premier stade, de sa présence.

On notera que le chêne rouvre est, en général, mieux adapté et plus efficace sur des sols dont les réserves hydriques et nutritives sont peu élevées; son couvert est un peu plus dense et sa dépouille un peu plus forte; on pourrait, un peu théoriquement, imaginer une première génération de rouvre suivie d'une deuxième de pédonculé, si cette essence était conservée.

2.2. CHÊNE ROUGE D'AMÉRIQUE: ses *avantages* sont:

- a) c'est un améliorateur du sol par remontée des bases.
- b) son enracinement, très ramifié, assure un bon pompage.
- c) son feuillage dense forme un bon écran.
- d) sa litière épaisse, de décomposition un peu lente, protège bien le sol contre les pluies.

e) sa forte dépouille donne une grande quantité de matières organiques. Notons, par ailleurs, que sa croissance rapide, sa faculté de rejeter fortement et de se régénérer aisément par semis, le font également apprécier, mais il n'est pas sans inconvénients: il boude sur les mauvais sols et, de façon plus générale, montre une croissance très irrégulière d'un sujet à l'autre dans le jeune âge (voir les résultats de nos mesures au chapitre V).

2.3. HÊTRE: *avantages*:

a) tous les effets imputables à l'accroissement du couvert sont obtenus avec lui.

b) il provoque une forte remontée en surface du calcium du sous-sol.

c) sa dépouille est abondante.

d) son enracinement plus ramifié divise bien le sol.

Notons sa croissance rapide: 1 fois $1/2$ à 2 fois celle du chêne, à égalité de fertilité de sol.

Inconvénients: il est très sensible au feu: il ne faut donc pas laisser la molinie s'installer sur les bords des hêtraies, ni dans les trouées.

Nous ne pensons pas qu'on puisse craindre son action dégradante comme on l'appréhende en Belgique (GALOUX 1953). En tout cas, il n'est pas responsable des défauts des sols de la forêt de Chaux qui relèvent soit de la paléopédologie, soit d'un découvert excessif. Si, comme nous le pensons, le hêtre est à sa place dans une certaine proportion, en forêt de Chaux, il amène un vieillissement très lent du sol (qui le rapproche d'une mort lointaine): elle est normale, mais non pathologique. En tout cas, nous n'avons pas, en forêt de Chaux, observé d'humus tourbeux dangereux dû au hêtre.

2.4. AUNE: *avantages*:

a) c'est un puissant améliorateur du sol par ses remontées minérales.

b) il effectue un bon pompage.

c) il constitue un bon écran.

d) sa feuille a une décomposition rapide.

e) c'est un enrichisseur en azote.

Notons sa croissance assez rapide.

Inconvénients: il donne des produits de faible valeur.

2.5. CHARME: *avantages:*

a) ses remontées sont améliorantes.

b) il a un bon couvert.

c) ses feuilles ont une décomposition rapide.

Notons qu'il rejette avec abondance.

Inconvénients:

a) il donne des produits de peu de valeur.

b) il ne supporte pas les sols à nappe perchée fréquente.

Notons qu'il concurrence dangereusement les semis de chêne.

2.6. TREMBLE: BÜRGER le considère comme défavorable car sa fane se décompose mal: $C/N = 49$; mais il occupe utilement des places vides.

2.7. COUDRIER: *avantages:* sa feuille est à décomposition rapide, c'est donc un améliorateur de sol. Remarquons que son léger couvert est favorable aux semis de chêne.

Inconvénients: l'effet d'interception de l'eau de pluie est faible.

2.8. BOULEAU: il a un couvert faible mais il est rustique; il vient bien après incendie; sa feuille est tendre. Sur sol podzolique, les Anglais (DIMBLEBY, BLOOMFIELD, WALKER) le considèrent comme ayant une forte action biogénique regradante; on ne sait si elle est aussi nette sur sol marmorisé.

2.9. LA BOURDAINE dont la feuille se décompose vite et le SAULE A OREILLETES ont probablement une action faible mais, comme ce sont les premiers stades de reconquête, ils peuvent, en attendant de céder la place à d'autres essences, jouer un rôle utile.

2.10. LE ROBINIER serait utile: nous avons constaté que ses racines se développaient bien dans des sols marmorisés en déblais.

2.11. PIN SYLVESTRE: *avantages:*

a) son couvert persistant toute l'année effectue, au total, une bonne interception.

b) sa litière épaisse forme un bon écran.

Remarquons que sa croissance est assez rapide.

Inconvénients:

a) son humus est de moins bonne qualité que celui des feuillus; il ne restaure que peu ou pas la structure.

b) il offre un danger d'incendie tant par la résine que par la persistance de la molinie sous son couvert insuffisant.

2.12 PIN WEYMOUTH: a des propriétés analogues, mais sa croissance est plus rapide et son couvert meilleur; il convient de porter à son compte sa parfaite adaptation à des conditions très ingrates; elles lui permettent de subsister, donc de jouer un rôle, en définitive, très utile. Ce sera au moins une essence d'accompagnement ou une essence transitoire à propager largement.

2.13. L'ÉPICÉA a un couvert dense, mais il pousse souvent mal; il est exposé aux bostryches; son enracinement s'adapte bien aux mauvaises conditions, il s'étale donc en surface, d'où le danger de chablis; et pas d'amélioration du sous-sol.

2.14. LE DOUGLAS ne convient que dans les sols pas trop mal drainés.

2.15. LES DIVERS SAPINS, suivant les auteurs allemands, ont des racines qui descendent plus profondément que celles de l'épicéa dans le sous-sol marmorisé; d'autre part, la richesse des aiguilles est supérieure à celle des pins: ils ont donc un intérêt certain.

2.16. ESSENCES DE TRANSITION: on remarquera donc que certaines essences méritent d'être employées comme essences de transition, afin d'utiliser au mieux les forces naturelles et de diminuer les investissements: ce sont l'aune (à planter), le coudrier (à favoriser dans les chênaies claires), le charme (qui pourra encercler certains vides), le bouleau, le chêne rouge, les pins sylvestre et Weymouth et parfois les gaulis de chêne (dans les endroits où le hêtre n'est pas encore présent).

2.17. LA MOLINIE est, certes, bien adaptée aux conditions alternantes et asphyxiantes; elle remplace ses racines mortes par de nouvelles qui naissent au-dessus du collet; elle pousse vite et élimine ainsi les autres graminées; elle peut même, parfois, lutter victorieusement avec les arbres. Cette adaptation ne saurait donc être considérée comme un avantage, au contraire; elle a, il est vrai, un pouvoir structurant, c'est son seul mérite, mais *elle a une action indiscutablement très néfaste:*

- a) elle n'intercepte pas l'eau de pluie: la nappe monte.
- b) son réseau de racines est extrêmement ramifié, d'où une concurrence néfaste pour les essences forestières.
- c) elle forme des touffes sur lesquelles les glands restent posés, en surélévation, au sec, d'où des échecs de régénération: la molinie tend à supplanter la forêt.
- d) elle ombrage les semis en été; l'hiver elle leur nuit en se couchant sur eux.
- e) elle est un aliment de choix pour le feu (qui détruit les arbres): d'où l'action nocive sur les arbres qui la surmontent et aussi sur les peuplements voisins (extension des vides initiaux); comme elle rejette bien après le feu, elle est très dangereuse.

f) propriétés chimiques: elle est riche en SiO_2 , pauvre en Ca; elle a un C/N élevé: elle donne donc un mauvais humus.

Selon Gabriel BERTRAND, la molinie contient beaucoup moins de Mn (66 g/kg de m.s.) que la canche flexueuse (155) ou que la luzule (421); elle se comporte comme le calamagrostis qui a, lui aussi, mauvaise réputation.

Selon HÖHNE et FIEDLER 1963 les tissus de la molinie qui a cru sur sol à pseudogley de Tharandt ont une très faible teneur en calcium (la plus faible de toutes les graminées); celle-ci reste constante au cours de la saison de végétation; la teneur en azote va en décroissant; celle en potassium également; celle en silicium croît de 1,3 % (de la substance sèche) à 4,8 % (soit 1,2 g/m² de surface de feuille); elle reste néanmoins plus faible que celle de *Carex briozoides* ou *Deschampsia caespitosa*; qu'il s'agisse de Ca, K, P, Mg... les teneurs de la molinie sont, dans l'ensemble, inférieures à celles des autres graminées. Ceci est en relation avec le fait qu'elle pousse bien, non concurrencée, sur les sols les plus pauvres. Et cela implique que la restitution au sol par la litière de molinie ne permette qu'un enrichissement faible ou nul. Ce n'est qu'en ce qui concerne le Na et le Mn qu'elle peut soutenir la comparaison avec les autres.

D'autre part, les analyses des feuilles vertes et sèches montrent que ces dernières ont perdu la majeure partie de leur Mg, de leur P, de leur K et de leur N; par contre, le Na et le Mn subsistent, la teneur en silice augmente.

Comparée à la luzule (qui occupe, rappelons-le, les sols voisins mieux drainés), la molinie, selon HÖHNE et FIEDLER est plus pauvre en K, plus pauvre en Mn, plus riche en Si, la capacité totale d'échange T est plus élevée, mais le taux de saturation plus bas (12 % contre 17 %).

Le rapport C/N est, par exemple, de 47 (contre 28 pour *Milium effusum*) (mais 76 pour *Calamagrostis epigeros*); il est beaucoup plus faible (20) en été qu'en hiver (85).

Quoi qu'il en soit, son humus noir, souvent tourboïde est mauvais. Peut-être est-elle, par ses sécrétions, nocive aux végétaux forestiers: rien ne le prouve. Des essais d'arrosage de semis en pots avec des jus de molinie n'ont pas affecté la croissance de semis de chêne. Elle est surtout nuisible par son enracinement très conquérant et, à la longue, par la moindre restitution (feuilles plus pauvres en bases). Ce sont surtout les conditions asphyxiantes dans lesquelles elle se complait qui sont funestes, soit directement, soit indirectement, par le mauvais humus qu'elle donne à partir de ses feuilles.

Peut-être sa nocivité est-elle indirecte par action défavorable sur la microflore (y compris mycorrhizes), semblable à l'action de la callune signalée par W.-R.-C. HANDLEY (Cf. Boullard, *R.F.F.*, fév. 1964, p. 141): c'est possible, non démontré.

Il ne faut pas oublier que c'est avant tout le découvert (corrélatif de la présence de la molinie) qui est funeste. Nous n'en voulons comme preuve que la présence de chênes qui ne semblent pas souffrir (si ce n'est d'un ralentissement de croissance) en pleine moliniaie.

2.18. LA CALLUNE: l'influence très funeste de la callune (autrefois beaucoup plus étendue en forêt de Chaux) est certaine. Elle a été étudiée ailleurs par CAJANDER, GRABNER, HENRY, JEFFERIES 1916, LUNDEGARTH, HANDLEY, etc.

Par la teneur en lignine de ses feuilles coriaces, elle a certainement une action podzolisante et par conséquent marmorisante (puisque la marmorisation est une micropodzolisation, une endopodzolisation).

Heureusement, elle est plus sensible que la molinie à l'ombrage, et après avoir couvert de grandes surfaces, elle a presque disparu. Son action pédologique, depuis que les peuplements sont plus serrés, relève donc du passé.

2.19. GENÊT: le genêt à balai contient 25 % de CaO; son extension naturelle serait probablement utile à la restauration des sols, mais il ne vient que sur les sols de pentes, non sur ceux de plateau.

3. EFFET DE LA LITIÈRE:

Interception de l'eau: nous avons, en 1955, mesuré l'écoulement au travers d'une litière artificielle. A travers la litière simple:

Chute et lame d'eau qui a traversé (en 1/10 de mm)

Chute	écran simple	écran double
1	0	0
17	10	4

56,5 % de l'eau de pluie ont traversé; à travers la litière double: 19,9 % seulement. L'effet d'écran fut total ou très important pour les pluies fines, relativement moins important pour les fortes pluies.

4. EFFET DU DECOUVERT:

4.1. EFFETS DIVERS: les effets du découvert se déduisent de ceux que nous venons d'étudier. En raison de l'importance du découvert en forêt de Chaux jusqu'à nos jours, la question mérite d'être traitée.

Le découvert expose le sol à la pluie et à l'insolation:

1° la quantité d'eau de pluie qui entre dans le sol est nettement plus grande, même s'il y a de la molinie au sol; elle est par exemple de 20 % supérieure; elle crée la nappe perchée, ou elle l'exhausse (de 3 à 10 fois la hauteur de pluie tombée). Cette entrée est plus nocive si la température est plus froide.

2° le pompage est considérablement diminué puisqu'il y a succion bien moindre par les racines, même s'il y a un tapis de molinie.

3° cet exhaussement de la nappe est d'autant plus marqué que l'évaporation, non freinée par l'écran végétal, ou moins bien freinée s'il s'agit de molinie, empêche l'évacuation par l'atmosphère de l'excédent en période humide.

4° le choc des gouttes de pluie tasse la surface du sol riche en particules fines; elle le « glace », ce qui contribue à l'asphyxie interne.

5° il y a entraînement par les filets d'eau, lors des pluies violentes, de particules fines, donc diminution de la couche utile qui surmonte le sous-sol marmorisé, couche déjà de faible épaisseur; si cet entraînement atteint 0,5 mm par an seulement, en 300 ans, il représente 15 cm. Ainsi s'explique en partie la surélévation des touffes de molinie séparées par des bandes de sol nu en mauvais vide par érosion discrète.

6° l'insolation réchauffe le sol et accroît ainsi l'évaporation; celle-ci, en période sèche, amène le sol à un taux d'humidité insuffisant, dont parfois souffrent directement les plantes, qui, en tout cas, fait un tort énorme aux bactéries et à la microfaune dont le rôle est, on le sait, capital dans la dynamique chimique et la conservation de la fertilité. Cette dessiccation est d'ailleurs un facteur de marmorisation (reconcentrations et précipitations des hydroxydes).

7° l'action du vent devient plus forte: cette action peut être favorable si c'est en période de « table d'eau », défavorable si c'est en période sèche.

8° à la longue, le réseau de canalicules des grosses racines disparaît.

Notons d'ailleurs que l'action du découvert sur la végétation, par certains côtés, a une influence indirecte sur le sol :

1) le découvert favorise les essences de lumière, mais défavorise les essences d'ombre (ici le hêtre) qui sont justement celles préférables pour le maintien du bon état du sol.

2) il favorise la molinie qui est une héliophile très envahissante et propageant l'incendie : voir chapitre XV et ci-dessous, le paragraphe 5.5.

3) il favorise la callune, agent dégradant par excellence : voir chapitre XVII 2.18.

4) il favorise la roulure du chêne par les balancements des tiges insuffisamment résistantes.

5) il supprime les porte-graines, donc les chances de régénération forestière naturelle dans les trouées.

4.2. COUPE RASE : le cas extrême est celui de la coupe rase. Les fâcheux effets de la coupe rase (ou même de la coupe forte découvrant le sol) ont été décrits en d'autres lieux, par exemple par CAJANDER en 1909, MULTAMAKI en 1919 (Finlande); HESSELMAN en 1917, 1927, 1928; RUBNER en 1927 (Allemagne); NEMEC et KVA-PIL en 1927; ENEROTH en 1928 (Norvège); FRASER en 1929; WIT-TICH 1930; WIEDMANN 1928, 1934; DENGLE 1935; KIVEKAS en 1939; AREND en 1941 (Missouri : influence sur la perméabilité des sols forestiers); CHAPMAN; ETTER et MORIER (qui ont formellement déconseillé la coupe rase sur des sols analogues dans leur étude des forêts de la région de Genève).

Il est certain qu'il faut, autant qu'il est possible, la proscrire, pour toutes les raisons évoquées plus haut à propos de l'effet de la végétation.

4.3. EQUILIBRE : de façon plus générale, on doit constater qu'il y a interaction entre sol et végétation. La végétation agit sur le sol : en particulier en s'opposant à la naissance de la nappe perchée. Le sol agit sur la végétation. Si celle-ci couvre mieux le sol, elle pompe mieux l'eau de la nappe perchée : elle en réduit l'épaisseur et la durée après les pluies ; elle absorbe davantage de bases minérales dans le sous-sol et elle les restitue par la litière dans les couches moyennes où se trouvent les racines. Elle absorbe davantage de gaz carbonique (celui qui émane des microorganismes du sol et qui, une fois dans l'air, favorise peut-être l'assimilation chlorophyllienne). Une structure plus érigée et plus stable qui provoque une évacuation de l'eau et une oxygénation favorable, une quantité ini-

tiale un peu plus grande de bases minérales, d'autres facteurs favorables causent une végétation forestière plus fournie, plus vigoureuse.

Un sol bien boisé est, particulièrement dans le cas des sols marmorisés, plus fertile qu'un sol nu ou mal couvert, ou qu'un sol cultivé, et même très probablement qu'un sol enherbé.

Les cycles de l'azote et des matières minérales portent, pour une surface donnée, sur des quantités plus grandes si le peuplement est plus serré. Arbre et sol forment une association bénéfique réciproque.

On peut parler d'*équilibre entre sol et végétation*, ou plutôt d'équilibres multiples à des niveaux différents.

D'autre part, alors même que certains facteurs de production restent constants (texture, nature minérale des argiles), d'autres (structure, vitesse de circulation des bases...) peuvent être améliorés si la végétation est, en fait, meilleure.

Il en résulte que *la notion de fertilité d'un sol forestier est une notion bien relative; il y a des relations étroites entre la forêt et son sol; tout dommage causé à l'un endommage l'autre.*

4.4. DÉGRADATIONS CONJUGUÉES: la dégradation du peuplement est toujours artificielle et généralement rapide (quelques heures si c'est un incendie, 1 an par exemple si c'est une coupe). La dégradation du sol qui en résulte est assez rapide (quelques années). Elle suit un processus en chaîne, avec auto-augmentation (*autauxie*).

La restauration du peuplement précède, elle aussi, la restauration du sol. De sorte qu'il y a un perpétuel décalage entre l'état du sol et celui du peuplement; si l'on adoptait des classes de peuplement et de sol, on verrait que le peuplement est déjà dans la dernière lorsque le sol n'est encore que dans l'avant-dernière.

Alors que la descente de classe de sol se poursuit, celle du repeuplement peut remonter. Vient un certain moment où le sol progresse à son retour, mais c'est toujours avec un certain retard.

La médiocrité des peuplements de la forêt de Chaux explique en partie celle des sols et réciproquement; mais aux causes édaphiques profondes, parce que primitives, se sont ajoutées les causes d'origine humaine. C'est ce qui donne quelque espoir sérieux de restauration.

5. EFFETS DE PRATIQUES FORESTIÈRES DIVERSES:

5.1. EFFET DU SOUTRAGE ET DE LA RÉCOLTE DU FOURRAGE: les extractions de litière (fauchages, arrachages) (fougère, molinie, bruyère), les exportations de fourrage surtout ont été, du XI^e au XIX^e siècle, largement pratiquées. Ici comme dans d'autres forêts, elles se sont exercées davantage sur les bordures (actuellement constituées principalement de forêts communales) et autour des villages

de baraques installées en forêt. On sait que ces enlèvements exportent non seulement autant, mais davantage d'éléments nutritifs que les exportations ligneuses. Ces pratiques sont nuisibles à la structure, au taux d'humidité (diminution de 20 %). C'est ce qu'ont montré, entre autres, HENRY (E.) 1909, TRIPIER 1901, VAN GOOR 1963, WITTICH 1951, etc.

On peut estimer la quantité perdue par hectare par l'enlèvement de la couverture morte à 287 kg d'N, 44 kg de P_2O_5 , 21 kg de K_2O , 107 kg de CaO. On a calculé que la réduction de production ligneuse était de 2 m³/ha/an.

5.2. EFFET DU PÂTURAGE: le pâturage a été considérable: ainsi au XVII^e siècle entraient chaque année, 20 000 porcs, 20 000 bêtes à cornes, 2 000 chevaux, des chèvres. Ce pâturage a eu un effet variable; il est hors de doute que la fumure naturelle apportée par les déjections des animaux a été utile (équivalente à 500 kg de fumier par ha/an) (augmentation de matière organique de 0,6 %); le piétinement modéré, le fouissement par les porcs ont pu favoriser les régénérations et être favorables (surtout avant fainée ou glandée) si, ensuite, les troupeaux ont été écartés à temps des endroits améliorés.

Mais, d'autre part, que de semis et de rejets abrutis! que de piétinements excessifs ou intempestifs, après des périodes pluvieuses!

Tout autre est l'effet d'un pâturage modéré et réglementé et celui d'un pâturage excessif (surpâturage) et anarchique, tel qu'il était habituellement pratiqué, à une époque où la police de la forêt était insuffisante.

Que de délits de coupes commis par les pâtres! ébranchages pour donner les feuilles à leurs bêtes, éhoupages, ramassages de litière, coupe par les bûcherons (coupe à 2 ou 3 pieds de haut)!..

5.3. ACTIONS DIRECTES SUR LE SOL PAR L'EXPLOITATION EN FORÊT:

5.3.1. Dans cette forêt intensément exploitée pour les usines, a régné pendant plusieurs siècles une grande activité: d'où *piétinement* par les hommes et les animaux, d'où *tassement* d'un sol à structure particulièrement fragile.

5.3.2. Les implantations de charbonnières ont occasionné une dégradation locale du sol par les acides pyroligneux; nous y avons observé des types de sols marmorisés passant aux vrais gleys.

5.4. EFFET DES DÉFRICHEMENTS ET DES CULTURES VIVRIÈRES EN FORÊT: les cultures en forêt ont eu des effets très variables: si après une culture de peu de durée on a semé des glands de chêne,

dans une culture de seigle, ce qui probablement s'est fait quelque fois, le résultat a été bon et les arbres ont profité de la fumure (vraisemblablement d'ailleurs assez maigre).

