

FB 21

Hommage de l'auteur

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Christian JUSTE

AG BX

1^{re} THÈSE

Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique : application à leur mise en valeur

2^e THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 5 décembre 1965 devant la Commission d'examen :

M. le Doyen AUBRY *Président.*

MM. DUCHAUFOUR
MANGENOT
HÉNIN } *Examineurs*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, Paris-7^e

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

LISTE DES PROFESSEURS :

Doyen :

M. AUBRY.

Assesseur :

M. GAY.

Doyens honoraires :

MM. CORNUBERT, DELSARTE, URION, ROUBAULT.

Professeurs honoraires :

MM. GROZE, RAYBAUD, LAFFITTE, LERAY, JULY, LAPORTE, EICHORN, GODEMENT, DUGREUIL, L. SCHWARTZ, DIEUDONNÉ, DE MALLEMANN, LONGCHAMON, LETORT, DODE, GAUTHIER, GOUDET, ULMER, CORNUBERT, CHAPELLE, GUÉRIN, WAHL.

Maîtres de conférences honoraires :

MM. LIENHART, PIERRET.

Professeurs :

MM.
URION Chimie biologique.
DELSARTE Analyse supérieure.
ROUBAULT Géologie.
CAPELLE Mécanique rationnelle.
VEILLET Biologie animale.
BARRIOL Chimie théorique.
BIZETTE Physique.
GUILLIEN Électronique.
GIBERT Chimie physique.
LEGRAS Mécanique rationnelle.
BOLFA Minéralogie.
NICLAUSE Chimie.
FAIVRE Physique appliquée.
AUBRY Chimie minérale.
DUVAL Chimie.
COPPENS Radiogéologie.
FRÜHLING Physique.
SUHNER Physique expérimentale.
HILLY Géologie.
LE GOFF Génie chimique.
CHAPON Chimie biologique.
HEROLD Chimie min. industrielle.
SCHWARTZ B. Exploitation minière.
GAYET Physiologie.
*MALAPRADE Chimie.
HADNI Physique.
BONVALET Mécanique appliquée.
*KERN Minéralogie.
*BASTICK Chimie.
DUCHAUFOUR Pédologie.
NÉEL Chimie org. industrielle.
GARNIER Agronomie.

MM.

*WEPPE Minéralogie appliquée.
BERNARD Géologie appliquée.
*CHAMPIER Physique.
*RÉGNIER Physico-chimie.
*GAY Chimie biologique.
*WERNER Botanique.
*CONDÉ Zoologie.
STÉPHAN Zoologie.
EYMARH Calcul différentiel et intégral.
LEVISALLES Chimie organique.
MANGENOT Botanique.
M^{me} HERVÉ Méthodes mathématiques de la Physique.
*GOSSE Mécanique physique.

Maîtres de conférences :

ROCCI Géologie.
VUILLAUME Psychophysologie.
M^{me} BASTICK Chimie M. P. C. (Épinal).
GUDEFIN Physique.
HORN Physique propédeutique.
FRENTZ Biologie animale.
AUROUZE Géologie.
MARI Chimie (I. S. I. N.).
LAFON Physique (I. S. I. N.).
FELDEN Phys. théorique et nucléaire.
FLÉCHON Physique M. P. C.
VIGNES Métallurgie.
M^{me} HUET Mathématiques S. P. C. N.
DEVOT Physique du solide.
BLAZY Minéralogie appliquée.
(E. N. S. G.).
BALESDENT Thermodynamique Chimie appliquée.
JANOT Physique M. P. C. (Épinal).
JACQUIN Pédologie et Chimie agricole.
GACHAN Entomologie appliquée.
(E. N. S. I.).
MARTIN Chimie M. P. C.
MAINARD Physique M. G. P.
N... Probabilités et statistiques.
N... Mécanique (I. S. I. N.).
N... Mathématiques.
N... Mécanique expérimentale.
N... Génie chimique.
N... Mathématiques M. P. C.
N... Mathématiques S. P. C. N.
N... Mécanique des fluides
(I. S. I. N.).
N... Mathématiques appliquées.
N... Physiologie animale.

* Professeur titulaire à titre personnel.

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE
DE L'ALUMINIUM DANS LES SOLS ACIDES
DU SUD-OUEST ATLANTIQUE :
APPLICATION A LEUR MISE EN VALEUR**

C. JUSTE

SOMMAIRE

PREMIÈRE PARTIE — LES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE	15
CHAPITRE I. — GÉNÉRALITÉS	17
CHAPITRE II. — LES SOLS SABLEUX DES LANDES DE GASCOGNE.....	19
1. Facteurs de formation	19
A — <i>Roche-mère</i>	
B — <i>Climat</i>	
a) <i>Pluviosité</i>	
b) <i>Température</i>	
c) <i>Diagrammes ombrothermiques</i>	
d) <i>Les vents</i>	
C — <i>Nappe phréatique</i>	
D — <i>Végétation</i>	
2. Description de quelques profils caractéristiques des sols sableux des Landes de Gascogne.....	26
A — <i>Profil développé en lande humide</i>	
B — <i>Profil développé en lande sèche</i>	
C — <i>Profil développé sur vieille dune littorale : sol squelettique</i>	
3. Caractères essentiels des sols sableux des Landes de Gascogne	31
A — <i>Texture</i>	
B — <i>Matière organique</i>	
C — <i>Rapports C/N</i>	
D — <i>Aluminium échangeable</i>	
E — <i>Aluminium et fer solubles dans les acides forts</i>	
F — <i>Capacité d'échange, degré de saturation en bases, pH-eau et pH-KCl N</i>	
4. Conclusion	34
CHAPITRE III. — LES SOLS DE TOUYAS DES BASSES-PYRÉNÉES.....	35
1. Facteurs de formation	35
A — <i>Roche-mère</i>	
a) <i>Sols du flysch</i>	
b) <i>Sols des terrasses supérieures et moyennes du Quaternaire</i>	
B — <i>Climat</i>	
a) <i>Pluviosité</i>	
b) <i>Température</i>	
c) <i>Diagrammes ombrothermiques</i>	

C — <i>Relief</i>	
D — <i>Végétation</i>	
2. Description de quelques profils caractéristiques des sols de touyas des Basses-Pyrénées	38
A — <i>Profil développé sur le flysch crétacé</i>	
B — <i>Profil développé sur les terrasses du Quaternaire ancien</i>	
3. Caractères essentiels des sols de touyas	41
A — <i>Texture</i>	
B — <i>Matière organique</i>	
C — <i>Aluminium échangeable</i>	
D — <i>Aluminium et fer solubles dans les acides forts</i>	
E — <i>Capacité d'échange, degré de saturation en bases, pH-eau et pH-KCl N</i>	
F — <i>Rapports C/N</i>	
4. Conclusions	44
CHAPITRE IV. — CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE	45
DEUXIÈME PARTIE. — DYNAMIQUE DE L'ALUMINIUM DANS LES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE.....	47
CHAPITRE I. — DÉFINITION	48
CHAPITRE II. — MOBILISATION DE L'ALUMINIUM DANS LES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE	49
1. Mobilisation par voie chimique	
A — <i>Identification des acides organiques contenus dans une litière forestière</i>	
a) <i>Rappel bibliographique</i>	
b) <i>Technique utilisée</i>	
c) <i>Résultats obtenus</i>	
B — <i>Influence de quelques acides organiques sur la mobilisation de l'aluminium</i>	
a) <i>Technique utilisée</i>	
b) <i>Types de sols étudiés</i>	
c) <i>Résultats obtenus</i>	
d) <i>Discussion des résultats</i>	
e) <i>Conclusion</i>	
2. Mobilisation de l'aluminium par voie biologique.....	56
A — <i>Définition et rappels bibliographiques</i>	
B — <i>Mobilisation de l'aluminium par la végétation des sols acides du Sud-Ouest atlantique</i>	
a) <i>Rapports Al⁺⁺⁺/Fe⁺⁺⁺ dans les végétaux et dans le substrat</i>	
b) <i>Concentrations en Al⁺⁺⁺ et en Fe⁺⁺⁺ dans les différentes espèces végétales</i>	
c) <i>Accumulation comparée du fer et de l'aluminium dans le Pin maritime (Pinus pinaster)</i>	
d) <i>Conclusion</i>	
C — <i>Mobilisation de l'aluminium par voie microbienne</i>	
D — <i>Conclusion</i>	

	9
CHAPITRE III. — REDISTRIBUTION DE L'ALUMINIUM DANS LES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE	68
1. Distribution de l'aluminium soluble dans les acides forts et de l'aluminium échangeable dans quelques profils caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique	68
A — <i>Sols sableux des Landes de Gascogne</i>	
a) <i>Sols squelettiques de dunes</i>	
b) <i>Sols formés en lande sèche</i>	
c) <i>Sols formés en lande humide</i>	
B — <i>Sols de touyas</i>	
a) <i>Sols du ftych</i>	
b) <i>Sols des terrasses moyennes et supérieures du Quaternaire ancien</i>	
C — <i>Conclusion</i>	
2. Comparaison entre la distribution du fer et celle de l'aluminium dans quelques profils caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique	69
A — <i>Sols sableux des Landes de Gascogne</i>	
B — <i>Sols de touyas</i>	
3. Influence des colloïdes humiques sur la redistribution de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique	72
A — <i>Technique utilisée</i>	
B — <i>Profils étudiés</i>	
C — <i>Résultats obtenus</i>	
a) <i>Sols sableux des Landes de Gascogne</i>	
b) <i>Sols de touyas</i>	
D — <i>Discussion des résultats</i>	
a) <i>Sols sableux des Landes de Gascogne</i>	
b) <i>Sols de touyas</i>	
c) <i>Origine de certains composés du fer et de l'aluminium contenus dans les électrophorégrammes d'acides humiques</i>	
E — <i>Conclusion</i>	
4. Influence de la végétation sur la redistribution de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique	82
A — <i>Rapports Al⁺⁺⁺/Fe⁺⁺⁺ dans la végétation en place, dans les fragments de végétaux en voie de décomposition et dans les litières</i>	
B — <i>Variation des teneurs en fer et en aluminium des pseudophylles de pins maritimes, au cours de leur décomposition à l'air libre</i>	
C — <i>Comparaison de la solubilité dans l'eau des composés du fer et de l'aluminium contenus dans les pseudophylles de pins maritimes</i>	
a) <i>Technique utilisée</i>	
b) <i>Résultats obtenus</i>	
c) <i>Discussion des résultats et conclusion</i>	
D — <i>Influence de la température de séchage de la matière végétale sur la solubilité dans l'eau de l'aluminium contenu dans des pseudophylles de pins maritimes</i>	
E — <i>Nature des substances organiques associées à l'aluminium dans les extraits aqueux de pseudophylles de pins maritimes</i>	
a) <i>Technique utilisée</i>	
b) <i>Résultats obtenus et discussion</i>	
c) <i>Conclusion</i>	