Mais généralement ces cultures temporaires étaient abandonnées; le sol était envahi par la friche; les bruyères s'installaient et acidifiaient le sol qui se détériorait gravement. *Toutes les zones portées « places vaines et vagues » en 1725 sont aujourd'hui, en grande partie, reboisées, mais dans l'ensemble médiocres.* Sous ces cultures, il y a eu découvert, donc augmentation de la quantité d'eau entrant dans le sol; il y a eu, certes, brassage d'une mince couche superficielle ralentissant le lessivage; il y a eu, par contre, lissage d'une « semelle de labour » qui a accentué l'effet d'écran à un niveau d'ailleurs plutôt élevé, donc plus défavorable que l'écran primitif naturel. Peut-être est-ce à de telles cultures qu'il faut attribuer cette limite particulièrement nette entre les 2 couches non marmorisées et marmorisée que l'on observe parfois (I 14)?

5.5. EFFET DES INCENDIES: si les documents historiques sont rares, l'état de la végétation prouve nettement la fréquence des feux anciens, et la ressemblance des vides avec une savane boisée est frappante.

On peut supposer que le tiers de la forêt a brûlé 2 ou 3 fois par siècle pendant 3 siècles.

Les limites curieuses de certaines essences en bordure des vides justifient cette explication. Parfois, c'est une ligne de division de coupes qui, sur un même plateau, sépare deux formations végétales différentes sur un même sol original: c'est évidemment parce que le feu s'est arrêté (ou a été arrêté par des sauveteurs) le long de la dite ligne.

Qui plus est, *souvent cette limite coïncide avec une des lignes du réseau ouvert en 1775: c'est la preuve, dans ce cas, que certains des incendies causes de la dégradation sont postérieurs à cette date, c'est-à-dire qu'elle est récente.*

Ailleurs, la limite irrégulière n'est pas explicable, si ce n'est par l'arrêt accidentel du feu (chute du vent) ou par les mesures prises lors de l'un des incendies (les incendies suivants ont tendance à adopter les mêmes limites, du fait que la molinie est plus développée sur l'emprise du premier feu).

Ces incendies étaient allumés dans diverses occasions accidentellement par les charbonniers opérant en forêt, ou les bûcherons désireux de se chauffer, ou volontairement par les bergers pour régénérer le pâturage (technique encore classique Outre-Mer), par les verriers pour favoriser la fougère, pour la chasse, par représailles contre le pouvoir royal (ainsi au XVIII^e siècle).

5.5.1. *Effets utiles* (autres que ceux sur la repousse de l'herbe) ou au moins temporairement favorables.

1^o Combustion de l'humus mal décomposé (par suite de l'asphyxie) et nuisible (en particulier l'humus des graminées).

2^o Incorporation au sol, par dissolution des cendres des arbres, du matériel minéral, existant dans des espèces végétales sans valeur forestière (molinie, bruyère, saules...). D'où alcalinisation. D'où le « coup de fouet » bien connu. D'où peut-être, ralentissement du lessivage et de la marmorisation favorisant la fructification des essences précieuses (chêne) et la croissance des jeunes plants pendant 1, 2 ou 3 ans; cet effet heureux ne se produisait que si l'incendie survenait certaines années seulement et en particulier si par suite de l'humidité le feu se propageait lentement.

5.2.2. *Effets nocifs*: nous ne tiendrons pas compte de la perte sèche (arbres morts ou tarés au point de vue production forestière). Mais nous noterons les actions des incendies:

1^o ils favorisent la pullulation de la molinie qui seule rejette et dont les effets funestes sont certains (de multiples façons).

2^o ils détruisent les hêtres qui, en fait, peuvent exister isolés sur les plus mauvais sols (et qui auraient été les meilleurs agents de reforestation).

3^o ils créent un découvert qui augmente de 20 %, ou plus, la quantité d'eau entrant dans le sol en période pluvieuse et augmente l'évaporation en période sèche: d'où alternances hydriques accrues et marmorisation subséquente.

4^o ils détruisent en surface la microflore et la microfaune du sol (d'où un tassement par les pluies en surface) et éloignent temporairement les oiseaux et autres animaux jouant un rôle dans l'équilibre biologique local.

5^o on remarquera que les conditions ainsi créées, en particulier le développement d'une molinie prospère, déterminent des conditions favorables pour le retour du feu. Un premier feu est le début d'un enchaînement maléfique.

Le bilan est négatif: *les incendies sont la cause principale de la dégradation des peuplements et des sols en forêt de Chaux. Il ne faut jamais l'oublier pour comprendre l'évolution de cette forêt.*

6. TRAITEMENT FORESTIER PROPREMENT DIT:

6.1. MONOCULTURE DU CHÊNE: le chêne a été séculairement et systématiquement favorisé, soit sous forme de futaie en vue de la production des glands, nécessaires au panage des porcs, soit, à d'autres moments ou en d'autres endroits, sous forme de taillis

nécessaires à la production d'écorces à tan, soit par suite du feu qui lui donnait la supériorité sur le hêtre. Cette monoculture a eu un double effet :

a) couvert faible et restitution relativement faible de matière organique végétale.

b) action marmorisant sur le sol par action des dérivés des tanins.

On a là un bel exemple d'une spéculation économiquement intéressante, mais néfaste à la longue pour le milieu producteur.

6.2. EFFET DU TRAITEMENT EN TAILLIS : le traitement en taillis a un effet double :

a) il a provoqué des découverts fréquents tous les 20, 25 ou 30 ans et longs (près de 8 ans à chaque passage en coupe).

b) il a eu pour effet d'exporter relativement plus de petits bois que de gros bois. Or, on sait que l'épuisement du sol est, dans ce cas, très supérieur. D'après GRANDEAU, la teneur en cendres est dans la tige 0,36 % ; les branches 2,04 % ; l'écorce 6,34 % ; les feuilles 6,34 %.

Si, d'autre part, on tient compte de ce que le volume des branches pour un peuplement donné est, en général plus grand que le volume des fûts, on arrive à cette conclusion que l'exploitation forestière sous forme de petits bois (bois de feu, charbon de bois) est plus épuisante (7 fois) pour le sol que celle de bois d'œuvre (pourtant actuellement de beaucoup plus grande valeur).

c) l'exploitation à courte révolution a conduit, suivant les endroits, à l'envahissement du charme : les sous-bois composés d'essences variées sont ainsi devenues des « taillis à charme » ; il n'y a eu aucun inconvénient pour le sol, mais diminution de valeur du peuplement.

Quant à l'envahissement du coudrier sur les plateaux, il est certainement dû souvent à des coupes excessives ; c'est, il est vrai, un indice de dégradation plus qu'une cause.

L'envahissement récent du bouleau a la même origine ; il s'est jeté dans les vides, surtout après les feux : c'est un indice de dégradation, non un facteur de dégradation. *C'est au contraire un stade de reconquête.*

6.3. EFFET DE L'ABATTAGE MASSIF DES RÉSERVES : à plusieurs reprises, on signale, pour passer à l'état de taillis, des abattages massifs de réserves de futaie, en particulier de cordons de futaie précieusement conservés jusqu'au XVIII^e siècle : l'effet de ces coupes rases fut très funeste sur les surfaces ainsi exploitées.

6.4. ABUS DIVERS : de nombreux abus furent commis par les bûcherons et pâtres : mutilation..., qui contribuèrent plus ou moins au découvert du sol.

Peut-être les vanniers étaient-ils heureux de favoriser localement la bourdaïne, et les verriers la fougère !

En résumé, nous croyons pouvoir affirmer que *c'est toujours l'altération des peuplements qui a provoqué l'accélération de la marmorisation*. C'est la sommation de ces traumatismes (abus et incendies) qui, sur un support fragile, a provoqué par de fâcheux enchainements la formation des vides et clairières, la remontée de la marmorisation, l'influence de la molinie sur les horizons supérieurs.

Bibliographie : BOUDRU 1947, DUCHAUFOUR (d.d.), GALOUX (d.d.), HOLMES 1880, LIVENS... 1956, LOSSAINT 1951.

CHAPITRE XVII

BASES DE L'AMELIORATION

L'amélioration des sols hydromorphes peut être recherchée par des méthodes naturelles ou des méthodes semi-artificielles. Nous proposerons diverses méthodes qui résultent soit de nos observations et essais sur le terrain, soit de nos cultures en pots sur des sous-sols marmorisés, remués et aérés avec des sols témoins.

Il faut faire ici une remarque importante: ce n'est pas tant par elle-même que la marmorisation est nuisible. Certes l'hétérogénéité du milieu dans laquelle plongent les radicelles est fâcheuse pour leur bonne extension. Mais ce sont surtout les conditions asphyxiantes et trop alternantes, donc en définitive l'excès et l'insuffisance d'eau qui sont nocifs pour la végétation.

1. ETUDE PAR NATURE D'AMELIORATION:

Nous envisageons ici, surtout les objectifs à réaliser, plus que les modalités pratiques.

1.1. AMÉLIORATION PHYSIQUE:

1.1.1. *Texture*: on pourrait envisager, pour améliorer de tels sols, des apports de sable grossier; mais en forêt il s'agit d'un projet purement théorique; c'est réalisable en pépinière.

1.1.2. *Evacuation de l'eau*:

1.1.2.1. *Assainissement artificiel*: les assainissements en forêt ont fait l'objet de rares publications: BERAUD 1870, BURGER (H.) 1937; nous leur avons consacré un article en 1950 dans la R.F.F. (p. 553-563). L'assainissement des plateaux doit faire l'objet de techniques différentes de celles des vallées marécageuses.

Si l'on veut évacuer une lame d'eau de 30 % de la pluie arrivant au sol, c'est-à-dire 200 mm, soit 2 000 m³/ha, en 10 pério-

des de 3 jours, soit 30 jours, c'est-à-dire $30 \times 24 \times 60 \times 60 = 2\,000\,000$
 1 728 000 secondes, il faudrait un débit de $\frac{2\,000\,000}{1\,728\,000} = 1,1$ l/sec/

ha. En fait ce débit est rarement atteint, de sorte qu'un réseau de fossés n'arrive pas à faire disparaître la nappe.

D'après nos essais de limnigraphie, en étudiant la courbe du 16 au 22 mai 1955, on constate que (malgré un débit qui, par moments a atteint 60 l/minute après la pluie du 17 juin) c'est une lame d'eau de 1,6 mm seulement qui a été évacuée. C'est donc, compte tenu de la porosité, une épaisseur de sol de 6 mm environ qui a été assainie; pendant le même temps il est tombé 73 mm de pluie: malgré le débit des fossés, le niveau général de l'eau est remonté fortement.

Les courbes du limnigraphe Richard montrent (ce que nous savions déjà par des observations horaires):

1° que le niveau monte rapidement après chaque pluie (ceci se comprend puisque l'eau ne peut occuper que la faible fraction du sol qui est vide, fraction d'ailleurs d'autant plus faible que le sol est plus compact); la montée se fait en quelques heures.

2° que le niveau descend lentement à chaque période sèche entre deux pluies.

Modalités de l'assainissement:

Les débits, en XII 5, au printemps 1954, ont varié de 0 à 300 l/minute pour 1,20 ha; ils étaient fréquemment de 1 à 10 l/minute. Ainsi donc, généralement l'assainissement ne se traduit pas par un débit durable important d'eau dans les fossés ouverts. Ceci nous a d'abord étonné. Mais ce serait cependant une erreur de sous-estimer les effets de ces fossés.

1° pendant les pluies, ils évacuent une partie des eaux superficielles qui ruissellent; c'est une quantité plus faible qui entre dans la masse du sol; cet effet n'est visible que pendant la pluie.

2° après les pluies, dans les heures qui suivent, ils évacuent (lentement, il est vrai) une partie de l'eau interne.

3° en tout temps, en particulier pendant des périodes chaudes et sèches qui suivent des pluies, ils augmentent notablement la surface évaporante; avec des fossés rapprochés à 4 m on augmenterait cette surface de 1/3 de sa valeur. C'est donc 1/3 de la quantité d'eau retenue dans le sol qui peut être éliminée sans qu'il y ait écoulement.

Force est de constater le bon effet des anciens réseaux ouverts il y a 100 ans et plus. Les peuplements (il est vrai trop clairs, par suite du traitement en taillis-sous-futaie) en ont manifestement profité: ainsi dans les anciennes 7° et 8° séries.

L'assainissement des plateaux (à profils plus ou moins convexes) est totalement différent de celui des vallées (à profils concaves). Ceci a été souvent perdu de vue. Il ne faut pas s'attendre à des écoulements permanents, ni même durables.

Efficacité des fossés:

	A 20 cm du bord	A 300 cm du bord
Surface	27 cm	35
25 cm	19	25
60 cm	20	23

L'effet semble favorable, mais il s'agit de mesures délicates, et il faut être prudent dans l'interprétation.

Nous avons mesuré des débits de collecteurs de fossés. Exemple:

Parcelle 42 (surface assainie 1 ha): le débit varie de 0,03 l/min. à 40 l/min. (après une pluie);

Parcelle 88 (surface assainie 3 ha): le débit varie de 0,5 l/min. à 40 l/min.

Parcelles 102/103 (surface assainie 4 ha) (réseau de 1 300 m, soit 325 m/ha): débit 2 l/sec, soit 120 l/min.

Parcelle 116 (surface 3 ha) (réseau de 900 m): débit le 1^{er} avril 1963: 1,5 l/sec, soit 90 l/min.

Parcelles 97, 98, 99, 111, 112, 113 (surface 15 ha, réseau de 3 800 m, soit 253 m/ha): débit le 1^{er} avril 1963: 4 l/sec, soit 240 l/min.

Couramment la quantité d'eau qui sort d'un hectare assaini après une pluie est donc de 86 400 litres; elle correspond à une couche de 0,8 mm donc à une « table d'eau » (compte tenu de la matière

solide) de $\frac{0,8 \times 100}{40} = 2$ cm. C'est faible. Nous avons obtenu

des chiffres 20 fois plus faibles et d'autres 10 fois plus forts.

Effets de l'assainissement:

1° aérer le sol, ce qui améliore l'activité biologique et évite le pourrissement des racines;

2° faciliter ainsi le développement et la descente des racines, donc la multiplication des racines et l'augmentation de la couche fertile;

3° restructurer le sous-sol, donc augmenter sa capacité de rétention en eau, justement dans une partie qui est à l'abri de l'évaporation ;

4° réchauffer le sol ;

5° favoriser le développement d'une microflore restructurante ;

6° diminuer les phénomènes dus au gel, nuisibles au sol ou aux végétaux.

D'où il résulte :

1° une augmentation de la couche meuble productrice ;

2° une meilleure elongation des fûts (1 à 2 m) ;

3° une amélioration technologique du bois ;

4° une augmentation de la production (par exemple de 1 à 2 m³ de bois par ha et par an s'il s'agit de feuillus, 2 à 4 m³ s'il s'agit de résineux) ;

5° régénération facilitée.

Les fossés pourront être abandonnés après 40 ans quand la végétation sera devenue « normale ».

On a pu craindre, en d'autres régions (Vierzon), *l'effet défavorable d'un très fort assainissement* ; cette crainte serait, dans une vue superficielle de la question, d'autant plus forte ici puisqu'il s'agit d'une nappe temporaire ; en fait s'il est exact que des assainissements aient été intempestifs ailleurs, en sol sableux, nous considérons que *cette crainte ici n'est pas justifiée*, en raison des effets décrits ci-dessus sous les n^{os} 2 et 3 (réserve plus grande même en saison sèche et système racinaire approfondi mieux armé contre la sécheresse). Précisons que cette sécheresse est d'autant moins à craindre que le couvert est plus dense puisque, dans ce cas, l'évaporation est ralentie.

1.1.2.2. *Assainissement naturel* : nous ne ferons que rappeler l'effet-pompe qui est un assainissement par en haut ; la transpiration d'un hectare de hêtre, par exemple, évacue 3 500 tonnes, ou plus, par ha et par an (HÖHNEL 1880).

1.1.3. *Amélioration structurale* : il s'agit d'améliorer la structure en la rendant plus aérée et surtout de la rendre plus stable.

On peut espérer une amélioration, très variable suivant le niveau considéré, de 10 à 50 %, par des amendements minéraux ou organiques, ou par des conditionneurs, ou encore par la végétation naturelle (fourreau de racines et galeries d'animalcules lissées).

L'amélioration conjointe de la forme et de la stabilité de la structure a pour effet direct :

1° Meilleure aération du sol en tout temps; meilleure aération de l'eau du sol qui circule au lieu de stagner.

2° Plus forte réserve hydrique en saison sèche.

3° (probablement) Réserve minérale plus forte consolidant les ponts colloïdaux.

4° Microflore aérobie plus abondante et plus favorable à la nutrition végétale.

5° Facilité mécanique d'allongement et pénétration des racines.

6° S'il s'agit de la couche superficielle, érosion éolienne et hydrique diminuée.

Elle a aussi des conséquences secondes:

1° Démarmorisation (brunissement et restructuration);

2° Végétation meilleure en quantité et en qualité.

1.2. AMÉLIORATION CHIMIQUE: la pauvreté signalée au chapitre V n'est pas irrémédiable, elle est minérale et organique.

1.2.1 *Amélioration minérale*: elle provient de la pauvreté initiale d'un matériel déjà partiellement lessivé et épuisé, et des altérations sur place par l'eau stagnante interne: marmorisation qui provoque probablement une mauvaise répartition des bases, lessivage latéral, exportation excessive de petits bois, monoculture du chêne. Certes les essences à cendres riches, telles que le frêne, donc à forte restitution, ne prospèrent que sur les bons sols, et sur les mauvais sols il ne vient habituellement que les essences indigènes à cendres pauvres et à faible restitution. Est-on pris dans un cercle vicieux? Certainement non, car on peut apporter des engrais par la culture, on peut accroître la profondeur des racines, qui peuvent dès lors explorer des couches habituellement inutilisées, c'est-à-dire un garde-manger nouveau; on peut aussi faire appel à des essences exotiques à faible exigence, mais ayant un accroissement naturel un peu plus profond, et on peut faire appel à des essences indigènes enrichissantes, telles que l'aune, capable de capter et réincorporer au sol l'azote atmosphérique.

1.2.2. *Amélioration organique*: elle est due à la fane, aux racines, aux apports d'engrais organiques. L'effet des matières organiques est multiple:

1° elles sont un élément de division; elles ont un volume régressif; elles laissent, après leur transformation, des vides qui se remplissent d'air;

2° elles diminuent la mouillabilité;

3° elles augmentent la cohésion;

4° elles augmentent la teneur en eau utile, formant une réserve.

Les travaux de HÉNIN, TURC, MOREL, MONNIER, S. MÉRIAUX ont montré les bienfaits de la fumure sur sols de limon.

Il y a aussi un effet physiologique de l'humus (si c'est un bon humus). Il agit sur l'absorption d'éléments fertilisant les racines (CHAMINADE): il influence le métabolisme; il agit sur le processus respiratoire; il améliore la microflore; c'est une source de « facteurs de croissance »; il stimule les racines.

2. ACTION COMPLEXE DES AGENTS BIOLOGIQUES:

2.1. VÉGÉTATION:

2.1.1. *Dôme de feuillage*: il empêche le choc des gouttes de pluie sur le sol exposé au glaçage et il diminue la quantité qui arrive au sol par suite de l'évaporation sur le feuillage. Les résineux agissent toute l'année; les feuillus l'été seulement.

2.1.2. *Litière*: en même temps qu'on augmente le couvert, on augmente la litière. Or, celle-ci a un effet mécanique protecteur sur la structure du sol; elle l'enrichit en matières organiques; elle empêche une perte d'eau par évaporation en période sèche; elle abrite et nourrit la pédofaune.

2.1.3. *Racines et souches*:

a) *Action directe des racines sur l'agrégation*: pendant la présence de la racine, celle-ci agit de façons diverses:

1° BAYER estime que la compression locale favorise la stabilité de la structure.

2° la déshydratation locale est assurément très favorable; ainsi que les sécrétions d'acides organiques par les racines qui peuvent constituer au voisinage de celles-ci des ciments consolidant les conduits.

Après pourrissement, la lacune qui subsiste, et surtout l'incorporation de matière organique décomposée ainsi que la microfaune attirée sont des facteurs importants.

b) *Ameublissement des couches durcies*: l'attaque des couches dures par les racines des arbres a été peu étudiée. DIMBLEBY 1953 a observé d'heureuses altérations de *hardpan* sous des arbres dans des landes à bruyère; il se forme, même en profondeur, des poches d'humus descendu de la surface le long des conduits laissés par les racines.

En examinant les chablis, nous avons, à plusieurs reprises, observé une pénétration des racines dans les couches dures; ceci surtout sous de vieux arbres de 140 à 200 ans. Certes, les racines extrêmes sont fines; elles sont coudées car elles évitent les obstacles (zones trop dures et trop sèches).

Mais les racines qui s'aventurent ainsi dans le sous-sol jouent un double rôle de fragmentation et d'enrichissement en matière organique, donc de restructuration. Force est de constater que *seuls les grands arbres, bien armés parce que déjà pourvus d'un enracinement puissant installé dans les couches moyennes, peuvent envoyer dans le sous-sol ces racines pionnières dont certaines périssent parce que les conditions y sont trop ingrates et dont certaines ameublissent le sol.*

Nous avons, il est vrai, constaté la descente de racines de bourdaine de 3 cm de diamètre dans le sous-sol dur (ce qui explique d'ailleurs l'existence de la bourdaine dans les vides). Mais le cas général c'est l'étalement des racines des végétaux ligneux de taille moyenne au-dessus de ce socle dur, de cette semelle difficilement pénétrable. Par contre, les grands arbres peuvent, eux, assurer cette pénétration. On aimerait chiffrer le gain possible et sa vitesse. *Diverses observations nous permettent de penser que l'on peut regagner 10 à 25 cm sur le sous-sol, et ceci avec une vitesse de 1 cm par an.*

Or, *il ne faut pas perdre de vue que souvent la profondeur de la couche dure est critique (30 cm par exemple), alors qu'une profondeur de 55 cm ou 65 cm est suffisante pour obtenir de très beaux peuplements.* Cette dernière constatation peut être faite à Seillon, à Poulans, au Parc de Neublans. Par conséquent, le gain escompté peut être d'importance considérable. Grâce à lui, on peut espérer avoir une belle futaie productrice, là où l'on n'avait qu'une médiocre clairière à végétation languissante et de basse qualité technologique.

c) Effet-souche:

1° *Effets antérieurs à la coupe*, dont le sol conserve le souvenir:

a) protection par l'arbre contre le choc des gouttes de pluie et contre la dessiccation; incorporation des feuilles (chaque année), des fruits (qui pourrissent, mais sont riches en matières minérales) autant de fois qu'il y a eu de fructification.

b) la microflore et la microfaune ont toujours été localement meilleure à l'aplomb du couvert.

c) le long des racines, suivant des fourneaux, les écoulements d'air et d'eau se sont faits (microdrainage) et continuent de se faire, même avant que les racines pourrissent.