F — <i>Nature des substances organiques associées à l'aluminium dans des extraits aqueux d'Erica scoparia</i>	
a) <i>Technique utilisée</i>	
b) <i>Résultats obtenus et discussion</i>	
c) <i>Conclusion</i>	
CHAPITRE IV. — CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	95
TROISIÈME PARTIE. — ALUMINIUM ÉCHANGEABLE ET MISE EN VALEUR DES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE	99
CHAPITRE I. — PHYTOTOXICITÉ DE L'ALUMINIUM	100
1. Rappel bibliographique sommaire	100
2. Influence de l'aluminium sur le développement et la nutrition minérale de jeunes plantules de maïs cultivées sur sable	102
A — <i>Technique expérimentale utilisée</i>	
a) <i>Milieu de culture</i>	
b) <i>Matériel végétal</i>	
c) <i>Solution nutritive</i>	
B — <i>Traitements</i>	
C — <i>Déterminations effectuées</i>	
D — <i>Résultats obtenus</i>	
E — <i>Discussion des résultats</i>	
3. Influence de l'aluminium sur l'absorption du phosphore par des racines excisées de maïs	108
A — <i>Technique expérimentale utilisée</i>	
B — <i>Traitements effectués</i>	
a) <i>Influence de doses croissantes de Al⁺⁺⁺ sur l'absorption de P à partir d'une solution aqueuse de phosphate monopotassique de concentration donnée</i>	
b) <i>Influence de la concentration en phosphate sur l'effet exercé par une concen- tration donnée en Al⁺⁺⁺ sur l'absorption de P</i>	
c) <i>Influence de la nature du cation introduit dans la solution phosphatée sur l'absorption de P</i>	
d) <i>Effet exercé par l'aluminium sur l'absorption de P en fonction de l'état des racines</i>	
C — <i>Résultats obtenus</i>	
D — <i>Discussion des résultats</i>	
4. Influence de l'aluminium sur la croissance de jeunes plantules de pins maritimes	113
A — <i>Technique expérimentale utilisée</i>	
B — <i>Traitements effectués</i>	
C — <i>Observations et déterminations</i>	
D — <i>Résultats obtenus</i>	
E — <i>Discussion des résultats</i>	
5. Conclusion	116
CHAPITRE II. — INFLUENCE DU CHALAGE SUR LA PHYTOTOXICITÉ DE L'ALUMINIUM ÉCHANGEABLE DES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE	117

	II
1. L'aluminium échangeable dans les différents types de sols acides du Sud-Ouest atlantique	117
2. Influence du chaulage sur la croissance de jeunes plantules d'orge cultivées dans un sol de défriche de touyas (horizon de surface d'un profil développé sur le flysch crétacé)	118
A — <i>Technique utilisée</i>	
B — <i>Traitements effectués</i>	
C — <i>Résultats obtenus et discussion</i>	
3. Influence du chaulage sur la croissance de jeunes plantules de blé cultivées dans un sol de défriche de lande humide (zone sableuse des landes de Gascogne)	120
A — <i>Technique utilisée</i>	
B — <i>Traitements effectués</i>	
C — <i>Résultats obtenus et discussion</i>	
4. Influence du chaulage sur la croissance du maïs cultivé en plein champ (sol de touyas des Basses-Pyrénées)	121
A — <i>Protocole expérimental</i>	
B — <i>Traitements effectués</i>	
C — <i>Résultats obtenus et discussion</i>	
5. Conclusion	123
 QUATRIÈME PARTIE. — CONCLUSION GÉNÉRALE	 125
 CINQUIÈME PARTIE. — TECHNIQUES ANALYTIQUES	 127
1. Dosage colorimétrique de l'aluminium	128
A — <i>Réactifs utilisés</i>	
B — <i>Technique opératoire</i>	
C — <i>Action de l'acide ascorbique sur l'interférence de Fe⁺⁺⁺</i>	
2. Déterminations se rapportant aux sols	130
A — <i>Aluminium échangeable</i>	
B — <i>Aluminium et fer solubles dans les acides forts</i>	
C — <i>Composés humiques</i>	
a) <i>Extraction et dosage des acides humiques et fulviques</i>	
b) <i>Fractionnement chimique</i>	
c) <i>Fractionnement par électrophorèse et dosage de Al⁺⁺⁺ et de Fe⁺⁺⁺ contenus dans les électrophorégrammes</i>	
d) <i>Étude par spectroscopie infrarouge</i>	
3. Déterminations se rapportant aux végétaux	133
A — <i>Préparation et minéralisation des échantillons végétaux</i>	
B — <i>Dosage de l'aluminium</i>	
C — <i>Dosage du fer</i>	
D — <i>Dosage de l'acide phosphorique</i>	
E — <i>Dosage du calcium, du magnésium et du potassium</i>	
 SIXIÈME PARTIE. — BIBLIOGRAPHIE	 137

PRÉFACE

Pour beaucoup de personnes, le Sud-Ouest atlantique évoque avant tout de vastes territoires recouverts de forêts et de landes. L'existence de tels paysages, par ailleurs souvent remarquables et toujours très attachants, ne manque pas de paraître insolite dans une région où des conditions climatiques très clémentes et la présence d'une civilisation depuis toujours orientée vers les activités de la terre sont en contradiction flagrante avec la persistance d'immenses zones apparemment délaissées ou incultes.

Cet état de choses ne peut s'expliquer que par les caractères particuliers du facteur sol, caractères qui font que, de tout temps, la lande et la forêt ont été considérées comme les seuls types de formations végétales capables de subsister dans ces secteurs. La mise en valeur de cette région ou, plus exactement, la substitution dans certaines parties de celle-ci d'une activité purement agricole à une activité sylvicole ou pastorale, ne peut donc techniquement réussir que dans la mesure où seront mieux connues et précisées les caractéristiques initiales de ces sols ainsi que les modifications qu'il convient d'y apporter pour que cette substitution devienne possible. Le but de ce travail est de fournir une contribution à l'étude de l'une de ces caractéristiques : l'acidité et la présence d'aluminium mobile qui en constitue le corollaire essentiel.

Avant d'exposer nos travaux, nous tenons à manifester notre sincère gratitude à M. le P^r DUCHAUFOUR qui, avec sa bienveillance coutumière, a accepté de nous diriger et de nous faire bénéficier de sa profonde connaissance des phénomènes pédologiques. Nous exprimons notre respectueuse reconnaissance à M. le Doyen AUBRY, qui a bien voulu nous faire l'honneur de présider notre Jury, ainsi qu'à MM. les P^{rs} MANGENOT et HÉNIN pour l'intérêt qu'ils ont manifesté vis-à-vis de nos recherches en acceptant de juger cette thèse. Nous ne manquerons pas non plus d'adresser à M. DUTIL, Maître de recherches à la Station d'Agronomie du Sud-Ouest nos remerciements les plus vifs pour les conseils précieux et les encouragements amicaux qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de notre travail.

Nous exprimons notre vive reconnaissance à M. BUSTARRET, Directeur général de l'Institut national de la Recherche agronomique, à M. HÉNIN, Chef du département Agronomie de cet Institut, ainsi qu'à M. DELMAS, Directeur de la Station d'Agronomie du Sud-Ouest, qui ont toujours manifesté de l'intérêt pour nos travaux et qui nous ont accordé les moyens nécessaires pour les mener à bien.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble du personnel de la Station d'Agronomie du Sud-Ouest et plus particulièrement MM. LASSERRE et SOLDA qui ont apporté à la réalisation de ce travail une contribution dévouée et amicale.

PREMIÈRE PARTIE

LES SOLS ACIDES
DU SUD-OUEST ATLANTIQUE

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

La région du Sud-Ouest atlantique correspond à la partie du Bassin aquitain soumise à l'action climatique dominante de l'Atlantique : elle est limitée à l'Ouest par la bordure du golfe de Gascogne et à l'Est, très schématiquement, par une ligne joignant l'île d'Oléron au plateau du Lannemezan en passant par la Double et le Bas Armagnac.

Selon ENJALBERT (1960), on délimite ainsi une « province pédologique assez bien définie où dominent les sols acides ». Effectivement, à quelques rares exceptions près, l'acidité constitue le lien commun unissant les sols développés sur les sables des landes de Gascogne, les sols du flysch basco-béarnais, les sols de graves de la Gironde et ceux du pays de l'Adour et de la Double.

Nous avons choisi pour notre étude les sols appartenant à deux unités pédologiques particulièrement remarquables comprenant l'une les sols développés sur les sables des landes de Gascogne et l'autre les sols développés sur le flysch crétacé des Basses-Pyrénées (sols de touyas).

Ces deux unités, qui représentent la majeure partie du Sud-Ouest atlantique, se caractérisent par un certain nombre de points communs :

— En premier lieu, elles correspondent à des zones où l'empreinte climatique a été particulièrement forte, le maximum d'intensité de ce facteur se manifestant cependant pour les sols du flysch pyrénéen.

— Les roches-mères qui ont donné naissance à ces sols sont très pauvres en alcalins et alcalino-terreux, de telle sorte que les formations qui en dérivent ne peuvent être qu'acides.

— La végétation spontanée qu'ils supportent constitue un autre trait commun de ces sols : elle est bien entendu de nature essentiellement acidophile et, notamment dans le cas des Landes, elle reflète le terme ultime de la dégradation du climax (DUCHAUFOUR, 1958). C'est en partie l'intervention humaine qui est responsable de cette dernière : les déforestations abusives, les « brûlis » répétés des terrains de parcours, le fauchage systématique de la végétation spontanée de certaines landes, l'implantation de la monoculture du pin et, pour finir, les grands incendies de forêts des dernières décennies ont amorcé ou accéléré les processus de dégradation. Il faut cependant noter que, malgré l'ampleur qu'elle revêt quelquefois, l'action de l'homme dans ces régions a été essentiellement une action de surface qui a respecté la plupart du temps l'intégrité des profils.

— Un dernier caractère commun à ces deux unités pédologiques est qu'elles correspondent toutes deux à des zones où, avec plus ou moins de succès, on tente une remise en valeur des sols en essayant de les intégrer dans le groupe des terres cultivables.