2^e Effets consécutifs au pourrissement:

a) les racines laissent la place à des conduits qui activent grandement la circulation de l'air et de l'eau.

b) ces conduits facilitent la descente de nouvelles racines.

c) la masse de la souche et des racines (dont le volume total, on le sait, est approximativement celui de l'appareil externe de l'arbre), en se décomposant, libère des matières organiques qui peuvent être absorbées par les petits organismes du sol et des matières minérales qui se déposent et accroissent la fertilité.

Effectivement, *on observe souvent une meilleure venue de ceux des jeunes plants forestiers qui ont été plantés à proximité des anciennes souches.*

Après quelques années, ils forment un cône qui, d'ailleurs, conserve longtemps sa forme dans la suite, l'avance des plants du centre n'étant jamais rattrapée par ceux de la périphérie.

Ce phénomène est particulièrement visible dans la parcelle 769 avec des pins Weymouth (semis naturels du peuplement voisin plantés autour d'une souche de chêne). D'où la croissance plus forte et la santé meilleure des plants.

En généralisant, on peut induire que beaucoup d'hétérogénéités des sols de forêt viennent du passé forestier, plus précisément de la présence d'anciennes tiges devenues souches après exploitation et souvent disparues au jour de l'observation. D'où les mosaïques, les variations « accidentelles » dans les régénérations.

On peut en conclure qu'il convient, lorsqu'on plante, de rechercher systématiquement les abords de souches. Cette méthode a deux inconvénients:

1^o la trouaison est plus difficile du fait de l'obstacle des racines.

2^o les rejets des feuillus (lorsque la tige coupée était jeune) peuvent gêner le jeune plant (en particulier jeune résineux). Cet inconvénient disparaît si on dévitalise la souche avec un phytocide.

2.1.4. *Stades prairiaux et cultures améliorantes*: leur action est double:

1^o les racines de graminées sont plus fines et forment un chevelu plus serré que celles des arbres; d'autre part, elles sont très nombreuses; elles divisent finement le sol et elles s'incorporent intimement à la matière organique.

2^o elles contiennent peu de lignine et se décomposent bien.

3^o l'enfouissement artificiel des parties aériennes provoque rapidement (plus rapidement que par décomposition d'une litière forestière) l'enrichissement en bon humus.

Il s'agit donc là, en principe, d'excellents moyens de créer une bonne stabilité structurale, ou de la restaurer si elle a disparu.

Malheureusement, ils sont, en fait, peu faciles à employer en terrain boisé, même si le peuplement arboré est clair.

A) *Graminées*: certes, la molinie a une action restructurante, mais elle a de tels inconvénients que, même en envisageant de la tuer au moment voulu, on ne peut guère en recommander l'emploi; par les désherbants, on risquerait d'ailleurs d'intoxiquer le sol. Peut-être pourrait-on essayer d'autres graminées supportant un demi-ombrage.

B) *Légumineuses*: les Allemands emploient fréquemment les lupins; on a aussi essayé le trèfle, le genêt.

2.2. FAUNE:

2.2.1. *Lombrics*: sous l'effet des vers de terre, par exemple, la porosité capillaire peut passer de 22 % à 33 % d'où amélioration de la qualité de la structure et de sa stabilité; il y a également une amélioration chimique (calcium), bactériologique, et une augmentation des ferments.

2.2.2. *Fourmis*: un couvercle conique métallique de four à carboniser avait été placé sur un sol de prairie avec sous-sol marbré, près de la maison forestière du Grand-Contour, en 1960. Recherchant l'ombre et l'humidité, des fourmis y ont installé une fourmilière. Le résultat en 1964 est la forte surélévation du sol sous le couvercle; elle a été de 40 cm. Cette surélévation résulte:

- 1° des petites galeries qui ont été percées même dans le sous-sol dur;
- 2° du foisonnement du sol grumeleux extrait en profondeur, accumulé à la partie supérieure;
- 3° secondairement, des galeries de muridés qui ont été attirés par les fourmis.

La densité apparente du sous-sol est les 90 % de ce qu'elle est à côté, la densité de la partie moyenne, approximativement au niveau du sol supérieur, est de 79 % du même terme de comparaison. La densité apparente de la partie supérieure de la fourmilière est de 1,34, soit 70 % de celle du sous-sol non travaillé. Cette densité est acceptable pour la production ligneuse. On notera qu'il s'agit d'une structure stable, donc bien meilleure.

2.3. COMPARAISON ENTRE LES DEUX AGENTS: pédofaune et rhizosphère sont étroitement liés.

Actions communes:

- 1° Leurs galeries aèrent le sol.
- 2° La compression sur les parois améliore la structure dans les alentours de celles-ci.
- 3° Leurs cadavres augmentent localement la teneur en matière organique, donc l'agrégation, l'humidité et la nutrition en P et K.
- 4° Ce sont des véhicules de microorganismes.

Actions spéciales:

- 1° *Racines*: diminuent partiellement, par le pompage, l'engorgement et l'asphyxie.
- 2° *Petits animaux*: augmentent par leur déjection la teneur locale en calcium et matières organiques.

3. ETUDE PAR COUCHES:

3.1. COUCHE SUPÉRIEURE:

3.1.1. *Sous forêt*, elle est en général d'une structure satisfaisante, comparable aux sols habituels de belles forêts, ce qui ne veut pas dire qu'elle ne puisse pas être améliorée. Le pulvérisage peut lui donner une forme émiettée apparemment très favorable; en fait, cet état ne dure pas longtemps et les pluies, lorsqu'il n'y a pas un couvert suffisant, provoquent rapidement un relatif tassement; autrement dit, les améliorations qu'on peut faire sous le couvert par des crochétages, sont assez peu durables.

3.1.2. *Vides*. Lorsqu'on opère dans des vides, il faut savoir que l'effet du fraisage est bref. Par contre, il y a lieu de modifier l'humus tourbiforme qui est améliorable.

3.2. COUCHE MOYENNE à démarmoriser, celle de 15 cm à 45 cm; c'est celle qui est affectée par le délavage et c'est justement celle où il y a beaucoup de racines. Le labour à la charrue, possible seulement lorsqu'il s'agit de zones déboisées, a un effet plus profond que le fraisage.

L'assainissement par fossés et le tranchage ont pour principal objet d'évacuer l'eau de cette couche, donc de l'améliorer.

L'incorporation de matières organiques serait particulièrement utile dans le cas de plantations; elle peut être faite grâce à la motoprocureuse hélicoïdale et par râclage de la terre humifère superficielle, ou par addition de fumier. C'est tout le problème de la démarmorisation des marbrures floues qui se pose à propos de cette couche moyenne; il nous semble qu'elle est possible, surtout si il y a occur-

rence d'années sèches, couvert végétal dense, et incorporation de matières organiques. Racines et animalcules prolifèrent, effectuent un brassage minéral et minéralo-organique dès que les conditions asphyxiantes ont disparu. Le sol peut passer de la teinte beige à la teinte ocre clair, et reprendre des qualités qu'il avait perdu par suite du découvert; ceci peut être assez rapide.

Nous avons eu l'occasion, en Bresse, d'examiner plusieurs étangs asséchés. Les sols gris marbrés se transforment à l'air et la végétation forestière se réinstalle (aunes, chênes...) sans difficultés, après 2 ou 3 dizaines d'années. C'est ce qui s'est passé aussi dans les étangs dits « de Chaux » qui servaient à donner des « coups d'eau » pour le flottage du bois sur la Clauge.

3.3. COUCHE INFÉRIEURE: il s'agit de la couche consolidée. Il ne s'agit pas, à proprement parler d'une restauration, d'une régénération de structure, puisque cette couche n'a probablement jamais été meuble, mais plutôt d'une premier ameublement et d'une création de structure un peu aérée. Bien que difficile, elle nous apparaît possible par action des racines; de cette reconquête d'un volume de terre utile, tout le mérite en reviendra à l'homme, de même que c'est lui qui, par les horizons médians, au contraire, a été responsable de la perte de structure et fertilité.

4. DEMARMORISATION (fig. 20):

Le phénomène consiste essentiellement en trois transformations:

1° uniformisation des teintes, donc réoxydation des parties réduites, et rediffusion du fer dans la masse. Cette diffusion ne peut évidemment pas se faire à partir des concrétions dures; elle ne peut concerner que les parties marbrées molles et floues pour lesquelles le phénomène est réversible.

2° formation d'une structure érigée en agrégats, entraînant une forte augmentation de la porosité et de la perméabilité.

3° activation biologique (microflore et microfaune) corrélative de ces améliorations physiques et contribuant à les accroître. Les conditions de cette démarmorisation sont:

1) l'exposition à l'air.

Mais cette exposition ne suffit pas à elle seule. Il faut, en effet, pour qu'il y ait *rebrunification*, qu'il y ait des mouvements de diffusion, c'est-à-dire des humectations suivies de précipitations.

Nous l'avons vérifié en laissant exposés à l'air, dans des verres, des échantillons de sous-sol bigarré à l'intérieur d'un local: après plusieurs années ils n'avaient pas changé d'aspect.

Au contraire, des échantillons exposés à la pluie (déblais de fossés) brunissent en surface en quelques années: l'approfondissement semble être d'environ 1 cm par an (soit 20 cm en 20 ans).

2) des alternatives d'humectation et de dessiccation provoquant des dilatations et contractions; probablement aussi des alternatives de chaud et de froid contribuent au même résultat. Les déplacements de solutions permettent aux parties surcolorées d'alimenter les parties décolorées.

3) semble aussi nécessaire la pénétration d'un agent de liaison, habituellement la matière organique: la démarmorisation ne peut, semble-t-il, guère se faire sans l'intervention des végétaux.

4) enfin, elle ne peut se faire rapidement, le facteur « temps » est essentiel.

Elle se produit naturellement en surface sur les parois de fossés, sur les flancs de monticules artificiels (déblai de fossé, buttes de chablis...). Les facteurs favorables sont: l'occurrence d'années sèches, le couvert végétal dense, l'incorporation (naturelle ou artificielle) de matière organique.

Des interventions artificielles semblent pratiquement indispensables pour la démarmorisation en grand du sous-sol, car les racines et les êtres vivants ne peuvent explorer ce sous-sol tant qu'il reste compacité. Elle est plus longue et beaucoup plus difficile à réaliser. Il faut, aussi, l'addition de matière organique.

L'amélioration d'un sous-sol marmorisé sous l'effet de l'exposition à l'air se fait progressivement, mais par couches peu épaisses: il y a oxydation directe, modification de la microflore, installation de racines. Sans pouvoir l'affirmer, nous avons l'impression que c'est ce qui s'est passé pour le monticule situé près de la Maison forestière du Grand-Contour, sur le bord de la route de Dole à La Vieille-Loye. *La forme incurvée de la limite du marmorisé est parallèle à la surface externe du monticule* (fig. 20).

L'approfondissement du brunissement a été de 30 cm en 100 ans. Mais le phénomène est certainement plus rapide pour les premières couches et sa vitesse va en diminuant, il tend vers une limite naturelle, fonction du climat (et des enracinements des végétaux).

Rappelons que le danger de *remarmorisation* d'un sol démarmorisé est assez grand; il suffit qu'il y ait:

- 1° occurrence d'années très pluvieuses,
- 2° défaut de drainage (situation en plateau, obstruction des fossés d'assainissement),
- 3° découvert persistant,
- 4° enlèvement artificiel de la couverture morte (ou sa combustion par découvert),

5° acidification (action de la bruyère),

6° action des tanins,

7° tassement par le piétinement ou roulage.

Ainsi peut être freinée ou perpétuellement empêchée la démar-morisation.

Après que le sol a été tassé par compression mécanique ou même sans tassement mécanique, par simple ennoyage, la structure s'effondre.

En quelques mois ou un petit nombre d'années, la remarmorisation peut se faire; ce n'est pas étonnant, c'est une loi de la nature qu'il est plus aisé de détruire que de construire.

En tout cas, *en constatant ainsi la réalité et la possibilité d'une démar-morisation, nous apportons un motif d'espoir dans la restauration des sols de la forêt.*

5. ETUDE PAR NATURE DE SOL:

Il est certain que la méthode employée doit être différente suivant qu'il s'agit de sol de vides ou de sol ordinaire sous forêt claire (taillis-sous-futaie).

5.1. SOL DE VIDE: il est facile de circuler, donc d'y faire des labours moyens ou profonds, ainsi que d'ouvrir des fossés à l'écartement désiré. La couche noire peut être traitée, par exemple, par des amendements calciques (chaux).

5.2. SOL ORDINAIRE DE FORÊT (sol forestier à marbrures): la structure est, dans l'ensemble, moins dégradée. On est limité dans les interventions artificielles, mais on peut, par contre, profiter de la végétation existante qui est un bon point d'appui pour les opérations de restauration; par exemple on peut planter près des souches; le demi-couvert et la litière, ainsi que l'absence ou la raréfaction de la molinie sont des facteurs favorables. On peut récupérer la couche supérieure humifère pour remplir les trous de plantations; on peut aussi profiter du demi-couvert pour introduire des essences d'ombre dont on sait qu'elles ont, en général, une plus grande valeur restauratrice puisqu'elles ont habituellement elles-mêmes un couvert plus dense, agissant après quelques années ou quelques dizaines d'années; elles sont préférables aux essences de lumière.

6. PRINCIPES GENERAUX

QUI RESULTENT DES ANALYSES PRECEDENTES:

Il s'agit de résoudre un double problème physique et chimique (minéral et organique). Notons que le problème est différent de celui de l'amélioration des sols podzoliques; il n'y a pas le pro-

blème de l'écroûtage du « mor » ; il n'y a pas non plus forcément celui du brassage des horizons (exigeant la destruction du peuplement forestier pour l'emploi de grosses machines). Certains principes se sont dégagés au cours de nos essais :

6.1. Certaines des améliorations proposées par divers auteurs sont inopérantes. Le problème des sols marmorisés n'a pas encore été étudié par les chercheurs ; par exemple la question des amendements calciques reste entière.

6.2. Une amélioration unique est généralement inopérante : *il faut agir simultanément sur plusieurs facteurs*. Par exemple, inutile de mettre des engrais si l'on n'évacue pas l'eau en excès.

6.3. *La nature reste l'agent le plus puissant de restauration et également le plus économique.*

6.4. Ceci implique qu'on ne peut se passer du facteur « temps » ; *aucune amélioration n'est instantanée, ni très rapide* ; il ne faut pas oublier que nous sommes dans le domaine de la biologie.

6.5. Le développement des racines, de la petite faune et de la microflore bactériennes (qui seraient capables d'agir efficacement pour la déarmorisation) est en réalité gêné par les *conditions régnautes* qui, justement, engendrent cette marmorisation. Il peut sembler donc qu'il y ait là un cercle vicieux. En réalité, on peut y échapper en modifiant quelque peu les conditions d'aération et autres. Il y a déclenchement réciproque de progrès successifs. On peut aussi, secondairement, favoriser le pullulement de la petite faune et de la microflore par des inoculations, en supposant qu'il y a toujours un certain retard dans leur extension consécutive au progrès des propriétés physiques. Les inoculations peuvent permettre l'exploitation rapide de ces progrès physiques.

6.6. *Des méthodes semi-artificielles capables d'amorcer les processus favorables peuvent être employées.* Souvent, l'amélioration se fait en deux temps : un stade d'action principalement physique précédant un stade biologique (lui-même générateur de bienfaits physiques et chimiques). Des méthodes semi-artificielles permettent aussi de combler des lacunes de la reforestation naturelle et d'établir des peuplements de raccord.

6.7. *L'amélioration des sols ne peut être conçue indépendamment de celle des peuplements.* L'embroussaillage précède la vraie reforestation. La restauration des sols (par approfondissement) est liée à celle des peuplements. *L'évolution naturelle de la végétation est toujours progressive* (Gaussen). La nature répare elle-même les plaies que l'homme a causées, chaque fois que celui-ci ne vient pas, par d'intempestives interventions, contrarier les cicatrisations.

7. PREUVES DE LA POSSIBILITE

DE RESTAURER LES SOLS A MARBRURES:

1° *La forêt s'est réinstallée sur d'anciens étangs desséchés à sol très marmorisé*, par exemple: le Petit Etang de Chaux, le Grand Etang de Chaux et l'étang Tharin; les chênes y ont un développement normal.

2° *Il y a un progrès net de la végétation forestière dans les zones assainies par fossé* il y a environ 100 ans, alors même que ces fossés n'ont pas été, depuis 50 ans, bien entretenus; ceci est visible, en particulier, dans la région de la Châtelaine (anciennes VIII^e et IX^e séries). Il est difficile d'apporter des preuves chiffrées puisque le progrès concerne non seulement la densité, mais l'élongation et la vigueur du peuplement; en tout cas l'impression est nette.

3° On peut voir de très beaux peuplements de chêne rouvre aux Baraques Jupille, de chêne rouge à la 1^{re} colonne et à la Royale; le sol avoisinant est médiocre; le sous-sol des placettes très marmorisé; il s'agit d'anciennes concessions; la seule culture suivie de l'état serré a suffi pour bonifier le sol.

4° On observe couramment et régulièrement une *démarmorisation* et un *brunissement des sols de buttes*: buttes subsistant après le renversement d'un chablis, déblais de fossés, etc...

5° Nous avons obtenu de bons résultats par des *cultures en pots* de lupin, de lin, de chênes rouges d'Amérique, sur des échantillons de sous-sol fortement marmorisé, mais émietté, donc aéré. La croissance s'est avérée, après émiettement du matériau, sinon excellente, au moins moyenne ou bonne. Ce ne serait pas le cas s'il s'agissait d'un matériau définitivement appauvri, épuisé ou stérilisé.

6° *Plusieurs comparaisons peuvent être faites par couple de fractions marmorisée et non marmorisée: les analyses donnent toujours des différences relativement faibles ou nulles.*

En résumé, les diverses imprudences dans le traitement forestier, certaines consécutives aux pressions économiques des époques passées ont provoqué le délabrement des peuplements et des sols en forêt de Chaux.

Le résultat en a été l'accentuation de faibles différences initiales et l'accentuation de l'infertilité.

Il apparaît désormais possible de rendre meuble et fertile les couches médianes tassées par hydromorphie (soit 10 à 20 cm). On peut même espérer regagner 5 à 10 cm sur le sous-sol consolidé au périglaciaire.

On peut également améliorer l'humus défectueux des couches supérieures dans les zones où la molinie a puissamment porté sa maraude.

Tout ceci est possible, soit par des méthodes naturelles relevant d'une sylviculture appropriée et quasi gratuite, ou par des méthodes

semi-artificielles dont le but principal est de déclancher ou favoriser les processus naturels favorables.

Nous estimons que les restaurations sont possibles et rentables, grâce aux mesures prévues par l'aménagement de 1957, renforcé par quelques autres.

S'il en est bien ainsi, la Pédologie aura bien servi la Foresterie.

Texture,	Apport d'éléments grossiers (théorique)	
	Amélioration directe de la structure	Amendement minéraux Conditionneurs Matières organiques apportées
Structure, Aération, Evacuation d'eau et ralentissement de l'évaporation	Structuration par la végétation	Ecran naturel du feuillage Litière Racines et souches Engrais verts (repeuplements)
	Par couverture artificielle (cas particulier)	
	Ameublement artificiel	superficiel profond (sous-solage)
	Assainissement	Fossés Rigoles Remodelage de la surface Billons Grands ados
Amélioration chimique	minérale	Engrais Oligo-éléments
	organique	Apport de fumier Plantation ou semis serrés Mélange systématique d'essences diverses Introduction d'essences améliorantes
Amélioration biologique (faune et micropopulation)	Mesures pour conditions écologiques favorables	
	Inoculations.	
Destruction de la molinie par moyens divers.		

Bibliographie: DARWIN 1882, FREI, HENRY 1908, JEANSO-NLUSINANG (d.d.), LAATCH (d.d.), MICHON 1954, PERIGAUD 1961, WITTICH (d.d.).

DEMARMORISATION

A) COUCHE MOYENNE (MARMORISATION TACHETEE):

Moyen	Effet primaire	Effet secondaire
Suppression de la nappe perchée	Aération Oxydation	Brunification des parties grises (referrisation)
Envahissement de la végétation naturelle ou plantation	Multiplication des racines	Erection de la structure
Fractionnement mécanique	— d° —	Augmentation du taux d'humus

B) COUCHE PROFONDE (MARMORISATION RETICULEE):

Les processus sont analogues, mais pratiquement il faut surtout compter sur la descente lente des racines d'une végétation conservée avec prudence et longuement.

D'autre part, une action de l'eau dans la masse (lorsqu'elle est rendue possible: émiettement...) semble pouvoir jouer un rôle utile en dissolvant les enrobements d'hydroxydes.

Principales améliorations des sols à sous-sols marmorisés

	Sol forestier à marbrures	Sol de vide à molinie
Couche supérieure	Néant	Substitution d'un humus doux à l'humus tourbi-forme noir
Couche moyenne	Elimination de l'eau dans les périodes où elle est excédentaire. Changement de faune et flore; développement plus fort de racines (D'où restructuration et forte aération).	Comme ci-contre, mais plus lent et difficile
Couche inférieure	Division du sol-sol cimenté (cause et effet de la descente de nouvelles racines). Enrichissement en matière organique - (Par voie de conséquence, création d'une structure faiblement aérée).	Comme ci-contre, mais plus lent et difficile.