Malgré tous ces points communs, les sols des Landes de Gascogne et ceux du flysch basco-béarnais diffèrent par certains aspects ; parmi ceux-ci, il en est un dont l'importance est primordiale puisqu'il conditionne le degré d'évolution des formations de surface : il s'agit de la texture. Effectivement, les sols des Landes ont une texture sableuse grossière qui ne s'oppose pas aux processus d'entraînement vertical, alors que bien au contraire les sols du flysch ont une texture fine qui freine le lessivage et retarde par là même la différenciation des horizons. C'est surtout grâce à des différences tenant à la texture que l'on peut expliquer que les sols du flysch pyrénéen, pourtant soumis à une hauteur de précipitations largement supérieure à celle reçue par les Landes de Gascogne, sont finalement moins évolués morphologiquement que les sols qui ont pris naissance sur la couverture sableuse landaise.

CHAPITRE II

LES SOLS SABLEUX DES LANDES DE GASCOGNE

1. Facteurs de formation

A. — ROCHE-MÈRE

Les Landes de Gascogne forment un vaste triangle délimité par l'Atlantique à l'ouest, par l'Adour au sud et, à l'est, par une ligne grossièrement parallèle à la Gironde-Garonne, joignant la Pointe de Grave au petit village de Vianne dans le Lot-et-Garonne (fig. 1).

Cette vaste région naturelle de plus d'un million d'hectares constitue, selon l'expression d'ENJALBERT (1960), « un monde à part » dans le Bassin aquitain.

Cette originalité, les Landes de Gascogne la doivent à la nappe de sables qui les recouvre entièrement.

L'origine éolienne de ces sables est aujourd'hui à peu près admise par tout le monde ; d'après ENJALBERT, leur mise en place se serait effectuée entre la fin du Quaternaire et le début du Mésolithique, à une époque où régnaient vraisemblablement des climats extrêmement secs, l'absence de végétation permettant la progression des sables littoraux, poussés vers l'intérieur du continent sous l'action de vents violents soufflant du Sud-Ouest vers le Nord-Est. En fait, l'ennoyage des anciens reliefs par la masse sableuse ne se serait pas effectué de manière continue : les périodes sèches auraient alterné avec des périodes plus humides, au cours desquelles le creusement des vallées aurait repris, avec entraînement et rejet à la mer d'une partie des sables accumulés dans les anciens lits fluviaux ; une phase plus sèche survenant à nouveau, l'épandage des sables sur le continent reprenait tandis que, dans les vallées, ceux non encore entraînés vers la mer étaient repris par les vents et soufflés sur le plateau, où ils s'accumulaient en dunes continentales. La dernière période sèche correspondrait au Mésolithique supérieur ; c'est à partir de cette époque que se serait installée, sous l'action d'un climat doux et humide, une couverture végétale suffisante pour fixer définitivement le modelé de la région. La formation du barrage dunaire qui ferme les étangs littoraux serait relativement récente : elle correspondrait sensiblement à la remontée flandrienne du niveau marin.

Les sables landais sont essentiellement quartzeux ; selon SERONIE-VIVIEN (1950), ils comprennent 75 à 90 p.100 de grains ronds mats témoignant d'un transport éolien et de 10 p.100 environ de grains émoussés luisants résultant d'un transport par l'eau. 70 à 90 p.100 de ces sables se classent dans la fraction granulométrique comprise entre 100 et 200 microns.