CHAPITRE XVIII

TECHNIQUE DE L'AMELIORATION PAR LES MOYENS NATURELS (Pratique)

Nous avons vu que *l'augmentation du couvert et son amélioration qualitative étaient le principal agent, aussi bien de la restauration des sols que de celle des peuplements; c'est à la fois la plus efficace et la plus économique, c'est donc la plus importante. C'est elle qui a motivé la création d'une « sous-section de restauration différée », mais des mesures du même ordre s'imposent dans les autres sections ou sous-sections.*

1. MESURES A PRENDRE:

1.1. SUPPRESSION DES ENLÈVEMENTS DE LITIÈRE: c'est chose déjà faite.

1.2. SUPPRESSION DE L'INCINÉRATION DES RÉMANENTS: elle a été ordonnée dans le cas général et doit être maintenue de façon à ce qu'il y ait décomposition biologique des matériaux ligneux non exportés.

1.3. SUPPRESSION DU SURPATURAGE ET MÊME DU PATURAGE: l'évolution économique a joué dans un sens favorable puisque les troupeaux ne vont pratiquement plus en forêt.

1.4. SUPPRESSION DES INCENDIES: un ensemble de mesures ont été prises pour la prévention des incendies (précautions supplémentaires prévues par arrêté préfectoral: nettoyage des bords de routes et entretien de pare-feu...) et pour la lutte contre les incendies permettant d'en empêcher l'extension (empierrement de routes, installation de téléphones, établissement de permanences, matériel de lutte...). On a constaté une forte diminution de la surface brûlée et on peut espérer des progrès dans le même sens.

1.5. MAINTIEN DU TAILLIS SUR PIED au-delà de l'âge habituel d'exploitation qui était de 30 ans. Cette mesure a été prise d'abord dans le cas du taillis-sous-futaie, sous forme d'îlots qui étaient cerclés à la peinture. Après 20 ans, on voit déjà des améliorations notables; il y a refermeture des vides, soit par encerclement, soit par extension des bouquets d'arbres qui, parfois, se trouvent disséminés dans les vides. *La conversion en futaie est la première et la plus essentielle de toutes les améliorations.*

1.6. SUPPRESSION DE L'EXPORTATION DES PETITS BOIS: elle est déjà partiellement réalisée par le maintien du taillis sur pied; il convient, également, de laisser sur place les débris du houppier, de préférence après façonnement et éparpillement.

1.7. ALLONGEMENT DE LA RÉVOLUTION: il est utile, sur les plus mauvais sols, que les arbres restent jusqu'à leur mort naturelle!

1.8. PROTECTION DES OISEAUX: elle est obtenue par la conservation de quelques arbres morts dans chaque parcelle et par des mesures diverses (nichoirs, nourrissage, abreuvement); elle est conforme à une meilleure activité biologique.

Toutes ces mesures sont applicables dans le cas général.

2. MESURES PRISES DANS LE CAS DE LA FORÊT DE CHAUX:

Le nouvel aménagement approuvé par Arrêté Ministériel du 17 mai 1957 prévoit *une section de conversion* composée des parcelles les plus riches, *une sous-section de restauration immédiate* dans laquelle le vieillissement des taillis sur pied est conjugué avec des plantations de complément, et *une sous-section de restauration différée*, où est pratiquée une mise en réserve systématique pendant au moins 30 ans, et peut-être 100. Cet aménagement prévoit:

1° le maintien du couvert maximum par la futaie régulière dans la section de conversion, par la futaie jardinée par bouquets dans la section de restauration.

2° les mélanges systématiques d'essences, en particulier installation de sous-étages.

3° une large extension du hêtre.

4° des interventions artificielles en temps voulu, avant que le dé-couvert ait eu une influence néfaste, si la régénération tarde au-delà de 5 ans. Par exemple cet aménagement prévoit des dégagements de semis, les éclaircies des vieux taillis, des débroussailllements, l'élimination de la molinie dans la mesure du possible. On pourra compléter par des mesures telles que:

a) création de micro-abris (tas de ramilles) (qui constituent, il est vrai, un danger d'incendie, mais ils sont des foyers d'animaux utiles au sol). Des couvercles en métal ou matière plastique disséminés tous les 50 mètres peuvent jouer le même rôle.

b) dissémination des débris de rémanents préalablement broyés mécaniquement.

3. EFFETS A ESCOMPTER :

3.1. EFFETS PÉDOLOGIQUES :

3.1.1. *Diminution ou suppression de la nappe perchée aquifère intermittente* par moindre alimentation ou par évapo-transpiration.

3.1.2. *Amélioration de la structure :*

- a) de la couche moyenne parcourue par les racines,
- b) de la partie supérieure de la couche profonde dont l'induration cessera.

3.1.3. *Amélioration chimique* (minérale et organique) : on peut essayer d'évaluer grossièrement les quantités d'engrais équivalentes au bois du taillis maintenu sur pied, par exemple 100 stères à l'hectare après 30 ans. Ce bois équivaut à :

900 kg de nitrate de chaux à 0 F 31	279 F
2 200 kg de scories (à 17 %) à 0 F 10	220 F
170 kg de chlorure de potassium (à 60 %) à 0 F 27 ..	65 F 90
	<hr/>
	564 F 90

soit une économie d'environ 560 F, ou 18 F par an.

Certes, ultérieurement, il y aura exportation sous forme de bois de la futaie future, mais *cette restriction temporaire d'exportation provoque un utile enrichissement relatif du capital pédologique.*

L'humus sera amélioré en quantité et en qualité aux divers niveaux.

3.2. EFFETS SYLVICOLES :

3.2.1. *Meilleure qualité technologique du bois :* élongation meilleure, proportion d'arbres roulés diminuée par suite de la meilleure qualité chimique du sol et de l'atténuation des sautes de vent ; proportion d'arbres gélivés diminués par suite des meilleures propriétés chimiques du sol et de l'atténuation des variations brusques de températures aux environs de 0°.

3.2.2. *Progression naturelle du hêtre* (parce que c'est une essence d'ombre): on aura ainsi des peuplements plus stables et de plus forte production.

3.2.3. *Elimination de la molinie*: elle souffre conjointement de la diminution de l'éclairement, de l'amélioration chimique du sol et de la suppression de la nappe perchée.

3.2.4. *Meilleures réussites de régénération naturelle* par suite de l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol et de la disparition de la dangereuse concurrente que constitue la molinie.

4. PROSPECTIVE VÉGÉTALE (*pénéclimax*):

Si l'on décidait, actuellement, de cesser toute intervention en forêt de Chaux, c'est-à-dire toute exploitation, et toute amélioration artificielle, l'évolution serait, à notre avis, la suivante:

Après 100 ans: les chênaies les moins claires seraient très chargées en matériel; il n'y aurait guère de chênes morts par l'âge, donc peu de régénération; les chênaies très claires montreraient des arbres très étalés, et de ci, de là, dans des trouées du taillis (en particulier dans les coudraies) des taches de semis; les hêtraies actuelles seraient en bel état, les zones de taillis-sous-futaie où le hêtre actuellement est déjà présent seraient entièrement envahies par le hêtre; les taillis riches en charme et pauvres en réserves seraient devenus des charmaies; les vides seraient tous embroussaillés et déjà refermés sur leurs bords. Quelques parties plus claires seules montreraient encore des bouleaux et des aunes. La moliniaie ouverte n'occuperait plus que quelques centaines d'hectares. La molinie sous les futaies serait en nette régression.

Après 300 ans: des hétacombes de chênes morts renversés par les vents se seraient produites, les trouées ainsi ouvertes envahies par des semis de chêne ou de hêtre (à proximité des hêtraies); des hêtraies couvriraient ainsi la majeure partie de la surface totale; les vides à molinie seraient refermés et seraient surtout envahis par des chênes d'allure quelconque ou médiocre.

En chaque point, le sol serait à un stade de qualité nettement supérieure à celui de 1965.

En fait, l'intervention des exotiques accélérera la fermeture du couvert.

L'abandon du régime du taillis-sous-futaie, l'abandon de la primauté du chêne, l'extension du hêtre à partir des îlots où il a subsisté, l'enrichissement des peuplements clairs ou sans hêtre, par des résineux, et le repeuplement des vides, permettront une restauration conjointe des sols et des peuplements qui sera étudiée au chapitre XIX.

CHAPITRE XIX

AMELIORATION PAR LES MOYENS SEMI-ARTIFICIELS

Certaines interventions qu'on peut considérer comme artificielles agissent soit par elles-mêmes, soit surtout parce qu'elles déclenchent des processus naturels favorables. Il est difficile de faire la part de ce qui est artificiel et de ce qui ne l'est pas.

1. ASSAINISSEMENT :

1.1. FOSSÉS SIMPLES : on pourra ouvrir, sur tous les plateaux où la végétation donne des signes de souffrance, des fossés de 70 cm de profondeur et de largeur quelconque, tous les 10 mètres ; ils devront être parallèles et dirigés suivant la ligne de plus grande pente (qui est d'ailleurs toujours très faible).

Ces fossés peuvent être ouverts à la main, ou à la pelle mécanique, ou à la trancheuse. Nous avons préconisé et réalisé des fossés à l'excavatrice dont la profondeur allait en croissant de 50 cm à 2 m, ce qui permettait un bon écoulement sur des surfaces sub-horizontales.

On peut prévoir le bouchage des fossés avec des fagots (produits de recépage, élagage et dégagements).

1.2.1. RIGOLLES : une variante de l'assainissement par fossé est celui de l'assainissement par rigoles de 30 cm de profondeur ; c'est une pratique fort recommandable, en particulier en bordure des taches de semis. Les *rigoles* avec évacuation d'eau dans des fossés sont peu coûteuses et très utiles.

1.2.2. *Tranchage* : signalons aussi le bon effet du tranchage (« trenching ») ; (il a été constaté dans la Réserve de Crissey) : il s'agit de rigoles sans écoulement ; semis : hauteur 120 cm au lieu

de 153, diamètre 1,35 cm au lieu de 0,65 cm pour des chênes rouges d'Amérique. En ouvrant une rigole autour d'une tache de semis, on obtient une supériorité nette des semis situés à l'intérieur de la placette; on ne peut parler d'évacuation d'eau puisque le fossé n'a pas de sortie. *Le tranchage écarte assurément la concurrence des*

ANCIENNE CARRIERE DU BIZARD

Front de carrière

FIG. 20.

Etat en 1965 de l'ancien front de la carrière de terre à tuile au Bizard, carrière abandonnée depuis 80 ans.

M.F. du GRAND CONTOUR - N.O. de la route

FIG. 20 bis.

La masse de déblai marmorisé s'est démarquée sur 27 à 37 cm, donc à une distance presque constante de la surface. L'intérieur reste marmorisé. Entre les deux faciès, existe, à l'aplomb de la partie supérieure du bombement, une couche intermédiaire d'environ 14 cm.

racines des arbres voisins; mais aussi, et surtout, nous pensons qu'il a comme effet une ventilation du sol, donc une aération favorable et une restructuration progressive à partir des faces exposées à l'air.

1.3. PUISARDS: des puisards avec réseau collecteur en étoile ont été ouverts en I/14, II/23, V/15, VII/13, XI/13, XIV/13: leur but était d'évacuer en profondeur dans les cailloutis l'eau excédente.

taire des plateaux. On pensait qu'ainsi on pourrait faire des économies sur la longueur des émissaires, et résoudre des problèmes d'écoulement.

En fait, nous n'avons pu mettre au point des systèmes de galeries filtrantes bétonnées en profondeur, trop onéreuses, et la plupart de ces puisards se sont plus ou moins colmatés. Celui de V 15 avec buses perforées fonctionne encore. Cette méthode ne peut être généralisée.

1.4. DRAINAGE A LA CHARRUE-TAUPE: étant donné les proportions de limon et d'argile, il ne semble guère possible de réaliser de tels réseaux d'assainissement souterrains durables; les racines gêneraient d'ailleurs le passage des machines.

1.5. LES EXPLOSIFS AGRICOLES émettent le sous-sol ou l'ébranlent utilement, mais un tassement se produit ensuite après les pluies. Le prix de revient est relativement élevé.

2. CULTURE DU SOL:

2.1. CULTURE DU SOL SUPERFICIEL: elle peut être utilement réalisée, surtout dans les vides, par labours à la charrue, ou par fraises par rotavator.

2.2. SOUS-SOLAGE: des essais de sous-soleuse portée Fondeur ont été faits (ainsi en 1960 dans les parcelles 88, 89, 1344 et dans les parcelles 72, 73, au total 20 km); mais la présence des racines rend l'exécution difficile et, d'autre part, le sous-sol se recompacte vite.

3. REMODELAGE DE LA SURFACE:

Il a, en somme, un double effet d'assainissement et de culture.

3.1. BUTTES: nous avons constaté qu'une butte (ancien chablis) exposée à l'air depuis 30 ans voyait sa porosité augmenter de 22 % par suite des alternatives de dessiccation — humectation et par des actions biotiques. Néanmoins, nous n'avons pas constaté de résultats très intéressants depuis 15 ans; en ce qui concerne les plantations sur buttes; peut-être les plants souffrent-ils de la sécheresse?

3.2. BILLONS: nous avons réalisé, sur une grande surface, des billons de la façon suivante: passage de rotavator, suivi de 2 passages de charrue ramenant la terre au milieu: la surélévation initiale de 60 cm ne dure malheureusement pas très longtemps, car il y a un affaissement sous l'effet des pluies. On sème ou on plante sur le sommet du billon; le résultat est assez satisfaisant.

3.3. GRANDS A-DOS: le remodelage par grande masse de la surface permet de créer un léger relief artificiel. Il est possible, désormais, avec les gros engins mécaniques (bulldozer). Ceci n'est appli-

cable que dans les parties vides d'arbres; on peut réaliser des â-dos de 20 m de large, ou encore râcler la terre humifère et constituer des gros bourrelets. On obtient ainsi un double résultat, celui d'assainir, et celui d'augmenter l'épaisseur de terre fertile au droit des plants. Il faut serrer davantage les plants sur les lignes.

4. COUVERTURE ARTIFICIELLE DE LA SURFACE:

Elle est possible en pépinière. On peut envisager aussi des carrés de métal ou de matière plastique percés d'une fente, de 50×50 cm, placés au pied des plants: ces plaques seraient rigides, ou souples et retenues par 4 piquets. Elles empêchent l'herbe de pousser, maintiennent la fraîcheur, protègent la structure, favorisent l'activité biologique. Le seul inconvénient est le prix de revient.

5. AMENDEMENTS - ENGRAIS:

5.1. AMENDEMENTS MINÉRAUX: nous avons obtenu des effets discordants; tantôt spectaculaires, sur douglas et chênes rouges en particulier; tantôt nuls; tantôt dépressifs. Ces essais ont porté sur de la chaux, de la poudre calcaire venue du Premier Plateau du Jura et sur du plâtre. Voici les résultats obtenus sur 4 placettes de semis de chêne rouvre près de la Maison forestière du Grand-Contour:

N°	Hauteur	N°	Hauteur
—	—	—	—
1. témoin	0,60 m	3. chaux (100 kg)	0,20 m
2. plâtre (15 kg)	0,80 m	4. calcaire (100 kg)	0,40 m

	pH		Ca		C %/so	N %/so	C/N
	Surf.	30 cm	Surf.	30 cm	surf.	surf.	surf.
1 témoin	4,9	4,9	2,3	0,6	20,9	1,5	13,9
2 plâtre	4,5	4,6	3,4	1,0			
3 chaux	7,3	5,6	21,5	3,4	24,6	1,65	14,9
4 calcaire	7,4	6,0	23,3	3,9			

Nos essais sur des plants en forêt n'ont pas eu d'effet général, ni marqué. Peut-être y aura-t-il arrière-action?

Peut-être l'effet sera-t-il utile dans les vides à molinie pour aider à la résorption de l'humus noir, et sous les vieux peuplements de pin sylvestre.

5.2. CONDITIONNEURS :

a) *Krilium*: les essais de RICHARD sur lehm sont encourageants (pourcentage d'agréats doublé). Nos propres essais, en pots, n'ont pas donné des résultats très satisfaisants. Le sol a été fortement durci. Ce conditionneur et la plupart des autres sont d'ailleurs beaucoup trop coûteux en forêt.

b) *Blanose*: (carbonyl-méthyl-cellulose de sodium, colloïde hydrophile, malheureusement de peu de durée): 3 pots ont été traités; il a rendu le sol imperméable, l'eau y a séjourné davantage sur les pots traités; après 3 mois, le sol s'est affaissé: le résultat a donc été négatif. De plus, les glands et plants de chêne rouge ont souffert par action directe ou indirecte, et sont morts dans le pot traité avec forte dose.

5.3. AMENDEMENTS ORGANIQUES :

a) *Tourbe*: nous avons essayé celle de la Sarthe et celle du Haut-Doubs, soit en incorporant au sol au moment de la plantation de la tourbe émiettée, soit en plaçant une brique de tourbe au pied du plant, contre les racines. Les résultats ont été nuls ou négatifs. Il est possible que la tourbe absorbe l'eau du sol au détriment des racines du jeune arbre, ce qui compenserait les avantages de l'augmentation de porosité.

b) *Fumier*: Mme MÉRIAUX a étudié l'effet sur limon à pseudo-gley d'Arc-sur-Tille. Nous avons fait des essais à grande échelle avec 1 kg de fumier par plant et nous espérons de bons résultats.

Il faudra envisager l'emploi de fumier artificiel (arrosage au sulfate d'ammoniaque).

c) *Graissage*: nous avons fait des essais d'épandage d'huile dans l'espoir de diminuer la mouillabilité, mais les résultats n'ont pas été probants.

d) *Humaby* (tourbe activée): d'excellents résultats ont été obtenus en pots et en pépinière, ainsi que sur chênes rouges. La *poudrette* a eu également un bon effet, par contre l'Humigine, le Regenor, le Cofuna n'ont eu aucun effet. Les gadoues mériteraient d'être essayées.

5.4. ENGRAIS VERT :

a) dans un vide ou sur une bande traitée au rotavator, on peut utilement faire une culture de légumineuse et l'enfouir.

b) nous avons semé des graines de lupin en bordure immédiate des semis directs de chêne rouge ou à proximité des jeunes plants: l'effet est probablement favorable, mais souvent l'ombrage gêne le développement de ces lupins. Les variétés pérennes seraient préférables.

5.5. ENGRAIS MINÉRAUX : les résultats obtenus sont fort irréguliers.

5.5.1. *Azote* : le purin de porcs, dilué, n'a pas donné de bons résultats ; le nitrate de chaux a donné des résultats excellents, en particulier en pépinière.

5.5.2. *Phosphore* : les scories Thomas et l'hyperphosphate semblent utiles, mais nous avons eu peu de résultats très nets, probablement par suite de la compacité qui joue le rôle de facteur limitant.

5.5.3. *Potassium* : les effets nocifs ont été obtenus par du chlorure ; il faudrait, probablement, des fumures faibles et répétées pour alimenter les minéraux argileux ; il faudrait des sels autres que les chlorures ; mais la dispersion des points d'épandage est un inconvénient sérieux pour la généralisation des engrais.

5.6. ROCHES VOLCANIQUES BROYÉES : en Tchécoslovaquie, on a obtenu des améliorations de 10 à 30 % ; les farines de basalte méritent d'être essayées en forêt de Chaux en raison de la pauvreté minéralogique des sols (1 kg par plant).

5.7. ACTIVATEURS BIOLOGIQUES : il semble que de tels produits (par exemple à base d'algues marines) aient leur rôle à jouer, soit pour activer les composts, soit au pied des plants.

5.8. INOCULATION DE TERRE A TRÈS BONNE ACTIVITÉ BIOLOGIQUE : elle est très souhaitable à proximité des plants mis en place artificiellement, car les sols de la forêt de Chaux semblent souffrir souvent de carence d'oligo-éléments ou d'insuffisance biologique.

5.9. LES ENSEMENCEMENTS FAUNIQUES (lombrics...) à partir de stations d'élevage et les ensemencements microbiologiques à partir de cultures systématiques *in vitro* pourraient constituer une méthode tentante d'amélioration des sols. BARRET a obtenu, en agriculture, des résultats intéressants.

En réalité, ces espèces favorables ne peuvent se développer que lorsque les conditions écologiques nécessaires sont réalisées, et il est probable que souvent la propagation naturelle se fait dès que ces conditions sont établies. C'est donc de ce côté que doit se porter l'effort : et nous sommes ramenés au difficile problème de l'aération et de la structure. Il ne faut pas, néanmoins, les rejeter en bloc, car il est possible qu'on parvienne, par des ensemencements artificiels, à accélérer l'installation de ces espèces utiles.

6. REPEUPLEMENTS ARTIFICIELS:

6.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX:

a) *il faut planter suffisamment serré* (1 m à 1,50 m) pour que rapidement le couvert se ferme et pour que les enracinements occupent après peu de temps le volume total du sol:

1° Couvert du sol meilleur, et obtenu plus rapidement.

2° Dépouille plus forte (au moins jusqu'à ce que les plants se gênent nettement), donc restauration du sol par accroissement de matières organiques.

3° Gêne pour la végétation concurrentielle.

4° Soudure réciproque des racines, d'où aide réciproque des sujets.

5° Entraide du peuplement par l'extension de la microflore.

6° Meilleur élagage naturel.

Le seul inconvénient est le coût plus élevé.

Ceux, invoqués fréquemment, de concurrence pour l'eau et les substances fertilisantes, au moins avec des essences assez frugales, ne surviennent que plus tard et ne doivent pas être surestimés.

b) *il convient de mélanger des essences différentes*, en particulier des feuillus et des résineux:

1° le danger d'incendie est diminué par la présence des feuillus.