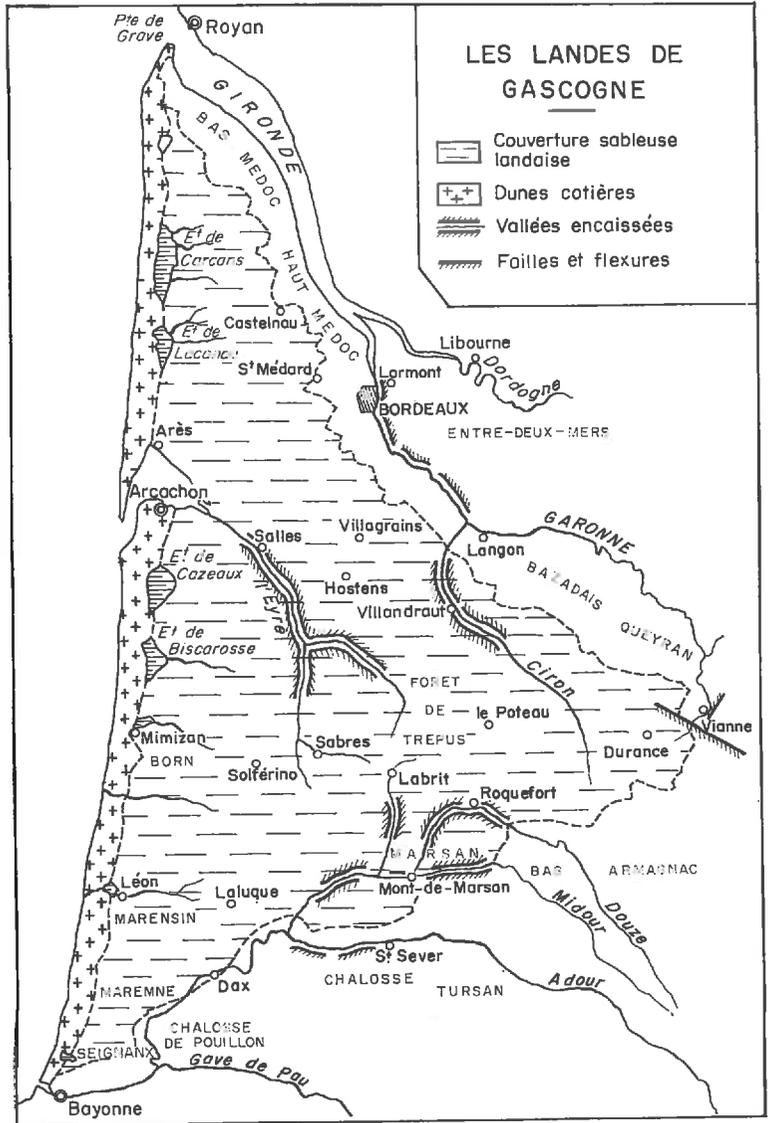


FIG. 1. — *Les Landes de Gascogne*
 (D'après H. ENJALBERT, 1960. *Les pays aquitains. Le Modelé et les Sols*)

A côté du quartz, on trouve une proportion variable mais généralement assez faible de minéraux lourds. D'après SÉRONIE-VIVIEN, leur pourcentage varie de 0,20 à 0,25 p.100, l'Andalousite, la Staurotide et la Tourmaline en constituant à parts égales la majeure partie. DELMAS, dans une étude détaillée non encore publiée, montre que la teneur en minéraux lourds semble décroître quand on progresse du littoral vers l'intérieur du continent (tabl. 1). Ce fait, qui traduit un transport éolien préfé-

TABLEAU 1
Teneur en minéraux lourds de quelques sables des Landes
(d'après J. DELMAS)

Lieu de prélèvement	Taux de minéraux lourds (mg/g de sable)	
Extrémité Est du plateau landais : Roquefort	1,4	
Centre-Ouest du plateau landais {	Moustey	1,6
	Mezos	2,2
	Ychoux	2,4
Sud-Ouest du plateau landais . . {	Parentis	2,6
	Castets	3,5
	Soustons	4,2
	Magescq	12,8
Zone littorale {	sable de dune, flanc marin	15,3
	sable de dune, flanc continental	21,0
	sable de plage	113,5

TABLEAU 2
Importance relative des différents minéraux lourds dans quelques sables landais
(d'après J. DELMAS)

Pour 100 grains de minéraux lourds	Horizon A ₁ d'un podzol	Horizon B ₁ d'un podzol (alios)
Tourmaline	30	22
Staurotide	23	13
Zircon	14	25
Rutile	4	11
Grenat	*	*
Anatase	6	9
Andalousite	23	16
Épidote	0	*
Amphibole	0	0
	100	96

* = < 1 p. 100

rentiel des éléments les plus légers, peut aussi signifier que les sables les plus continentaux sont plus particulièrement pauvres en minéraux lourds parce qu'ils ont subi pendant plus longtemps l'action des facteurs d'altération. En ce qui concerne la nature de ces minéraux, DELMAS, comme SERONIE-VIVIEN, conclut à la prédominance de la Tourmaline, de la Staurotite et de l'Andalousite (tabl. 2).

L'examen de plaques minces de sables landais révèle par ailleurs la présence à peu près constante de micas, de feldspaths et d'hydroxydes de fer enrobant les grains de quartz (AGAFONOFF, 1936 ; CAILLÈRE et HÉNIN, 1951).

Les réserves minérales autres que la silice que renferment les sables des Landes sont donc loin d'être négligeables ; on voit mal d'ailleurs comment il aurait pu en être autrement, la couverture végétale spontanée souvent puissante qui recouvre certaines zones ne pouvant se justifier que par l'existence de ces réserves.

B. — CLIMAT

a) Pluviosité — Pluviosité annuelle (tabl. 3)

La région landaise est soumise à des hauteurs de précipitations croissantes du Nord au Sud et d'Est en Ouest. La partie la plus arrosée correspond au triangle Mimizan-Tartas-Bayonne, la partie orientale du plateau et le Médoc représentant

TABLEAU 3

Normales des précipitation (en mm)
Landes de gascogne — Période 1921-1950.
(Météorologie Nationale, Juin 1959)

Station	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. annuel.
Soort-Hossegor (Sud-Ouest)	110	100	80	90	90	70	60	80	95	125	145	145	1 190
Lacanau-Médoc (Nord)	92	70	63	53	59	45	52	54	84	103	118	112	905
Bordeaux	82	71	67	62	67	67	55	61	80	84	108	104	918
Mont-de-Marsan (Sud)	85	89	70	80	85	66	55	70	70	78	100	105	942

les zones les moins pluvieuses, où la moyenne annuelle est cependant toujours supérieure à 650 mm.

Régimes pluviométriques :

On note l'existence de deux périodes pluvieuses, l'une printanière et l'autre automnale ; juillet et août correspondent à peu près partout à la période la plus sèche.

D'une manière générale, le rapport des pluies automnales aux pluies printanières diminue régulièrement lorsque l'on pénètre plus en avant dans le continent.

b) *Température* (tabl. 4)

L'influence modératrice de l'océan se manifestant sur l'ensemble du plateau landais, les variations thermiques sont relativement faibles. La région de Mont-de-Marsan est plus particulièrement chaude en été, alors que le Marensin (région sud-occidentale) possède les plus faibles amplitudes thermiques.