2° la nourriture de la pédofaune est plus variée; cette pédofaune devient plus abondante et plus variée: ce facteur, trop méconnu, est décisif. Les essences dont les feuilles ont une rapide décomposition sont les plus favorables.

3° à l'inverse, *il est bon* dans le cas des sols exposés à la dégradation par l'eau qu'aux essences à décomposition rapide soient jointes quelques essences dont les feuilles se décomposent plus lentement (hêtre, chêne rouge) pour assurer le double fonction-écran (interception de la descente et de l'évaporation).

4° les enracinements à tendances évolutives différentes peuvent mieux trouver leurs places respectives et ainsi mieux occuper le volume de sol. Certaines essences peuvent (profitant pour leur propre existence de la présence des autres) s'insérer plus profondément et contribuer ainsi au si désirable approfondissement de la couche meuble. Il en est de même d'ailleurs pour les houppiers qui se juxtaposent et s'imbriquent; ils offrent ainsi aux rayons solaires une surface captatrice plus grande.

5° diminution des risques de maladies et insectes, ralentissement de leur propagation si les sujets d'une même espèce qui sont atteints ne touchent pas les autres.

c) dans les cas les plus difficiles, il faudra prévoir un peuplement transitoire (aune), ou encore un *mélange à plusieurs essences* (aune, pin Weymouth, chêne rouge et hêtre), chacune disparaissant successivement au profit de celle qui reste.

Il faudra évidemment traiter de façon différente:

- 1° les reboisements de vides,
- 2° les enrichissements par des feuillus (hêtre) de zones insuffisamment boisées,
- 3° les substitutions d'essences (enrésinement de taillis).

6.2. PLANTATIONS: il vaudra mieux planter au printemps; on utilisera la motoplanteuse maniée par 2 hommes ou portée par un tracteur; avec elle on peut évacuer si on le désire, les parties trop compactes et marmorisées et *les remplacer par de la « bonne terre » de surface*. L'opération est évidemment coûteuse. Avec l'outil « en cœur » on peut faire un bon brassage du fumier et du sol.

6.3. SEMIS DIRECTS: nous en avons fait sur plus de 70 ha avec des glands de chêne rouge d'Amérique d'une bonne race des Dombes. Ils sont particulièrement bien réussis dans les parcelles 53, 184, 1338, 1339, 1354. Les bandes sont cultivées au rotavator: un passage au printemps, un à l'automne, un peu plus profond, le troisième au printemps suivant, un peu plus profond encore. On sème un gland tous les 10 cm. Il faut prévoir 250 kg à l'hectare. Les menaces des sangliers obligent à prévoir des clôtures électriques.

Si l'on tient compte des travaux préparatoires (débroussailllements), on constate que ces travaux doivent être échelonnés sur plusieurs années; 5 ans par exemple. Les dégagements devant être poursuivis pendant 10 ans au-delà.

6.4. ÉVOLUTION DU PAYSAGE FORESTIER: un peu partout on verra les chênaies se réduire à quelques îlots; elles laisseront la place à des chênaies de chêne rouge d'Amérique avec douglas; les hêtraies s'étendront truffées de résineux plus ou moins nombreux; ailleurs, les charmaies deviendront des sapinières; les vides laisseront la place à des pineraies de Weymouth, aunes et bouleaux qui, elles-mêmes passeront à la hêtraie.

6.5. BILAN FINANCIER: une évaluation sommaire nous a donné par hectare pour 60 ans:

Travaux préparatoires	1 000 F
Semis et plantations	1 430 F
Entretien	700 F
Frais de garderie	1 000 F
TOTAL	4 130 F

Valeur escomptée des produits (600 m³) 6 550 F. Déduction faite des intérêts, il reste une marge d'environ 620 F: le repeuplement est rentable.

SOLS ET PEUPELEMENTS FORESTIERS

Sol	Peuplement actuel	Peuplement futur	
		Naturel	Artificiel
Sol caillouteux	Mauvaise rouvraie		Pineraie de pin sylvestre (par endroits avec hêtre)
Sol brun des pentes	Assez bon taillis-sous-futaie	Hêtraie avec ilots de chênes	Douglasaie - sapinière à hêtre et chêne rouge
Sol de plateau à marbrures profondes	Assez bon taillis-sous-futaie	Hêtraie avec ilots de chênes	Douglasaie - sapinière à hêtre et chêne rouge
Sol de plateau à marbrures peu profondes	Peuplement clairié		Pineraie avec feuillus
	Vide		Pineraie avec feuillus
Sol de vallon	Chênaie de pédonculé à carex	Chênaie	Pineraie de pin Weymouth

Bibliographie: FAIL, GÖHRE-WAGENKNECHT 1955, O.E.C.E. 1952, RICHARD (d.d.), TROLL 1954.

CONCLUSION

1° Histoire géomorphologique et pédologique:

On peut résumer ainsi l'histoire du massif. Au Villafranchien, dépôt de cailloutis en forme de glacis. Leur surface fut ferretisée au Mindel.

Submersion partielle par plusieurs lacs bressans successifs.

Dépôts de limons lacustres ou alluviaux, ou diluviaux (ruissellements en nappe).

Dissection du glacis aux époques interglaciaires.

Dépôt de poussières sur les parties émergées.

Altération par le froid aux diverses époques rissiennes: simple durcissement et compaction; par endroits, polygonation et marmorisation réticulée.

Au tardiglaciaire, l'érosion a fait affleurer les sols caillouteux du substratum profond et des limons alluviaux; des solifluxions se sont produites, qui ont amené des paquets de limon marmorisé dans les graviers.

Peut-être y eut-il brouillage du dessin polygonal et troncature du sol périglaciaire. En tout cas (et peut-être à plusieurs reprises) se produisit un lessivage des argiles et des hydroxydes, ainsi que la vermiculitisation et l'émiettement de certains minéraux argileux.

Peut-être y eut-il des démarmorisations superficielles.

Probablement, y eut-il enmarécagement des faibles dépressions qui furent à l'origine de certains des plus « mauvais vides » actuels.

En somme, dans le passé, une évolution pédologique périglaciaire de type encore peu étudié, mais qui a donné définitivement son caractère au sous-sol.

Ultérieurement, il y a eu, dans les limons éoliens reposant sur ces vieux sols, une marmorisation tachetée normale, la surface restant non marmorisée ou étant démarmorisée par l'exposition à un climat tempéré. Elle a été accrue par le découvert excessif (traitement en taillis-sous-futaie, incendies), et par la monoculture du chêne (elle-même en relation directe avec ces mauvais traitements); de cette dégénération (« dégradation » au sens vulgaire du mot)

l'homme est en grande partie responsable, car s'il avait respecté la forêt de l'époque atlantique, riche en hêtre, elle se serait maintenue en équilibre; le niveau compact plus ou moins marmorisé flou est remonté, diminuant l'épaisseur de la couche productrice.

Sur une bonne partie de la surface, la molinie a contribué à la dégradation.

Sur certaines parties (anciennes cuvettes marécageuses périglaciaires) ou vides très anciens dus à l'incendie, cette action de la molinie l'emporte sur celle des arbres forestiers.

Dans cette évolution, il y a un rapport étroit entre l'état de la végétation et celui du sol, chacun des deux retentissant sur l'autre. Ce sont des sols en partie phytogéniques.

Il faut dire aussi que l'évolution récente a été en partie commandée par l'évolution ancienne (sous-sol exceptionnellement compact par suite de la cryergie et du lessivage). Ce sont d'ailleurs des « sols hérités ».

2° Possibilités de restauration:

Certains défauts sont partiellement inhérents à la texture trop fine de la masse des roches-mères, ou à des phénomènes anciens (compaction, transformation des argiles): ils sont, les uns et les autres, difficilement remédiables.

Mais certains des caractères d'une partie des sols sont récents et dus aux erreurs de traitement, ils sont remédiables. La compaction récente des horizons médians et la marmorisation tachetée floue peuvent disparaître si l'on arrive à supprimer ou réduire la nappe aquifère perchée, si on ameublît ces horizons par des façons culturales, si l'on installe une végétation améliorante (au besoin par étapes). C'est ce qui est en cours depuis 1949. C'est ce qui est possible si l'on se montre conservateur et prudent.

Quant à la marmorisation contrastée, elle est probablement plus difficile à effacer (elle-même et les caractères qui lui sont attachés). Mais il ne semble pas impossible par des actions énergiques, de la maîtriser. C'est évidemment plus coûteux. On peut noter toutefois, *que le sous-sol profond est plus riche en cations que le sol lui-même*. En brassant les deux, on peut donc améliorer le sol par le sous-sol. La technique devrait toutefois être mise au point car, jusqu'à maintenant, le temps nécessaire à la restauration biologique de ce sous-sol est apparu trop long. Peut-être parviendra-t-on un jour à le réduire. L'homme de demain si féru de sa puissance, en trouvera le moyen, espérons-le. On peut, pour commencer, favoriser la descente des racines.

En tout cas, dans une économie qui se veut plus productive, *les sols de la forêt de Chaux et les sols de ce type méritent des investissements pour leur amélioration*.

Après restauration, grâce à une technique forestière suffisamment protectrice et à des investissements rentables, on peut obtenir une productivité presque doublée en volume total de bois, et surtout quintuplé en volume de bois d'œuvre et en valeur argent.

L'aménagement de conversion en futaie de la forêt domaniale de Chaux (1957) a été une mesure prise en application directe des études de la présente thèse : il a déjà des effets très heureux et en aura bien d'autres. Encore faut-il qu'il soit appliqué intégralement et surtout que les investissements prévus soient faits ; quelques mesures supplémentaires peuvent même être prises, dictées par le souci pédologique.

Un grand nombre d'autres forêts communales ou particulières sont justiciables des mêmes mesures de conversion et restauration.

Les buts à atteindre sont : circulation de l'eau interne, aération, meilleure structure, meilleur humus, meilleure microflore, enracinements plus développés.

Les moyens à employer sont : *couvert plus dense et plus continu, choix des essences, façons culturales, ouvertures de fossés, apport d'amendements et d'engrais pour amorcer les processus favorables.*

Les traitements (sylviculture et repeuplements artificiels) doivent être étroitement adaptés aux conditions locales des diverses stations.

Chaque fois que c'est possible, on se contentera de favoriser les facteurs naturels de restauration.

Si celle-ci tarde trop, on peut employer les moyens semi-artificiels.

De nombreux sols dégradés, de nombreuses friches, de nombreuses forêts clairiérées appellent ses efforts et ses soins. Parmi elles, la forêt de Chaux.

C'est un beau et noble travail en perspective pour les générations à venir !

ABREVIATIONS

Principales abréviations
(en particulier celle des périodiques)

A.A.	Annales Agronomiques.
A.E.N.E.F.	Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts.
A.F.E.Q.	Association Française d'Etude du Quaternaire.
A.F.E.S.	Association Française pour l'Etude des Sols.
A.I.N.A.	Annales de l'Institut National Agronomique.
A.S.A.F.E.	Annales de la Science Agronomique Française et Etrangère.
B.A.F.E.S.	Bulletin de l'A.F.E.S.
B.S.C.F.B.	Bulletin Société Centrale Forestière de Belgique.
B.S.G.F.	Bulletin de la Société Géologique de France.
B.S.R. Bot. Belgique	Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique.
Ch., chap.	Chapitre.
C.R. Ac. Agr. Fr.	Compte rendu des Séances de l'Académie d'Agriculture de France.
C.R. Ac. Sc., C.R.A.S.	Compte rendu des Séances de l'Académie des Sciences.
C.R.S.S.G.F.	Compte rendu des Séances de la Société Géologique de France.
d.d.	Dates diverses.
J.	Journal.
Mém. Soc. E.M.	Mémoire de la Société d'Emulation.
Mitt.,	Mitteilungen der schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen.
M.O.	Matière organique.
m. s.	Matière sèche.
P.	Parcelle
R.E.F.	Revue des Eaux et Forêts.
R.F.F.	Revue Forestière Française.
R.G.B.	Revue Générale de Botanique.
R.G.D.	Revue de Géomorphologie Dynamique.
R.G.P.G.D.	Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique.
S.C.P.A.	Société Commerciale des Potasses d'Alsace.
S.S.S.A.P.	Soil Science Society America Proceedings.
V.	Voyez.

BIBLIOGRAPHIE

Les astérisques indiquent les textes les plus importants.

- AGAFONOFF V. et MALYCHEFF V. — 1929 — Le loess et les autres limons du plateau de Villejuif. — *B.S.G.F.*
- AIGRET Cl. — 1911 — Une plante quelque peu réfractaire à l'incendie. — *B.S.R. Bot. Belgique*, XLVIII, p. 283.
- ANDERSON J.-U. and WHITE J.-L. — 1958 — A study of fragipans in some southern Indiana soils. — *S.S.S.A.P.*, p. 450-454.
- ARSENS R., KRAMER F. et LANGNER Ch. — 1958 — Ueber die Bodenstruktur, der Wasserhaushalt und die Ertragsfähigkeit von Pseudogleyen und gleyartigen Braunerden. — *Zeitschr. Acker und Pflanzenbau*, 107 p. 67-98.
- AUBER G. — 1963 — Soils with ferruginous or ferrallitic crusts of tropical regions. — *Soil Sci.*, 95, 4, p. 235-242.
- AUBERT G. et BÉTRÉMIEUX R. — 1944 — Etude des sols des prairies marécageuses de la région de Gray. — *A.A.*, p. 389-408.
- Auteurs divers (CAILLEUX, TRICART, MANTL...). — 1960 — Le périglaciaire würmien. — *Coll. Int. Liège*, 1959 (Univ. Liège), 197 p.
- BACSAK G. — 1942 — Die Wirkung der skandinavischen Vereisung auf die Periglazialzone. — *Ung. R.A.F. Meteor. Erdm.*; n.R. n° 13. Budapest.
- BARJAC (de): Voir POCHON.
- BEL B. — 1955 — Les sols de Nuits-Saint-Georges. — *A.A.*, 2, p. 383-421.
- BEL B., DENIZOT H., et MATHIEU Z. — 1951 — Minéralisation de l'azote dans quelques sols de la région de Dijon. — *C.R. Ac. Agric. Fr.*, 7 nov., 3 p. (Pour Aige d'Henroux et Chocelle).
- BENOIT E. — 1958 — Esquisse de la carte géologique et agronomique de la Bresse et de la Dombes. — *B.S.G.F.*, 2, 15, p. 315-344.
- BERGHEM C.-V. (Van den). — 1951 — Les prairies à *Molinia* de Belgique. — *B.S.R.B. Belgique*, 83.
- BERTHOIS L. — 1953 — Remarques sur la paléopédologie des limons des environs de Rennes. — *Ann. Ec. Nat. Agr. Rennes*, XV, p. 63-75.
- BERTOUILLE H. — 1964 — Ferruginisation des sables. — *Bull. de l'A.F.E.Q.*, n° 1, p. 75-84.
- BERTRAND M. — 1882 — Note sur l'âge des terrains bressans (feuille de Besançon). — *Bull. Soc. Géol.*, 3^e série, t. X, p. 256.
- BÉTRÉMIEUX R. — 1951 — Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. — *A.A.*, p. 193-296 (en particulier p. 258-261).
- BÉTRÉMIEUX R. — 1955 — Influence du plan d'eau sur la précipitation des éléments minéraux du sol. — *C.R. Ac. Sci.*, t. 241.
- BIBELRIETHER H. — Die Bewurzelung von Schwarzerlen in den Anwäldern von Prekmurje. — *Allg. F. Zeitsch.*, n° 42, 17 octobre 1965.
- BLOOMFIELD C. — 1950 — Gleying. — *Soils and fertilizers*, XII, 5, p. 319-321.
- BLOOMFIELD C. — 1950 — Some observations on gleying. — *The Journal of Soil Sc.*, Oxford, 1, 2, p. 205-211.
- BLOOMFIELD C. — 1952 — Distribution des oxydes de fer et aluminium dans les sols à gley. — *J. Soil Sc.*, 3, 2, p. 167-171.
- BLOOMFIELD C. — 1955 — Le déplacement des sesquioxides et de l'argile dans le sol: 1. Gleyification. — *Sols africains*, III, 4, oct. 1953, p. 488-494.

- BLOOMFIELD C. — 1957 — The possible significance of polyphenols in soil formation. — *J. Sc. Food Agric.*, n° 7, p. 389-392.
- BLÜMEL F. — 1962 — Formen der Eisenoxhydrat Ausscheidungen in Gleyen und Pseudogleyen. — *Z. Pflanzern Düng. Bodenk.*, p. 258-264.
- BLÜMEL F. — Bodengefügeveränderungen durch Maulwurfdränung. — *Ost. Wasservirts.*, 8, 11.
- BOGATIREW K.-P. — 1953 — (Au sujet de la question de la gleyification sur l'influence de l'eau du sol superficiel et interne dans les territoires humides et sud tropicaux). — *Pédologie*, XII.
- BOISCHOT P. et DROUINEAU G. — 1936 — Sur la présence et la constitution de concrétions ferrugineuses dans un sol méditerranéen. — *Bull. A.F.E.S.*, 3, 4.
- BONNEAU M. — 1963 — Premiers résultats d'une expérience ed fertilisation sur pin Laricio de Corse en forêt de Moulières. — *A.E.N.E.F.*, XX, 3, p. 313-341 (Sols à pseudogley de l'Ouest de la France).
- BORDES F. — 1952 — Stratigraphie du loess et évolution des industries paléolithiques dans l'Ouest du Bassin de Paris. — *L'Anthropologie*, 56, 1 et 2.
- BOUDRU M. — 1947 — A propos de certaines propriétés des feuilles, aiguilles mûres de nos arbres forestiers en liaison avec leur pouvoir améliorant. — *B.S.G.F. Belg.*, 3-4, p. 129-162.
- BOURDIER F. — 1947 — Les caractères distinctifs de chaque glaciation alpine d'après les couvertures de loess et les loess d'altération. — *Sess. Extr. Soc. Belge, Géol.*, 1946, Bruxelles, p. 332-347.
- BOURDIER F. — 1953 — Pliocènes et quaternaire dans le bassin du Rhône. Résumé de leurs subdivisions. — *Géologica Bavarica*, 19, p. 114-132.
- *BOUDIER F. — 1961 — Le Bassin du Rhône au Quaternaire (Géologie et Préhistoire). — *C.N.R.S.* (2 vol., 364 et 295 p.).
- BOURGEOAT (Abbé). — 1906 — Quelques remarques géologiques et géographiques sur la Bresse. — *Mém. Soc. Em. Jura*, 7^e série, V, p. 241-251.
- BOURGEOAT (Chanoine). — 1917 — Le conglomérat de la forêt de Chaux. — *Mém. Soc. Em. Jura*, p. 1-14.
- BOYER G. — 1885 — Sur la provenance et la dispersion des galets silicatés et quartzeux dans l'intérieur et sur le pourtour des Monts Jura. — *Mém. Soc. Em. Doubs*, 5, X, p. 414-459.
- BRAQUE R. — 1961 — Observations sur quelques sols forestiers des confins méridionaux du Bassin Parisien. — *B.A.F.E.S.*, mai, 5, p. 216-234 (analyse M, fig. 14).
- BRAY R.-H. — 1935 — The origin of horizons in claypan soils. — *Am. Soil Surv. Ass.*, Bul. 16, p. 70-75.
- BREUIL H. — 1934 — De l'importance de la solifluxion dans l'étude des terrasses quaternaires. — *R.G.P.G.D.*, VII, 4, p. 269-331.
- BROECK (Van den) E. — 1877 — Sur les phénomènes d'altération des dépôts superficiels. — Bruxelles.
- BRUNNACKER K. — 1956 — Das Lössprofil in Kitzingen (Unterfranken). — *Germania*, 34 H, 1, 2, p. 3-11.
- BRUNNACKER K. — 1958 — Zur Parallelisierung des Jungpleistozans in den Periglazialgebieten Bayern und seiner östlichen Nachbarländer. — *Geol. Jb.*, 76, Hannover, p. 129-150.
- BRUNNACKER K. — 1959 — Bemerkungen zur Parabraunerde. — *Geol. Jb.*, 76, Hannover, p. 561-576.
- BRUNNACKER K. — 1962 — Feldbodenkundliche Untersuchungen in Frankenjura. — *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch* 1 (Pseudogley-pelosol du Jura franconien).
- BRUNNACKER K. — 1963 — Die schweren Böden Bayerns in geologischer und bodengeschichtlicher Sicht. — *Bayerisches Landw. Jahrbuch*, 40, H 3.