TABLEAU 4

Moyennes annuelles des températures normales, minima et maxima
Landes de Gascogne — Période 1921-1950
(Météorologie nationale, décembre 1956)

Station	Température normale (°C)	Température minimum (°C)	Température maximum (°C)
Bordeaux-Mérignac .	12,6	7,4	17,8
Mont-de-Marsan	12,8	7,1	18,5

c) *Diagrammes ombrothermiques*

La carte des intensités de la sécheresse et de la subsécheresse en Aquitaine (P. REY, 1957) montre que la majorité des Landes se trouve dans la zone correspondant au 1/6 de l'intensité de la subsécheresse de référence (subsécheresse de Carcassonne). La partie médocaine et orientale du plateau landais se trouve dans la zone correspondant au 1/3 de l'intensité de la subsécheresse de référence. On définit cette intensité de subsécheresse comme étant la surface délimitée par l'intersection des courbes P (pluviométrie en fonction du temps) et T (température en fonction du temps), l'échelle des ordonnées étant choisie de telle sorte que la relation $P \text{ (mm)} = 3 T \text{ (}^\circ\text{C)}$ soit satisfaite.

Les diagrammes ombrothermiques de la station de Bordeaux (fig 2), indiquent que l'intensité de la subsécheresse de cette station est nettement supérieure à celle de la station de Mont-de-Marsan (fig. 3), ce qui est conforme aux indications fournies par la carte de REY.

d) *Les vents*

« Le vent joue un rôle essentiel dans les Landes » (DUCHAUFOR, 1948). En premier lieu, c'est le vent qui est responsable de la mise en place et de la morphogénèse des sables landais.

Son action actuelle est surtout intense dans la zone littorale mais elle se manifeste aussi dans les zones dénudées par les coupes et les incendies. Cette action aboutit quelquefois à un véritable décapage des horizons de surface, mettant à jour des hori-

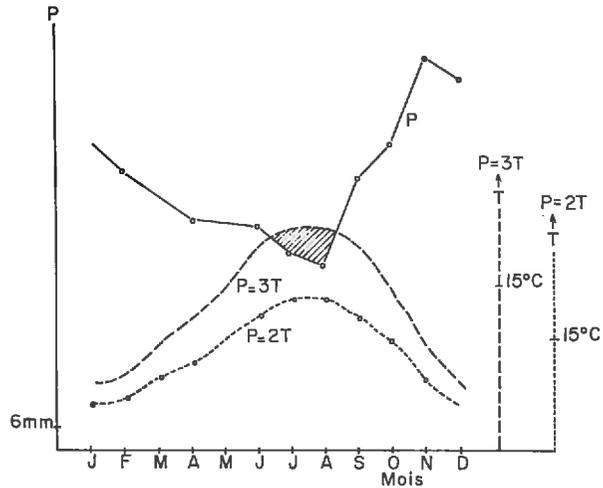


FIG. 2. — Diagramme ombrothermique de la station de Bordeaux (1921-1950)

P = 3 T : subsécheresse P = 2 T : sécheresse

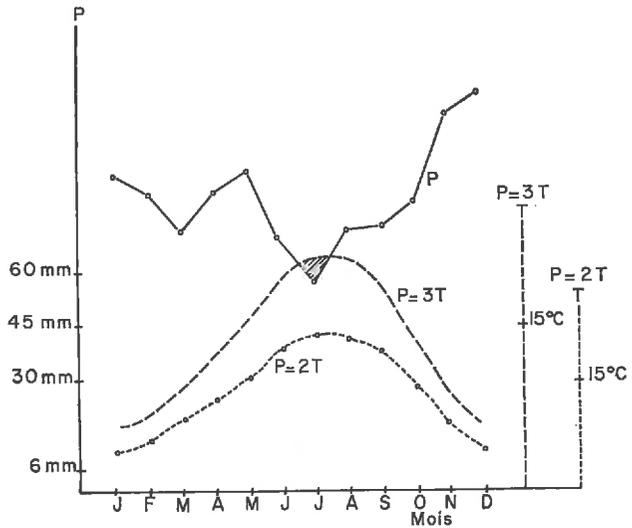


FIG. 3. — Diagramme ombrothermique de la station de Mont-de-Marsan (1921-1950)

P = 3 T : subsécheresse P = 2 T : sécheresse

zons sous-jacents plus cohérents ; inversement, elle peut conduire dans certains cas à la formation de profils complexes résultant de la superposition de plusieurs profils. Enfin, en incorporant des sables aux litières ou en balayant ces dernières, l'action du vent conduit à une véritable dilution de la matière organique et à un rajeunissement des profils : c'est vraisemblablement à l'influence dominante de cet élément que l'on doit l'aspect très peu évolué des sols en voie de formation sur les dunes littorales.

C. — NAPPE PHRÉATIQUE

A différentes reprises, DUCHAUFOUR (1948-1949) a insisté sur le rôle fondamental joué par la nappe phréatique dans la genèse des sols landais ; ce rôle de la nappe est d'autant plus important qu'avant l'intervention humaine les deux tiers du pays étaient inondés durant la majeure partie de l'année.

ENJALBERT (1960) a analysé en détail les hypothèses susceptibles d'expliquer cette immersion prolongée du pays landais, phénomène qui peut paraître paradoxal dans une zone essentiellement sableuse, où les meilleures conditions semblent réunies pour faciliter l'évacuation rapide des eaux pluviales. Effectivement, on ne peut incriminer l'absence de pente, celle-ci étant en moyenne, pour l'ensemble du plateau, de deux à trois mètres par kilomètre dans le sens Est-Ouest. On ne peut non plus rendre responsable de cet état de choses le barrage des dunes côtières, certaines de ces zones comme le Marensin et le Born figurant parmi les mieux drainées de la région. Enfin, on peut difficilement invoquer l'existence d'un horizon argileux continu sous la nappe sableuse, cette dernière reposant indifféremment sur les formations géologiques les plus diverses (calcaires, sables fauves, graves, argiles).