- BRYAN K. — 1946 — The study of frozen ground and intensive frost action with suggestions on nomenclature. — *Amer. Jour. Sci.*, 244, p. 622-642.
- BUHLER A. — 1891 à 1898 — Untersuchungen über Sickerwassermengen. — *Ann. Inst. Fed. Rech. For.* Zürich, I, p. 291-322; II, p. 203-248; III, p. 37-52.
- BURGER. — 1879 — Assèchement du sol par les essences forestières. — *R.E.F.*, VIII, p. 266; XVI, p. 48 et 92.
- BURGER H. — 1923 — Physikalische Eigenschaften der Wald und Freilandböden. — Zürich.
- BURGER H. — 1934, 1943, 1945 — Einfluss des Waldes auf den Stand des Gewässer. — II. — *Mit. schweiz. Anst. f. d. forstl. Vers. Wes.*
- BURGER H. — 1937 a et suiv. — Physikalische Eigenschaften von Wald und Freilandböden. — *Mit. der Schw. Anstalt f.d.f. Vers.* (plusieurs numéros).
- BURGEVIN H. et HENIN S. — 1943 — Influence de la profondeur du plan d'eau sur le développement des plantes. — *A.A.*, 3, p. 228.
- CAILLEUX A. — 1953 — Les loess et limons éoliens de France. — *B.S.C.G.F.*, 240, I, 1, 24 p.
- CAILLEUX A. — 1956 — Mares, mardelles et pingos. — *C.R. Ac. Sci.*, C.C.X.L., II, p. 1912-1914.
- CAILLEUX A. et TAYLOR G. — 1954 — Cryopédologie. — Hermann et Cie, Paris.
- CAIN Charles C. and RIECKEN F.F. — 1958 — Sequence relationships of loess derived forested planosols in Southeastern Iowa. — *S.S.S.A.P.*, p. 445-449.
- CAMEZ Th. — 1962 — Etudes sur l'évolution des minéraux argileux dans les sols des régions tempérées. — *Mém. Serv. C. Géol. Als. Lor.* (en part. p. 42-46, 62, 63).
- CAMEZ Th. et ROTH Ch. — 1957 — Evolution des minéraux argileux des lehms des environs de Strasbourg. — *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lor.*, t. 10, f. 2, p. 21-23.
- CANAT. — 1847 — Sur le terrain lacustre de la Bresse. — *Bull. Soc. géol.*, 2^e série, t. IV, p. 1085.
- *CARLISLE F.J., KNON E.-G. and GROSSMANN R.-B. — 1957 et 1958 — Fragipan horizons in New-York soil. — *S.S.S.A.P.*, p. 21 et p. 320-330.
- CASTELA P. et TRICART J. — 1958 — Une coupe typique du cône de déjections nivopériglaciaire de la Bruche: la carrière Zimmer à Lingolsheim. — *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lor.*, 11, 2.
- CAVAILLÉ A. — 1950 — Les boubènes. — *Le Tarn-et-Garonne agricole*, p. 17-21.
- CAVAILLÉ A. — 1951a — Phénomènes de dessiccation du sol en Quercy. — *R.G.D.*, 4, p. 170-172.
- CAVAILLÉ A. — 1951b — Les sols de boubène de l'Aquitaine et les climats quaternaires. — *Rev. Géol. Pyr. et du S.O.*, XXII, f. 2-3, p. 199-206.
- CAVAILLÉ A. — 1952 — Formation, évolution et classification des sols du département du Tarn-et-Garonne. — *Ann. E.N.A.*, Montpellier, XXIX, déc., p. 39-51, 53-57, 67.
- CHABOT G. — 1927 — Les plateaux du Jura Central — Etude morphogénique. — Fac. L. Un., Strasbourg, Paris, Les Belles Lettres, 350 p.
- CIRY R. — 1951 — Contribution à l'étude des influences périglaciaires en Bourgogne. — *Bull. Soc. Archéologique Beaune. Tome spécial du Centenaire. XXII Congrès Ass. bourguignonne des Soc. Savantes*, Beaune, 4 p.
- CIRY R. — 1959 — Le rôle du sous-sol gelé quaternaire dans le modelé des plateaux bourguignons. — *C.R.A.S.*, t. 248, p. 2068-2610.
- CLEMENTS F.-E. — 1921 — Aeration and air content: The role of oxygen in root activity. — *Carnegie Instit. Wash. Publ.* 315.

- CLINE M.-G. et JOHNSCARD. — 1957 — A Contribution of the department of agronomy. — *N.Y. State Coll. of Agr. Cornell Un.* (sur l'extension des fragipan).
- COPPENET M. et HELIAS M^{me}. — 1956 — Le fer, le manganèse dans quelques profils caractéristiques du Finistère. — *Bull. A.F.E.S.*, 76, mai.
- COULSON, DAVIES C.-B. et LEWIS D.-A. — 1960 — Polyphenols in plant, humus and soil. — *The Journ. of Soil Sci.*, 11, 1 mars, p. 20-44.
- CRAENE (de) et LARUELLE J. — 1955 — Genèse et altération des latosols équatoriaux et tropicaux humides. — Ministère des Colonies, Bruxelles, 131 p.
- CROMPTON E. — 1952 — Some morphological features associates with poor soil drainage. — *Journal of Soil Sci.*, 3, 2, p. 277-289.
- DARWIN Ch. — 1882 — The formation of the vegetable mould through the action of worms, with observations on their habits. — New-York, Appleton, 326 p.
- DAUBRÉE M. — 1846 — Recherches sur la formation du minerai de fer des marais et des lacs. — *Annales des Mines*, 4^e série, t. X, p. 37-68.
- DAUBRÉE A. — 1852 — Description géologique et minéralogique du département du Bas-Rhin. — Strasbourg, p. 263.
- DAUBRÉE A. — 1887 — Les eaux souterraines à l'époque actuelle. — Dunod, t. I, p. 171-174; t. II, p. 125-131 (fig. p. 130).
- DECKERS J. — 1956 — Sols hydromorphes des hauts plateaux de l'Ardenne belge et leur mise en valeur. — 6^e Congrès Int. de la Sc. du Sol, VI, 42.
- DEJOU J. — 1963 — Etude des sols du Centre Nivernais, Région de Prémev. — *B.A.F.E.S.*, mai, p. 210-255 (avec analyses; en particulier sol de Boulon).
- DEJOU J. et LAVIELLE G. — 1964 — Observations sur les sols hydromorphes au sud de Villeveux (Jura). — *B.A.F.E.S.*, 10, p. 431-454.
- *DEJOU J. et MERIAUX S. — 1961 — Etude des sols de la vallée de l'Orain et de la Grozonne (Jura). — *A.A.*, 12, 5, p. 489-512.
- *DELAFOND F. et DEPERRET C. — 1893 — Les terrains tertiaires de la Bresse et leurs gîtes de lignites et de minerai de fer, dans: Etudes des gîtes minéraux de la France, Paris, in-4°, 2 vol. 332 p.
- *DEMOLON A. — 1926 — Recherches physico-chimiques sur la terre à brique considérée comme milieu naturel. — Thèse, Paris.
- DEMOLON A. et HENIN S. — 1954 — Place des facteurs physiques dans le syndrome caractérisant un sol au point de vue de sa capacité de production. — *C.R.A.S.*, t. 238, p. 1635-1638.
- DEMORY P. — 1936 — Les limons blanc et les limons rouges. — *C.R. Ac. Agr.*, p. 62.
- DENIZOT H., BEL B. et MATHIEU G. — 1952 et 1953 — Etude de quelques sols caractéristiques de la région de Dijon. — *A.A.* n° 2 de 1952, p. 191-206 et 5 de 1953, p. 669 à 685.
- DEUSE P. — 1949 — Sur les caractères écologiques de *Molinia Caerulea*. — *Lajeunia*, 13, p. 35-38.
- DEUSE P. — 1950 — Ecologie de *Molinia Caerulea* Moench. Germinations. — *Lajeunia*, 14, p. 53-60.
- DIJKSTRA N.-D. — 1953 — Process of gleying and migration of iron in the soil. — *Landbouwkundig Tijdschrift*, avril, p. 191.
- DOSEN R.-C., PETERSON S.-F. and PRONIN D.-T. — Effect of ground water on the growth of red pine and white pine in Central Wisconsin. — *Trans. of the Wisconsin Ac. of Sc. A. and L.*, vol. 40, p. 29-82 (la croissance en hauteur et diamètre est meilleure si le plan d'eau de la nappe phréatique est plus proche).
- DOUVILLÉ R. — 1913 a — Remarques à propos du Rhin français pliocène. — *C.R.S.S.G.F.*, p. 214-216.

- DOUVILLÉ R. — 1913b — Révision de la feuille de Besançon au 80 000^e. Terrains tertiaires et quaternaires. — *B.S.C.G.F.*, XXIII, 1913-1914, n° 136, C.R. coll. Camp. de 1913, p. 71-75.
- *DROSDOFF M. and NIKIFOROFF C.-C. — 1939 — Iron Manganese Concretions in Dayton soils. — *Soil Sci.*, 49, p. 333-345.
- DROUINEAU G. — Voir BOISCHOT.
- DUBOIS G. — 1924 — Recherches sur les terrains quaternaires du Nord de la France. Thèse Fac. Sci. Lille et Mém. Soc. géol. Nord VIII, 1.
- DUBOIS G., FRANC de FERRIÈRE P.-J.-J., BADRÉ L. — 1955 — Notice explicative de la carte géologique et agronomique du Haut-Rhin (avec carte). Préfecture du Haut-Rhin (Serv. Carte géol.).
- DUCHAUFOR Ph. — 1949 — Les sols à horizon de gley. — *R.F.F.*, nov, 8, p. 357-361.
- DUCHAUFOR Ph. — 1950 — Dégénération des sols forestiers par évolution pédologique défavorable. — *R.F.F.*, p. 241-245.
- *DUCHAUFOR Ph. — 1953a — La dégradation de la structure des sols forestiers. — *R.F.F.*, p. 657-665.
- DUCHAUFOR Ph. — 1953b — Note sur l'influence de l'incinération sur l'évolution de l'humus. — Actes 72^e Congrès A.F.A.S., Luxembourg, p. 729-731.
- *DUCHAUFOR Ph. — 1956 — Pédologie. Applications forestières et agricoles. — Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, p. 215-233.
- *DUCHAUFOR Ph. — 1957 — Pédologie. Tableaux descriptifs et analytiques des sols. — Ec. Nat. Eaux et Forêts, Nancy.
- *DUCHAUFOR Ph. — 1960 — Précis de pédologie. — Masson, p. 276-287.
- DUDAL R. — 1953 — Etude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limon loessique. — *Agricultura*, Bruxelles, 1^o, 2^e série, oct., p. 119-163.
- DUPUIS J. — 1952 — Contribution à l'étude des sols du Gâtinais. — *Ann. I.N.A.*, 256 p.
- DUPUIS J. — 1958 — Observations pédologiques dans le Sud-Ouest de la France. — *Ann. I.N.A.*, XLIV, p. 48-57 (Brandes du Poitou, et conclusions).
- DUVIGNEAUD P. et DENAEYER de SMET S. — 1960 — Action de certains métaux lourds du sol (Cu, Co, Mn, etc) sur la végétation dans le Haut Katanga. — Dans Viemot-Bourgin: Rapports du sol et de la végétation (Pour le Mn, p. 134-137).
- EBERMAVER E. — 1884 — Etude sur les exigences en eau de la végétation forestière. — *A.S.A.F.E.*, t. II, p. 283-311 (Trad. par Hickel).
- EBERMAVER E. — 1889 — Influence de la forêt et de la consistance des peuplements sur le degré d'humidité du sol. — *An. Sc. Agr. Fr. et Etr.*, t. I.
- EBERMAVER E. et HARTMANN O. — 1904 — Untersuchungen über der Einfluss des Waldes auf den Grundwasserstand. — München.
- ENGLER A. — 1887 — Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf dem Stand der Gewässer. — *Mitt. der S.A.f.d.V.*, XII.
- ENGLER A. — 1903 — Untersuchungen über der Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. — *Mitt. schweiz. Anst. Forstl. Vers. Wes.*, 12, p. 1-626.
- ENGLER A. — 1919 — Untersuchungen über der Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. — *Ann. Inst. Fed. Rech. For.*, Zürich, 1919, p. I-XV, 1-626, Suite par Burger, 1934, p. 311-416.
- ERR L. — 1933 — Ein begrabener diluviale Spaltenfrostboden in Breisgau. Sonderdruck aus den *Badischen Geologischen Abhandlungen*, V, 2, p. 132-137.
- *ETTER H. et MORIER-GENOUD P.-O. — 1963 — Etude phytosociologique des forêts du canton de Genève. — *Mémoires Inst. Suisse Rech. For.*, 39, 2.

- FAIL H. — Effet des appareils de culture rotatifs sur les mauvaises herbes à rhizomes. — *Journal of Agricultural Eng. Res.*, 1, 1, 16 p. (diffusé par Rotavator B.P. 28, Pont-Sainte-Maxence - Oise).
- FEDOROFF A. — 1961 — Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans uns sol. — *C.R. Ac. Agr.*, 47, p. 164-167.
- FINK A. — 1952 — Okologische und bodenkundliche Studien über die Leistungen der Regenwürmer für die Bodenfruchtbarkeit. — *Zeits. f. Pfl. D.B.* 58 (103) H 2, p. 120-145.
- FINK J. — 1953 — Prinzipielle Fragen bei der Erforschung fossiler Böden im Löss. — Ber. IV I.N.Q.U.A. Congrès Rome-Pise.
- FINK J. — 1954 — Die fossilen Böden im österreichischen Löss. — *Quartär VI* 2.
- *FINK J. — 1961 — Die Südostabdchung der Alpen. — *Exkursionen durch Österreich (Öst. Bodenk. Gesellschaft, Heft 6, Wien, en part. p. 175-183, avec bibl.*
- FITZPATRICK A. — 1956 — An indurated soil horizon forme a by permafrost. — *Jour. Soil. Sci.*, V, 7, p. 248-254.
- FOURNET. — 1859 — Note sur les phénomènes du lehm. — *Bull. Soc. Géol.*, 2^e série, T. XVI, p. 1049.
- FOURNET. — Sur le diluvium de la France. — *A. Sc. Géol.*, t. I, p. 98.
- FOURNET. — 1868 — Etudes sur les influences colorantes des pluies et de l'état de l'atmosphère.
- FOURNIER E. et PIROUTET M. — 1922 — Notice explicative jointe à la feuille de la Carte géologique de Besançon.
- FRANC de FERRIÈRE J. — 1935 — Evolution pédologique des sols de boulbène dans le département du Gers. — *Bull. A.F.E.S.*, juil., p. 58-62.
- FRANC de FERRIÈRE J. — Minéralogie des argiles de quelques sols de France. — *Service Agron. de la S.C.P.A.*, p. 9 et 19.
- FRANC de FERRIÈRE J. — 1963. — Minéraux argileux du Centre Est de la France. — *B.A.F.E.S.*, oct., p. 421-436.
- FRANZ H. — 1956 — Die Walddüngung im Lichte der Bodenbiologie. — *Allg. Forstz.*, 25-26.
- FRANZ H. — 1960 — Feldbodenkunde. — Verlag G. Fromme, p. 248-249, p. 311-320 (Pseudogley, Obokboden d'Autriche).
- FREI E. — s.d. — Gefügeuntersuchungen an landwirtschaftlichen Kulturböden. — *Mitt. der Eidg. landw. Versuchsanstalt Zürich-Oerlikon* (types de structure, influence des vers de terre).
- FRYE J.-C., WILLMANN H.-B. et GLASS H.-D. — Gumbotil, accretiongley and the weathering profile. — *Div. of the Illinois St Geol. Survey, Urbana; Circ.* 295.
- GAIN et RIECKEN. — 1958 — Sequence relationships of loess derived forested planosol. — *S.S.S.A.P.*
- GAISER R.-N. — 1952 — Readily available water in forest soils. — *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 16, n° 4, p. 334-338.
- GALOUX A. — 1953 a — Le hêtre et la dégradation des sols forestiers loessiques. — *B.S.R.F. Belgique*, mai, p. 228-230.
- GALOUX A. — 1953 b — Les essences forestières et l'évolution secondaire des sols. — Congrès int. U.S.R.F. Rome, 10 p. et *B.S.R.F.B.* (page 352: pour l'eau conduite par les troncs).
- GARNAUD et BAUDIC. — 1953 — Etude hydrologique par prospection géophysique en forêt de Chaux. — *Soc. Gén. de Géophysique (dactyl., hors commerce)* (6 p. et graphiques).
- GARNER ... — 1954 — New techniques for the study of restoration of compacted soils. — *Science*, 120, p. 668-669.
- GERARD C.-J. et al. — s.d. — Soil hardpan formation as affected by rate of moisture loss cycling wetting and drying and surface-applied force. — *S.S.S.A.P.*, 26, 6, p. 601-615.

- GIBERT A. — 1930 — La Porte de Bourgogne et d'Alsace (Trouée de Bel-fort). — Etude géographique, Paris, s.d., 637 p. (thèse).
- GILE (LELAND) H. Jr. — 1958 — Fragipan and water table relationships some Brown Podzolic and Low Humic Gley Soils. — *S.S.S.A.P.*, v. 22, p. 560-565.
- *GIROD J. — 1953 — Etude chimique d'un sol provenant du Bois du Baron. — *Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs*, 57, p. 73-84 (Massif de Chaux).
- GLANGEAUD Louis. — 1949 — Evolution morphotectonique du Jura septentrional pendant le Miocène supérieur et le pliocène. — *C.R. Ac. Sci.*, t. 229, p. 720-722, 10 octobre.
- GODMAN R.M. — 1959 — Are water levels an important factor in the establishment and growth of yellow birch. — *Pap. Of the Michigan Ac. of Sc.*, XLIV, p. 183-190.
- GODWIN H. et BARUCHA F. — 1932 — The water table and its control of plant communities. — *Journ. Ecol.*, 20, p. 157-191.
- GÖHRE-WAGENKNECHT. — 1955 — Die Roteiche und ihr Holz. — Deutscher Bauernverlag, 300 p.
- GOOR C.-P. van — 1954 — De bestryding van bunt (*Molinia caerulea*) op kaalkamperreinen; — Korte meded Boshouwproefstation. — T.N.O., Wageningen n° 23.
- GOOR van et autres. — 1957 — Uitvoeringe Verslagen van de Sighting Boshouwproefstation de Dorschankamp. Wageningen (lutte contre molinie).
- GOOR C.-P. van, ZONDERWIJK P. et DRIFT J. van der — 1957 — Chemische Bestrijding van Enkele grasse en houtige gewassen in de boshouw. — Centre exper. de sylviculture de Dorschkamp, Wageningen (lutte contre molinie).
- GRAINDOR J. — 1948 — Les limons quaternaires des environs de Rouen. — *A.A.*, nov., p. 659-686.
- GRAINDOR M. et BOURDIER F. — 17 avril 1950 — Les limons quaternaires de la région de Rouen et leurs relations possibles avec ceux du Bassin du Rhône. — *C.R.S.G.F.*, 171, p. 107-110.
- GRANVIGNE Ch. et OUDIN A. — 1950 — Notes sur la pédologie du département du Jura. — *A.A.*, n° 4, p. 9-12.
- GRAS Sc. — 1857 à 1859 — Comparaison chronologique des terrains quaternaires de l'Alsace avec ceux de la vallée du Rhône dans le Dauphiné. — *B.S.G.Fr.*, XV, 1857-1858, p. 148-187, 1 pl.
- GRAS R. — 1961 — Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pommier dans la Sarthe. — *A.A.*, 12, 2, p. 207-248.
- GUINOCHET et LEMÉE G. — 1950 — Contribution à la connaissance des races biologiques de *Molinia caerulea* (L) Moench. — *R.G.B.*, 57, p. 565-593.
- GUTZWILLER A. — 1895 — Die Diluvialbildungen der Umgebung von Basel. — *V. naturf. Ges. Basel*, X, 3, p. 512-690.
- GUTZWILLER A. — 1912 — Die Gliederung der Diluvialen Schotter in der Umgebung von Basel. — *V. Nat. Ges. Basel*, Bd XXIII.
- *HABIG F. — 1953 — Beitrag zur Dynamik und Genetik Stauwasserbeeinflusste Böden. — Diss. Han. Münden.
- HALLAIRE. — 1956 — L'état de l'eau dans le sol et l'alimentation en eau des végétaux. — *Bull. Soc. Fr. Phys. Vég.*, II, 1, mars, p. 1-17.
- HARTMANN F.-K. — 1930 — Ueber den waldbaulichen Wert des Grundwassers. — *Mitt. Forstwirtschaft. und Forstwiss.*, 1, p. 345-437.
- HARTMANN F. — 1952 — Forstökologie. — Vienne G. Fromme, en part. p. 20-29, 205 à 208, 209, p. 231, 232, fig. 67 et 68, p. 267 (sols à gley) fig. 67 et 68.
- HENIN S. — 1936 — Idées actuelles sur l'eau du sol et ses rapports avec la plante. — *A.A.*, 5, p. 723-741.
- HENIN S., FEDOROFF A., GRAS R. et MONNIER G. — 1960 — Le profil cultural. — *S.E.I.A.*

- HENIN S., ROBICHET O. et JONGERUS A. — 1955 — Principes pour l'évaluation de la stabilité de la structure du sol. — *A.A.*, IV, p. 537-557.
- HENRY E. — 1898 — Les forêts et les eaux souterraines dans les régions de plaine. — *A.S.A.F.E.*, I, p. 1.
- HENRY E. — 1908 — Les sols forestiers. — Berger-Levrault (en particulier ch. V, ch. VIII (vers de terre), ch. XIV (eau du sol), ch. XVIII (amélioration des sols forestiers).
- HENRY (Mlle) S. — 1943 — La forêt de Bouconne. — Toulouse, 250 p. (pour comparaison).
- HENSEN (von). — 1877 — Die Thätigkeit des Regenwurms für die Fruchtbarkeit des Bodens. — *Z.fav. Zool.*, p. 354-365.
- HESS E. — 1940 — Le rôle des feuillus dans la reforestation. — *Beih.* 19, *Schw. Z.f.f.*
- HÖHNEL (F. von). — 1880 — Über die transpiration grossen der forstliche Kolzgewächse. — *Mitt. Forst. Vers. Oster.*
- HOLSTENER-JØRGENSEN H. — Etude sur l'influence de l'essence et de l'âge du peuplement sur le plan d'eau permanent en forêt de Bregentved. — Fiche n° F 1207 de l'A.T.V.F.
- HUFTY A. — 1959-1960 — Ferruginisations en Lorraine belge et leur utilisation en géomorphologie. — *Ann. Soc. géol. de Belg.*, LXXXIII, p. 71-86.
- *HUNGER W. — 1963 — Beitrag zur Kenntnis der Böden Westsachsens. — *Arch. f. Forstwesen*, 12 Bd, H 2, p. 126-128, 132-139.
- IBERG R. — 1954 — Beitrag zur Kenntnis von Tonmineralien einiger Schweizerischer Böden. — Th. E.T.H. Zürich (profils Obergurnigel, 174, 236, 139 et Murgenthal 1001, Färrach 1031, Aspi 1020 à 1025).
- IJJASZ E. — 1938 — Grundwasser und Baumvegetation unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in der ungarischen Tiefebene. — *Erd. Kiserleteck*, Sopron, 40.
- JANEKOVIC GJURO. — 1961 — Über das Alter und den Bildungsprozess von Pseudogley aus pleistozänen Staublehm am Südwestlichen Rande des pannonischen Beckens. — Exk. durch Österreich (*Ost. Bodenk. Gesellschaft*, Heft 6, p. 184-189).
- JARNISON V.-C. et VHAVER H.-A. — 1952 — Soil hardness measurements in relation to soil moisture content and porosity. — *S.S.S.A.P.*, 16, 1.
- JEANSON-LUSINANG (Mme Colette). — 1960 a — Evolution de la matière organique du sol sous l'action de *Lumbricus herculeus* Savigny. — *C.R. Ac. Sci.*, 23 mai, t. 250, p. 3500-3502.
- JEANSON-LUSINANG (Mme Colette). — 1960 b — Etude expérimentale de l'action de *Lumbricus herculeus* (Savigny) sur la stabilité structurale des terres. — *C.R. Ac. Sci.*, 2 mai, t. 250, p. 3041-3045.
- JOFFE J.-S. — 1935 — Soil profile studies: VII The glei process. — *Soil Sci.*, 39, p. 391-401.
- JOFFE J.-S. — 1949 — Pedology. — New Brunswick (p. 429: glei-like podsol).
- *JOURNAUX A. — 1956 — Les plaines de la Saône et leurs bordures montagneuses. — Etude morphologique (thèse) — Caen, Caron, 531 pages.
- JUILLET A. et ZITTI R. — 1935 — *Molinia caerulea* Moench graminée toxique à acide cyanhydrique. — *B.S.B.F.*, p. 23-34 et *C.R. Ac. Sci.*, 1934, p. 617.
- *KNOX E.-G. — 1957 — Fragipan horizons in New York soils. — *S.S.S.A.P.*, 21, p. 320-330 (3 parties).
- KOEHNE W. — 1925 — Die Grundwasserbewegung in Grunewald bei Berlin. — *Zeitschr. für Bauwesen*, Berlin.
- KOEHNE W. — 1931 — Übermässiger Einfluss der Niederschläge bei sehr flachen Grundwasser, — *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, Jgt 26, H. 7, p. 77-78.

- KOEHNE W. — 1937 — Die Grundwasserverstandsschwankungen in Verbindung mit der Frage fortschreitenden Austrocknung. — Tr. 6^e Con. A.I.S.S. Zürich, p. 58.
- KÖSTLER J.-N. — 1956 — Waldbauliche Beobachtungen an Wurzelstöcken Sturmgeworfener Nadelbäume. — *Forst. Cbl.* (Pin Weymouth).
- KRAMER P.-J. — 1940 — Causes of decreased absorption of water by plants in poorly aerated media. — *Am. Journ. Bot.*, 27, p. 261.
- *KRAMER F. — 1957 — Über die Bodenstruktur der Pseudogleye und der gleyartigen Braunerden Diss. Bonn.
- KRAUSS G. — 1926 — Die sogenannten Bodenrkrankungen. — *Jahresh. d. Deutschen Forstvereine*, p. 121-133.
- KRAUSS G., HARTEL F., MÜLLER K., GARTNER G., SCHANZ H. — 1939 — Standortsgemässe Durchführung der Abkehr von der Fichtenwirtschaft im nordwestsächsischen Niederland. — *Thar. Forstl. Jb.*, 90, p. 481-716.
- KRAUSS G. — Voir aussi MÜLLER K., 1936.
- *KREUTZER K. — 1961 — Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 80 (11-12), nov.-déc., p. 365-392, 10 fig., 7 tabl.
- KROTH E.-M. et PAGE J.-B. — 1947 — Aggregate formation in soils with special reference to cementing substances. — *S.S.S.A.F.*, 11 (1946), p. 27-34.
- KUBIENA. — 1953 — The soils of Europe. Th. Murby and Cy. London (p. 242-248).
- KULLMANN A. — 1957 — Die Abhängigkeit der Bewurzelung von der Standortbedingungen bei *Molinia caerulea*. — *Archiv. für Forstwesen*, Berlin, t. 6, n^o 5-6.
- *LAATSCH W. — 1937 a — Entwicklungstendenz und System der deutschen Acker und Waldböden. — *Kolloid. Beih.*, 46, p. 143-228.
- LAATSCH W. — 1937 b — (Formation expérimentale d'un pseudogley). — *Koll. Beih.*, 46, p. 215.
- *LAATSCH W. — 1937-1938 — Die Gerbsäure Zerstörung nasser Eichenwaldböden. — *Forstw. Zentralblatt*.
- LAATSCH (von W.) — 1954 — Dynamik der mitteleuropäischen Mineralböden. — *Dresden Steinkopff*, en part. p. 84, 177 à 188, 234, 247 à 251, tableau III et IV (4^e éd. en 1957).
- LAATSCH W. — s.d. — Die Wissenschaftlichengrundlagen der Waldbodenemellioration.
- LACHAUSSÉE E. — 1933 — Notes sur la roulure et la gélivure du chêne. — *B.S.F.F.C.*, XXVI, 12.
- *LACHAUSSÉE E. — 1950 — Les sols sous la dominance de l'eau et de la forêt. — *R.F.F.*, mai (avec la collaboration de G. Plaisance).
- LAMBERTS D. et LIVENS P.-J. — 1954 — L'accumulation d'oxydes de fer dans les sols sur limon loessique. — *C.R. C.I.S.S.*, Léopoldville, p. 478-485.
- LANGNER Ch. — 1956 — Untersuchungen über die Bodenfeuchteverhältnisse auf starken Pseudogleyen und gleyartigen Braunerden unter Acker und Gründlandnutzung. — Diss. Bonn.
- LAVOILLE G. — 1938 — La Bresse, région naturelle et avicole. Sa délimitation. — *B.S. Nat. Ain*, p. 44-81 et 1939, p. 51-83.
- LEDEBEFF A.-P. — 1927-1928 — Die Bewegung des Wassers im Boden und im Untergrund. — *Zeitschr. f. Pfl. D. und Bodenkunde*, A. X.
- LECKWIJCK W. van et MACAR P. — 1949 — Phénomènes pseudo-tectoniques la plupart d'origine périglaciaire, dans les dépôts sablo-graveleux dits ONX et les terrasses fluviales de la région liégeoise. — *Ann. Soc. Geol. Belg.*, t. 73, M. 3-74.
- LECKWIJCK W. van et MACAR P. — 1951 — Nouvelles observations sur des phénomènes périglaciaires dans la région de Liège. — *Ann. Soc. géol. Belg.*, oct., LXXV, p. B 49-70.

- LEIBUNDGUT H. et KREUTZER K. — 1958 — Untersuchungen über die Wurzelkonkurrenz. — *Mitt. Schwe. Anstalt. d.d.f. Vrs.*, 34,5.
- LEIBUNDGUT H., DAFIS Sp. et RICHARD F. — 1963 — Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten. — *Journal forestier suisse*, 114, 11, nov., p. 621-646.
- LELAND H. — V. GILE.
- LEMÉE G.) LOSSAINT P. et autres. — 1958 — Recherches préliminaires sur les caractères biochimiques de l'humus dans quelques groupements forestiers de la Plaine d'Alsace. — *Ber. über des Int. Symp. Pfl. Bodenkund.*, 1956, H 15, et *Angewandte Pflanzensoz.*, H 15, p. 93-101.
- LEMKE K. — 1954 — Untersuchungen über das Wurzelsystem der Roteiche (non publiée). Thèse.
- LEVY J.-F. — 1964 — Potassium absorbé, potassium échangeable du sol, texture des sols. — *La Potasse*, janv., n° 311, p. 9-20.
- LIBBERT W. — 1928 — Soziologische Untersuchungen am Molinietum der neumärkische Staubeckenlandschaft. — *Verh. bot. Ver. Prov.*, Brandenburg 70, Berlin.
- LIVENS J. et VANSTALLEN R. — 1956 — Recherches sur le rôle de la litière dans la désaturation en bases des sols forestiers sur limon loessique. — *Agricultura*, 4, 2° s., 2, p. 113-132.
- LIWERANT M.-J. — 1946 — Les sols d'alluvions de la vallée de la Garonne dans la région toulousaine. — *Bull. Agric. S.O.*, 242, II, p. 1 à 19.
- LIWERANT J. — 1953 — La fumure des arbres fruitiers. — *Bull. techn. inf. I.S.A.*, juil., p. 575-581.
- LOSSAINT P. — 1951 — Influence de la végétation forestière et de la mise en culture sur l'évolution des sols sableux aux environs de Strasbourg. — *A.A.*, 6, p. 803-817 (Profil 5: chênaie à molinie).
- LOSSAINT P. — 1956a — Résultats expérimentaux sur le rôle des litières forestières dans la solubilisation du fer dans le sol. — *6^e Congrès Int. Sc. Sol. Con II*, Paris.
- LOSSAINT P. — 1957 — Sur le pouvoir réducteur de quelques litières forestières. Litières non décomposées. — *C.A.A.C.S.*, t. 245, p. 2091-2093.
- LOSSAINT P. — 1959 — Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. — *A.A.*, 10, p. 369-414, 493-542.
- LOSSAINT P. — 1961 — Etude in vitro de l'influence des litières forestières sur la minéralisation de l'azote organique dans un mull acide. — *C.R. Ac. Sci.*, t. 253, p. 2245-2247.
- LOYCKE. — 1957 — Bodenfräsen in der Forstwirtschaft. — *Allgem. Forst-zeits.*, 12, 7, 13 fév.
- LUTZ H.-J. — 1940 — Disturbance of forest soil resulting from the uprooting of trees. — *Yale Univ. Sch. of For. Bul.*, 45.
- LUZE (de) — 1927 — Les drainages en forêt. — *Journ. For. Suisse*, mai.
- LYFORD W.-H., GOODLETT J.-C. et COATES W.-C. — 1963 — Landforms, soils with fragipans and forest on a slope in the Harvard Forest. — *Harvard Forest, Bull.* 30.
- MACAR I. et LECKWIJCK (W. van). — 1958 — Les fentes à remplissage de la région liégeoise. — *Ann. Soc. Géol. Belg.*, LXXXI, mai, p. B. 369-407.
- MAIGNIEN R. — 1954 — Formation de cuirasse de plateaux, Labe (Guinée fr.). — *C.R. 5^e Congrès C.I.S.S.*, Léopoldville.
- MAIGNIEN R. — 1956 — De l'importance du lessivage oblique dans le cuirassement des sols en A.O.F. — *Rapports 6^e C.I.S.S.*, Paris, V, 76, vol. E, p. 463-467.
- MALLET J. et LIWERANT J. — 1956. — Bouconne, chênaie dégradée du pays toulousain: Sols et peuplements. — *R.F.F.*, nov., p. 1-27.

- MALSTRÖM C. — 1931 — (Le risque d'une dégénération de sols forestiers en Suède septentrionale à cause d'une montée de la nappe souterraine, combinée avec un envahissement du sol productif par une couche de tourbe). — *Medd. Statens Skogsförs.*, 26, p. 1-162 (en suédois).
- *MALTERRE H. — 1946 h — Contribution à l'étude des limons quaternaires du Bassin de Paris. — Amiens, 108 p.
- MALYCHEFF V. — 1929 à 1933 — Le loess. — *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*. II (2), 1929, p. 147-182; III (4), p. 379-398, 1930; IV (3), 1931, p. 263-281; V (3), 1932, p. 323-361; VI (2), 1933, p. 131-164.
- MANGIN. — 1896 — Etudes sur la végétation dans ses rapports avec l'aération du sol. — *A.A.*, t. I, p. 1-64.
- MANIL G. — 1958 — L'humus forestier. — 2^e partie, p. 24-25 (sols à pseudogley).
- MANIL G. — 1958 — Observations macromorphologiques microscopiques et analytiques sur les fentes de gel. — *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 81, p. B 409-421.
- MANIL G. et PECROT A. — 1954 — Les sols forestiers oligotrophes du climax des Ardennes belges. — *C.R. V^e Congrès Intern. Sci. Sol.*, Léopoldville, IV, p. 441-446.
- MARAN B., LHOŤA O. — 1952 — (La signification de la composition et du traitement du peuplement forestier sur l'infiltration de l'eau dans le sol). — *Sborn. cal. Akad. zeměd.*, 25, n° 6, p. 555-570 (en tchèque).
- MARÉCHAL R. — 1956 — L'étude des phénomènes périglaciaires en Belgique. — Rapp. Comm. Morph. Périgl. U.C.I. Rio de Janeiro, p. 83-98.
- MAROCKE R. — 1961 — Sols de l'Autriche orientale. — *Bull. A.F.E.S.*, p. 203-206.
- MARTIN J. — 1873 — Limon rouge et limon gris. Observations sur divers produits d'origine glaciaire en Bourgogne. — *Mém. Acad. Dijon*, 1871-1872, p. 1-160.
- MARTIN J.-B. (Abbé). — Sur quelques vicissitudes du lac bressan. — *B.S. Nat. Ain*, 50, p. 47-53.
- MATHIEU G. — 1932 — Contribution à l'étude de quelques rapports entre l'eau, le sol et la plante. — Thèse, Un. Clermont.
- MATHIEU G. — Voir BEL.
- *MATHON Cl. Ch. — 1954 — Notes critiques à propos d'une brève étude de la végétation en forêt de Chaux (Jura). — *Bull. Soc. Hist. Nat. du Doubs*, 56, 1952, p. 49-68.
- *MATHY W. — 1939 — Einfluss von Untergrundverdichtungen auf die Wasser und Luftbewegung in Boden. — Diss. Halle Wittenberg et Kühn Archiv., 54, 1940.
- MAZENOT G. — 1938 — Sur le « limon ferrugineux » de la vallée de la Saône, aux environs de Tournus (feuille de Mâcon au 80 000^e). — *B.S.C.G.F.*, XXXIX, n° 197, p. 187-188.
- MAZENOT G. — 1945 — Les lignites bessans. Le bassin lignitifère de Chauxmergy. — *B.R.G.G.*, n° 1, in-8°, 144 p., 35 cartes. Direction des Mines.
- MENGAUD P. — 1924 — Etude sur les boulbènes du pays toulousain. — Toulouse.
- MERIAUX Mme S. — 1954 — Etude de quelques sols caractéristiques de la région de Dijon. — *A.A.*, 1952, II, 1953, V, et 3^e pie, Granulométrie, VI, p. 985-993.
- MERIAUX Mme S. — 1958 — Stabilité structurale et composition des sols. — *C.R. Agr. Ac. Agr. Fr.*, p. 799-803.
- MERIAUX Mme S. — 1963 — Quelques faciès des sols du Dijonnais choisis dans la commune d'Arc-sur-Tille. — *Bull. A.F.E.S.*, p. 148-163 et 3 planches (profils 6, 8, 12).
- *MERIAUX Mme S. et GILLY G. — 1958 — Considérations pédologiques sur le Val de Saône. — *A.A.*, V, p. 393-636.

- *MERIAUX Mme S., GILLY G. et LAMONTRE B. — 1957 — Sur le lessivage des sols de la plaine de la Saône. — *B.A.F.E.S.*, janv., p. 715-727.
- MERIAUX Mme S. et PERREY. — 1964 — Caractères généraux et possibilités d'assainissement des sols hydromorphes de Montberthault (Côte-d'Or). — *B.A.F.E.S.*, 10, p. 397-430.
- MICHON J. — 1954 — Contribution expérimentale à l'étude, la biologie des lumbricidae. — Th. Poitiers.
- MILLOT G. — 1963 — Géologie des argiles. — Masson.
- MILLOT C., CAMEZ Th., WERNERT P. — 1957 — Evolution des minéraux argileux dans les loess et les lehms d'Achenheim (Alsace). — *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lor.*, t. 10, f. 2, p. 17-18.
- MONNIER G. — 1958 — Etude de quelques problèmes posés par l'utilisation des prairies dans l'amélioration des propriétés physiques du sol. — *Bull. A.F.E.S.*, p. 354-360.
- MÜCKENHAUSEN E. — 1950 — Über gleitartige Böden in Rheinland. — *Z.f. Pfl. D.B.*, 50, p. 97-117.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1951 — Die Böden der Nordeifel. — *Zeits. f. Pfl. D.B.*, 54 (99) Bd., H. 2, p. 97-117.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1954 — Die Beurteilung des Faktors Wasser bei den bodenkundlichen Kartierung. — *Forstarchiv.*, déc., p. 269-273.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1956 a — Die Einteilung der Wasserbeeinflussten (hydromorphen) Böden Deutschland. — *6 C.I.S.S.*, vol. E, Paris, V. 18, p. 111-114.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1956 c — Der Wasserhaushalt der Pseudogleye. — *Int. S.S. Cong.* (Hamburg), II, p. 105-111.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1958 a — Die Beurteilung des Grundwasser bei der forstlichen Standortsaufnahme. — *Landw. Angew. Wissenschaft Hilfrup*, p. 31-43.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1958 b — Der Wasserhaushalt der Pseudogleye und dessen Bedeutung für die Pflanze. — *Verhandl. der II u. IV. Kom. der Int. Bod. Ges. Halburg*, 1958, vol. II, p. 105-111.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1958 c — Bildungsbedingungen und Umlagerung der fossilen Böden der Eifel. — *Forstsch. geol. Rheinl. u. Westf.*, 2, p. 495-502.
- *MÜCKENHAUSEN E. — 1963 — Le Pseudogley. — *Science du Sol* (Versailles), mai, n° 1, p. 21-29.
- *MÜCKENHAUSEN E. — s.d. — Die wichtigsten Böden der Bundesrepublik Deutschland. — *Wissensch. Schriften. des A.I.D.*, H. XV, Profil 42.
- MÜCKENHAUSEN E. et WORTMANN H. — 1954 — Die Böden Nordrhein Westfalens. — *Zeits. f. Pfl. D. B.*, 87 (112) Bd, H 2, p. 97-116.
- *MÜLLER K., HARTEL F., KRAUSS G.-A. et WORST W. — 1936 — Standortliche Gliederung des sächs. Elbdeisterbezirks. — *Thar. Forstl. Jb.*, 87, p. 697 à 746.
- NIKIFOROFF C.-C. — Voir DROSDOFF.
- *NIKIFOROFF C.-C., HUMBERT R.-P., CADY J.-C. — 1948 — The hardpan in certain soils of the coastal plain. — *Soil Sci.*, 65, 2, p. 135-153.
- O.E.C.E. — 1952 — Ecologie des essences forestières américaines (chêne rouge, p. 124-125; pin Weymouth, p. 99-100).
- PEARSIB S. — 1907 — The level of subsoil waters with regard to forest. — *Ind. Forester*, 33, p. 57-69.
- *PECROT A. et AVRIL P. — 1958 — Les sols ardennais. II. Etude morphologique et génétique des sols hydromorphes associés aux sols bruns acides et aux sols podzoliques du Plateau de Saint-Hubert. — *Bull. Instit. Agronom. et des Stat. d. Recherch. de Gembloux*, 26, p. 151-169.
- PECSI M. — 1965 — Les recherches concernant le quaternaire de Hongrie. — *Bull. trim. d'inf. géol.* — *B.R.G.G.*, n° 66.
- PEDRO G. — 1960 — Genèse des minéraux argileux par évolution des matériaux amorphes provenant de l'altération de diverses roches. — *C.R.A.S.*, p. 1697-1699.

- *PERIGAUD Mme S. — 1961 — Problèmes posés par le drainage et l'irrigation des sols de Brenne. — *A.A.*, 12, 1, p. 145-155.
- PERIGAUD Mme S. — 1962 — Profil cultural et comportement physique des sols. — *C.R. Ac. Agr.*, fév., p. 189-194.
- PERIGAUD Mme S. — 1963 — La dynamique de l'azote dans les sols hydromorphes. — *B.A.F.E.S.*, janvier, p. 1-58.
- PIERCE R.-S. — 1953 — Oxydation - Reduction Potential and specific conductance of ground water: their influence on naturel forest distribution. — *S.S.S.P.A.*, janv., p. 61-65.
- *PLAISANCE G. — 1949 a — La forêt de Chaux. — *Rev. du Bois*, avril et juillet.
- PLAISANCE G. — 1949 b — Problèmes du taillis-sous-futaie. — *Bull. Com. forêts*, XIII, 82, p. 1180-1188.
- *PLAISANCE G. — 1950 — Les assainissements par les moyens mécaniques. — *R.F.F.*, oct., 10, p. 553-563.
- *PLAISANCE G. — 1953 a — Les chaînes de sols. — *R.F.F.*, sept., p. 565-577.
- PLAISANCE G. — 1953 b — Notions sur les catenas (et références bibliographiques). — *Bull. A.F.E.S.*, n° 44 (16 p.).
- PLAISANCE G. — 1953 c — Photographies aériennes et forêts dégradées. — *R.F.F.*, 11 (planches et fig. 2), p. 774-780.
- *PLAISANCE G. — 1953 d — Observations sur les sous-sols marmoroides de certains sols de limons. — *C.R. Ac. Sci.*, 22 juin, t. 236, p. 2435-2437.
- PLAISANCE G. — 1953 e — Les limons à sous-sols marmoroides. — *Actes du Congrès A.F.A.S.* (Luxembourg), 753-754.
- PLAISANCE G. — 1955 — Enigmes et pièges de la pédologie. — *R.F.F.*, 13, p. 909-926.
- *PLAISANCE G. — 1956 a — Les couches aquifères perchées à éclipses. — *Congrès Int. Sc. Sol.*, Paris, V, 90, p. 553-560.
- *PLAISANCE G. — 1956 b — Les sols à similigley. — *Bull. A.F.E.S.*, 73 fév., p. 392-416.
- *PLAISANCE G. — 1956 c — Procès-verbal d'aménagement de la forêt domaniale de Chaux, 3 vol. dactyl. (à consulter à l'Inspection des Eaux et Forêts de Dole).
- *PLAISANCE G. — 1959 — Les problèmes pédologiques de la forêt de Chaux. — *B.A.F.E.S.*, août, p. 342-355.
- PLAISANCE G. — 1966 — Une conversion réussie. — *R.F.F.*, fév., p. 82-98.
- PLAISANCE G. et CALLEUX A. — 1958 — Dictionnaire des sols. — La Maison Rustique (articles: Eau,...).
- *PLAISANCE G. et VAN der MAREL H.-W. — 1960 — Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de Chaux (Jura). — *A.A.*, 1960, 11 (5), p. 601-620 — 1960, 11 (6), p. 661-711 — 1961, 12 (2), p. 249-269.
- PLAISANCE G. — Voir POCHON.
- POCHON J., PLAISANCE G. et de BARJAC H. — 1958 — Gleyfication et déboisement en forêt du Jura. Incidences microbiologiques. — *Ann. Inst. Pasteur*, t. 94, p. 226-229.
- POSER H. — 1948 — Boden und Klimaverhältnisse im Mittel und Westeuropa während der Würmeiszeit. — *Erdbk.* Bonn II, 1-3, p. 53-68.
- POSER H. — 1951 — Die nördliche Lössgrenze in Mitteleuropa und das spätglaziale Klima, Eiszeitalter und Gegenwart. — I, p. 27-55.
- POURIAU. — 1858 — Etudes géologiques, chimiques et agronomiques des sols de la Bresse et particulièrement de ceux de la Dombe. — *Ann. Soc. Agric. Lyon*, 3^e série, t. II.
- PREVOT P. et autres. — 1955 — Dégradation du sol et toxicité manganique. *Oléagineux*, 4, p. 239-243.
- PRUITT A.-A. — 1947 — A study of the effects of soils, water table and drainage on the height growth of Slash and Loblolly Pine plantations on the Hofmann Forst. — *J. For.*, 45, n° 11, p. 836.

- *RICHARD F. — 1950 — Böden auf sedimentären Mischgestein im Schweizerischen Mittelland. — *Mitt. d. Schwe. Anstalt f.d.f. Vers.*, XXVI, 2 (surtout p. 808-813, 819-826 et fig. 23).
- RICHARD F. — 1955 — Über Fragen des Wasserhaushaltes im Boden. — *Schwe. Zeit. f. Forstw.*, 4, p. 1-23.
- *RID H. — 1958 — Die Stellung der pseudovergleyten Böden im Acker und Pflanzenbau. — *Congrès Ass. Int. Sci. Sol*, Hambourg, 1958, vol. II, p. 99-104.
- RID, H. et autres. — 1960 et 1962 — Untersuchungen zur Dynamik Schwerer Böden. — *Bayer Landwirtsch.*, 34, 4 et 39, 1
- *RIEDEL C.-E. et FRANC de FERRIÈRE J. — 1951 — Les sols et les climats de la Brie. — *Dir. Serv. Agric. de St-et-M.*, Melun.
- RIOU P. et DELORME G. — 1936 à 1939 — De la répartition du Mn et du Fe dans les principaux arbres à feuilles caduques du Québec. — *C.R. Ac. Sci.*, 1936, t. 203, p. 688; 1937, t. 205, p. 743; 1938, t. 207, p. 300; 1939, t. 208, p. 1671 (Sur le contenu en manganèse des plantes).
- ROISIN Paul. — 1961 — Recherches phytosociologiques dans les hêtraies ardennaises. — *Bull. Inst. Agr. et des St. de Rech. de Gembloux*, XXIX, 314.
- ROLLIER L. — 1907 — Sur la provenance des galets et des sables de la forêt de Chaux, près de Dole (Jura) et sur l'origine de la terre agraire en Franche-Comté. — *B. Soc. Agr. Haute-Saône*, p. 209-232.
- ROUSSEAU L.-Z. — 1960 — De l'influence du type d'humus sur le développement des plantules de sapin dans les Vosges. — Thèse Fac. Sci. Nancy (Action du manganèse). — *A.E.N.E.F.*, XVII, 1, 118 p.
- SCHENK E. — 1955 — Die Mechanik der periglazialen Strukturböden. — *Abh. des Hesse Landesamtes f. Bodenforschung*, H 13.
- SCHMIEDEL H. — 1955 — Löss, Staublehne und Staubböden. — *Min. Geol. Jb.*, 5, H. 5, p. 915-922.
- *SCHMIEDEL H. — 1958 — Beiträge zur Kenntnis pseudovergleyter Waldböden Sachsens. — Diss. Tharandt.
- *SCHMIEDEL (Helmut). — 1963 — Die geologischen und regional standörtlichen Grundlagen der Pseudogley Ausbildung und Verbreitung in Sachsen. — *Arch. F. Forstw.*, 12 Bd, H. 2, p. 174-210. Inst. Bodenk. Tharandt.
- SCHMIEDEL H. — s.d. — (Notes sur les conditions géologiques des pseudogley et leur occurrence en Saxe). — *Arch. Forstw.*, t. 1 2, 2, p. 174-210.
- *SCHNEIDER F. — 1950, 1954 — Übergangsbildungen von mineralischen Grundwasserböden und gleyartigen Böden (Pseudogleyen) in Nord West Deutschland. — Diss. Bonn. et Zeitschr. f. Pfl., 65 (110), n° 1-3.
- *SCHÖNHALS E. — 1951 — Fossile gleyartige Böden des Pleistozäns im Usinger Becken am Rand des Vogelsberges. — *Geol. Jg.*, 2.
- SCHÖNHALS E. — 1952 — Ergebnisse neuer Untersuchungen an Lössböden des Vogelberges. — *Notizbl. Hess. Landesamt. f. Bodenf. Wiesbaden*, 6, p. 307-340.
- SCHÖNHALS E. — 1957 — Späteiszeitliche Wird-Ablagerungen in dem Nördlichen Kalkalpen und die Entstehung der Buckelwieser. — *Natur und Volk*, 87, p. 317-328.
- SCHÖNHALS E. — 1961 — Über einige wichtige Löss- und fossile Böden in mittleren Saal und unterer Unstruttal. — *Geol. Jg.*, 10.
- SCHROEDER D. et SCHWERTMANN U. — 1955 — Zur Entstehung von Eisenkonkretionen in Böden-Naturw., 42, 9, p. 255-256.
- SIMONSON et ROY W. — 1951 — Description of mottling in soils. — *Soil. Sc.*, mars, 71, 5.
- SMITH Guy-D. — 1941 — Advantages and problems related to the field study of soil development. — *S.S.S.A.P.*, vol. 6, p. 78-82 (catena topographique, pan).

- SMITH G.-D. — 1942 — Illinois loess. Variations in its properties and distribution. — *Un. of Illinois Agr. Exp. St. B.*, 490, p. 139-183.
- SMITH G.-D. — 1946 — Siltpan subsoils in W. Virginia. — *Soil Sci.*, 62.
- *SPAETH J.-N. et DIEBOLD C.-H. — 1938 — Some interrelationships between soil characteristics water tables, soil temperature and snow cover in the forest and adjacent open areas in south central New-York. — *Cornell Univ. Agr. Exp. St.*, mars, 76 p.
- STEPHAN. — 1960 — Représentation triangulaire de la granulométrie des limons. — *Cahiers géologiques* n° 58-61, p. 603-614.
- STEVENS, CLARK LEAVITT. — 1931 — Root growth of white pine (*Pinus Strobus*). — *Yale Univ. Sch. Of. For. Bul.*, 32, p. 1-62.
- STOUT B. — s.d. — Species distribution and soils in the Harvard Forest. — *Bull.* 24.
- SWABY R.-J. — 1950 b — The influence of earthworms on soil aggregation. — *The J. of S.S.*, 1, 2, p. 195-197.
- TABER S. — 1929 — Frost heaving. — *Journ. of Geol. Chicago*, XXXVII, n° 5, p. 428-461.
- TARDY. — 1886, 1887 — Nouvelles observations sur la Bresse. Résumé général et conclusions. — *B.S.G.F.* (3), XV, p. 82-133.
- *TAVERNIER R. et MARECHAL R. — 1957 — Les sols à fragipan de la région condrusienne. — *Pédologie*, VII, p. 199-203.
- TELFER (David) et al. — 1957 — The restoration of a structurally degenerated soil. — *S.S.S.A.P.*, p. 131-134.
- TAVERNIER R. — 1945 — Phénomènes périglaciaires en Belgique. — *Bull. Soc. belge Et. géogr. Louvain*, 14, p. 112-133.
- THEOBALD N. — 1933 — Les alluvions du pliocène supérieur de la région du Sundgau. — *C.R.S.G.F.*, p. 124-126, 15 mai.
- THIRION-PUJOS J. — 1948 — La mesure expérimentale sur le terrain du pouvoir filtrant des sols arables. — *L'Eau*, 35°, 10, p. 169-173.
- TONNARD V. — 1955 — La pédogénèse dans la forêt de Saint-Michel. — *Bull. Inst. Agr. St. Rech. Gembloux*, XXIII, I, p. 66-89.
- TOURNOUER R. — 1882 — Nouvelles observations sur les terrains bressans. — *Bull. Soc. géol.*, 3° série, t. X, p. 264.
- TRICART J. — 1949 — Premiers résultats d'une étude des phénomènes périglaciaires dans les alluvions quaternaires de Basse-Alsace. — *C.R. som. Soc. Géol. Fr.*, Paris, 11-12, p. 224-227.
- TRICART J. — V. CASTELA.
- TRIEPIER L. — 1901 b — Les forêts en Bresse, Dombes et Revermont; la question du rosat. — *Bourg. Ann. Soc. Ém. et Agric.*, 32 p.
- TROLL H.-J. — 1954 — Die Lupinen als Objekte verschiedener Forschungsrichtungen im Verlauf ihrer Anbauentwicklung. — *Vorträge aus den Gebieten Acker und Pflanzenbau Bodenk. und Ph.*, p. 34-45.
- TURC L. — 1958 a — Influence de la fermentation d'une litière végétale sur la dynamique du fer dans un sol en place. — *C.R.A.S.*, t. 247, p. 1639-1642.
- TURC L. — 1958 b — Le bilan d'eau des sols. Relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. — Thèse, Paris.
- VAN der MAREL: Voir MAREL.
- VAULOT G. — 1910 — La forêt domaniale de Chaux, sa restauration. — *Bull. Soc. For. Fr. Comté*, juin, p. 604 et déc., p. 866. Voir aussi l'analyse d'un mémoire du même auteur dans le *Bull.* de sept. 1910, p. 775.
- WACHTER — 1916 et 1921 — Das Wurzelwachstum der Pflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Grundwasserverhältnisse. — *Mitt. d. Landesamt. f. Wasserhyg.*, E 21 et 26.
- *WILDE S.-A. — 1940 — Classification of gley soils for the purpose of forest management and reforestation. — *Ecology*, 21, p. 31-44.

- *WILDE S.-A. et al. — 1953 — Influence of the forest cover on the state of the groundwater table. — *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 17, n° 1, p. 65-67.
- *WILDE S.-A. and PRONIN D.-T. — 1950 — Growth of trembling aspen in relation to ground water and soil organic. — *S.S.S.A.P.*, 1949.
- WILDE S.-A. et ZICKER F.-L. — Influence of the ground water table upon the distribution and growth of aspen et jack. — Notes 30, Wis. St. Cons. Dept.
- WILLIAMS V.-R. — 1946 — *Traité de pédologie* (trad. du russe par le S.I.G.), p. 78-83.
- *WINTERS E. — 1938 — Ferromanganesiferous concretions from some podzolic soils. — *Soil Sci.*, 45, p. 33-40.
- *WINTERS E., SIMONSON R.-W. — s.d. — The Subsoil. — *Adv. in Agronomy*, 3, p. 2-92.
- WITTICH W. — 1959 — Die Verbesserung des Wasserhaushaltes durch Forstkulturmassnahmen. — *Allg. Forstz.*, 10, 5 p.
- WITTICH W. — 1961 — Der Einfluss der Baumart auf den Bodenzustand. — *Allg. Forstz.*, 2, 4 p.
- WITTICH W. et al. — 1958 — Auswertung von Düngungs und Meliorationsversuchen in der Forstwirtschaft. — *Ruhr Stickstoff Aktieng. Bochum*, 168 p.
- WITYN J. — 1934 — The gley process. — *Proc. IX, Agr. Congress. in Latvia, Riga*, p. 1-14.
- WYSSOTSKI G.-N. — 1905 — Gley. *Potschowowedjenie*, 7, p. 231-327.
- *YASSAGLOU N.-J. and WHIRZITSZ Z.-P. — 1960 — Morphology and genesis of some soils containing fragipans in northern Michigan. — *S.S.S.A.P.*, v. 24, p. 396-407.
- *ZAKOSEK H. — 1952 — Über die Deutung des Profilgepräges gleyartiger Böden. — Thèse.
- *ZAKOSEK H. — 1954 a — Zur Beurteilung von Pseudogleyen. — *Zeitsch. f. Pfl. D. B.*, 65 (110) Bd, H. 1-3, p. 27-31.
- *ZAKOSEK H. — 1954 b — Über die Bedeutung des Bodens für die Ergänzung der Grundwasservorräte. — *Z. Deutsch. Geol. Ges. Hannover*, Dez. Hannover, Bd 106, 1 T., p. 36-40.
- *ZAKOSEK H. — 1954 c — Über die Pseudogleye in der Rheinpfalz. — *Notizbl. Hess. L. Anat. Bodenforsch.*, 82, p. 258-268.
- ZAKOSEK H. — 1954 d — Zur Beurteilung von Pseudogleyen. — *Z. f. Pfl. D. und B.*, 65 (110) Bd, H. 1 - 3, p. 27-31.
- ZAKOSEK H. — 1956 — Grundwasser und Staunässe. — *Zeitschr. f. Pfl. D., B.*, 74 (119) Bd., H. 3, p. 240-242.
- *ZAKOSEK H. — 1960 — Durchlässigkeituntersuchungen an Böden unter besonderer Berücksichtigung der Pseudogleys. — *Abb. hess. L. Amt. Bodenforsch.*, 32, 63 p. Wiesbaden.
- ZAVALISHIN A.-A. — 1928 — Quelques observations sur la connaissance des sols avec un horizon de gley haut perché. Hommage à Glinka. — *Leningrad Sel. Sko. Khoz. Inst.*, p. 45-90.
- ZEUNER F.-E. — 1935 — Diluviale Frostspalten in Schlesien. — *Jb. geol. Ver. Oberschlesiens, Gleiwitz*, p. 97-105.
- ZITTI (RADU). — 1934 — *Molinia caerulea* Moench (Mélisse bleue). Etude botanique et toxicologique. — Thèse, Pharmacie Montpellier, n° 235, Impr. Marie Lavit, 112 p.
- ZON R. et AVERELL J.-L. — 1928 — The effect of drainage on forest growth. — *Jour. Agr. Eng.*, n° 6.
- ZUNKER. — 1950 — Die wasserwirtschaftliche Bedeutung des Waldes. — Vortrag Dresden.

PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

I. Niveaux d'eau à 20 cm dans une fosse en taillis-sous-futaie.
(Cl. PLAISANCE.)

II. Sol de vide à molinie avec horizon délavé et plan d'eau,
(Cl. TOULGOUAT.)

III. Sous-sol aliotique parfaitement consolidé.
(Cl. PLAISANCE.)

IV. Détail de sous-sol marbré; les trainées blanches très courtes sont dues aux racines, les autres résultent du jeu des fragmentations et de la pénétration des racines.

(Cl. PLAISANCE.)

V. Les vides à molinie vus d'avion dans la région de la Châtelaîne.
(Cl. I.G.N.)

VI. Trouée à molinie en X^e Série
(lacunes de la régénération lors de la conversion).
(Cl. PLAISANCE.)

VII. Envahissement de la molinie après la coupe du taillis-sous-futaie.
(Cl. PLAISANCE.)

VIII. Carte de la forêt de Chau xen 1725: dans le quart inférieur gauche (partie Nord-Est de la forêt) les zones avec petits numéros sont d'immenses vides.
(Cl. BIGNON.)

IX. Embroussaillage par la bourdaine en bordure d'un vide:
c'est un premier stade de reforestation.

(Cl. TOULGOUAT.)

X. Embroussaillage spontané préparatoire à la reforestation naturelle:
la molinie n'est pas encore éliminée.

(Cl. PLAISANCE.)

XI. Excavatrice à godets John Allen ouvrant une tranchée dans un vide.

(Cl. PLAISANCE.)

XII. Charrue à deux versoirs pour l'ouverture des fossés.

(Cl. PLAISANCE.)

XIII. Vide traité par la méthode des billons à la charrue.
(Cl. PLAISANCE.)

XIV. Destruction de la molinie par le hêtre sous son couvert.
(Cl. PLAISANCE.)

XV. Peuplement de chênes rouges d'Amérique de la Première Colonne
à 45 ans.

(CL. PLAISANCE.)

XVI. Jeune futaie de hêtre provenant de conversion en X^e série: âge 40 ans.
(Cl. PLAISANCE.)

A La photographie du sol de Crissey II montre le sous-sol marbré (et consolidé), et le sol rendu grumeleux par l'action conjuguée des agents atmosphériques, de la végétation, et de la faune du sol, sur une épaisseur de 45 cm.

- B Dans une trouée à molinic, le sol est noir et le niveau des marbrures est très élevé par suite de la persistance de la nappe aquifère perchée.

C En coupe horizontale, on distingue les polygones de fragmentation, probablement paléopédologiques et dus à une dessiccation cryogénique.

D Sur les marches de l'escalier (20 cm, 40 cm, 60 cm)
on distingue les différences de la marmorisation.

RÉSUMÉ

Pour étudier les sols marmorisés, plus fréquents qu'on ne le croit et bien représentés en forêt de Chaux, il fallait rappeler les conditions naturelles (climat, roche-mère, forme du terrain). Il fallait, ensuite, décrire leurs propriétés physiques (en particulier celle décisive, de l'eau stagnante à l'intérieur sous forme de nappe perchée, leurs propriétés chimiques et biologiques; puis décrire les types principaux et signaler quelques variantes. Enfin la marmorisation a été analysée: elle résulte d'un ensemble complexe de phénomènes anciens et de phénomènes actuels; elle revêt, d'ailleurs, des formes nettement différentes (marmorisation tachetée, marmorisation réticulée, concrétionnement).

Diverses comparaisons sur des couples d'échantillons permettent de mieux saisir la nature du phénomène.

L'étude des effets du sol sur la végétation et de la végétation sur le sol, éclairée par l'étude historique des dégradations conjointes des sols et des peuplements, débouche sur les applications sylvicoles: bases générales et techniques pratiques.

Après 22 ans d'expérience, nous considérons qu'une telle amélioration est possible par l'emploi conjugué de moyens naturels et d'autres semi-artificiels: la nappe aquifère perchée peut être contenue dans des limites plus étroites dans le temps et dans l'espace, et ses effets nocifs endigués; de la sorte, l'épaisseur meuble et vivante disponible pour les racines peut être accrue par reconquête de la couche médiane marmorisée et même par celle d'une partie du sous-sol consolidé, grâce à des mesures sylvicoles protectrices.

ZUSAMMENFASSUNG

Um die marmorierten Waldböden, die häufiger vorkommen als man gewöhnlich annimmt, - der Wald von Chaux ist ein Beispiel dafür - zu untersuchen, mussten wir zuerst die natürlichen Bedingungen - Klima, Bodengestaltung und Muttergestein - darstellen. Desweiteren mussten wir auf die physikalischen Eigenschaften, insbesondere die Tagwasserrückstau die für diese Böden entscheidend ist, sowie auf die chemischen und biologischen Eigenschaften der marmorierten Böden eingehen, die wichtigsten Haupttypen beschreiben und auf einige Varianten hinweisen. Schliesslich haben wir die Marmorierung untersucht, und dürfen ihre Erscheinung durch das Zusammenwirken einer ganzen Reihe von älteren und neueren Vorgängen erklären. Die Marmorierung kann sich übrigens sehr unterschiedlich ausgestalten (fleckige Marmorierung, netzförmige Marmorierung, Konkretionen).

Mehrere paarweise Vergleiche zwischen Proben ermöglichen eine deutlichere Einsicht in die Verhältnisse dieser Erscheinung.

Die Untersuchung der Wechselwirkungen von Boden und Vegetation die durch geschichtliche Studien der gleichzeitigen Degradationen der Böden und der Bestände deutlich werden, erlauben Schlussfolgerungen auf die allgemeinen und praktischen Grundlagen der Waldbautechnik zur Meliorierung der marmorierten Waldböden.

Nach den Versuchen, die wir 22 Jahre lang durchgeführt haben, halten wir eine solche Verbesserung durch die gleichzeitige Verwendung von natürlichen und halb-künstlichen Mitteln für möglich. Wir können die zeitliche und räumliche Ausdehnung des stagnierenden Tagwassers einengen und dessen schädliche Wirkung abschwächen. Der den Wurzeln zur Verfügung stehende Bodenraum wird durch das Eindringen der Wurzeln in die marmorierte Mittelschicht und zu einem geringen Teil auch in den verdichteten Unterboden unter Anwendung waldbaulicher Schutzmassnahmen vergrössert.

SUMMARY

To study the mottled soils, which occur more often than generally thought and are well represented in the forest of Chaux, it was necessary to go over the natural conditions (climate, parent material, configuration of soil). Then we had to describe their physical properties (particularly those essential of internal stagnant water as perched water table), their chemical and biological properties; then describe the main types and indicate some phases. Finally we analysed mottling; it results from the complex combination of elder and recent phenomena; it takes on extremely different forms (spotted mottling, reticulate mottling, concretion).

Some comparisons made with couples of samples show better the nature of that phenomenon.

The study of the interaction of soil and vegetation, supported by the historical study of the coexisting degradation of soils and stands, leads to silvicultural applications; general bases and practical methods.

The experiments have been carried on during 22 years, and we now consider that it is possible to achieve such an improvement if we jointly use natural means and semi-artificial means: the perched water table, in regard to time and space, can be restricted and its injurious effects reduced; in this way, the mellow and living layer, as room disposable for the roots, can be increased through the regainment of the mottled middle-layer, and even of a small proportion of the consolidated upper subsoil, by means of protective methods.