ENJALBERT attribue cette permanence des eaux hivernales à l'absence d'un réseau de drainage naturel suffisamment développé, les quelques axes existants (Eyre, Ciron, Avance, Midouze) n'étant pas assez ramifiés pour assurer l'assainissement de trop larges interfluves ; cette carence du réseau hydrographique correspond à une forme « d'arémisme des pays humides », comparable à celle que l'on peut observer dans la Pampa argentine du sud de Buenos-Aires.

Les premiers grands aménagements des Landes (Chambrelent et Crouzet) ont consisté précisément à compenser cette insuffisance du réseau naturel par la création des fossés à ciel ouvert (« Crastes »). Par la suite, l'implantation de la forêt a contribué de son côté à favoriser l'abaissement général du plan d'eau ; cependant, il faut insister sur le fait que ces interventions sont beaucoup trop récentes pour que l'on puisse se permettre de sous-estimer le rôle joué par la nappe phréatique dans la formation des sols landais.

D. — VÉGÉTATION

L'examen de la carte de la végétation, publiée en 1955 sous la direction de GAUSSEN, par LASCOMBES et LEREDDE, montre la dominance de deux types d'associations : l'une à base de *Molinia coerulea* (lande mal à très mal drainée) et l'autre à base de *Calluna vulgaris*, cette dernière caractérisant les zones très bien drainées. Entre ces deux extrêmes, on trouve *Ulex europæus* (lande à drainage déficitaire) et *Pteridium aquilinum* (lande normalement drainée), *Helianthemum alyssoides* occupant les zones à drainage intense.

La nature des associations actuelles est donc étroitement liée aux conditions de drainage du substrat. Dans son étude écologique de la *Chênaie atlantique française*, DUCHAUFOUR (1948), lorsqu'il définit les différents types de végétation caractérisant les sols landais, conclut que le terme de l'évolution des associations paraît être presque partout une lande humide à *Erica scoparia* et à *Molinia coerulea* sur podzol humique à alios ; la végétation à base de *Pteridium aquilinum* et d'*Ulex euro-*

peus représente une forme transitoire entre la chênaie acide dégradée des sols littoraux et la lande à *Ericacées* et *Molinie*, qui reflète le terme ultime de la régression du climax.

Un doute subsiste quant à la définition exacte de ce dernier. D'après DUCHAUFOUR (1948), le climax des Landes était une forêt où les chênes devaient dominer mais où les pins représentaient cependant un élément important.

BARRY et *al.* (1952), bien qu'admettant la possibilité d'existence d'une forêt primitive à l'état de « chênaie-pineraie », précisent bien cependant qu'à leur avis les pins devaient être répartis, soit en taches, soit à la lisière des peuplements de feuillus.

ENJALBERT (1960) croit à une association climacique de lande rase, du type *Erica scoparia-Ulex europæus*, les feuillus (chênes tauzins notamment) colonisant sous forme de forêts-galeries les bordures de rivières ou pénétrant sporadiquement à l'intérieur de la haute lande au cours de périodes à climat plus sec.

Le problème de la présence ou de l'absence du Pin dans le climax landais constitue pourtant un point dont l'élucidation est de première importance pour les pédologues quand on sait l'action dégradante marquée qu'exerce cet arbre sur les sols. D'après les cartes du boisement de Cassini et de Belleyem (citées par REY, 1947), le Pin maritime constituait en 1800 l'essence dominante dans toute la région centrale des Landes, où il semblait former des peuplements purs ; le maximum de densité était atteint aux abords des étangs, dans le Marsan et le long des axes de drainage naturels ; il était très rare à cette époque en Médoc et tout à fait absent sur les dunes littorales.

À partir de 1859, la progression du massif forestier fut très rapide et, en 1936, la forêt landaise qui couvrait absolument tout le territoire atteignait son apogée. Après les grandes incendies de 1940-1947, la surface boisée régressait énormément, les zones à *Molinie* (landes mal drainées) figurant parmi les plus atteintes.

De cette histoire très succincte de la forêt landaise, on retiendra simplement que la plupart des sols de cette région ont sûrement subi, certains pendant plus d'un siècle et demi, l'empreinte du Pin maritime. C'est là une certitude dont on doit tenir compte dans l'interprétation des phénomènes pédologiques observés.

2. Description de quelques profils caractéristiques des sols sableux des Landes de Gascogne

Malgré l'apparente homogénéité du substrat, les sols développés sur les sables des Landes de Gascogne possèdent des degrés d'évolution extrêmement variés. C'est ainsi que DUCHAUFOUR (1948) distingue, dans le sous-secteur des Landes de la Chênaie atlantique, les types de sols suivants :

— *les sols squelettiques et les sols jeunes* : ils se sont développés sur la vieille dune ; le profil est homogène et il est très difficile d'y mettre en évidence une différenciation des horizons ;

— *les sols podzoliques* : on les rencontre dans la zone de transition s'étendant au niveau de la région des étangs littoraux, en arrière de la vieille dune. Ce sont des secteurs à fougères et ajoncs d'Europe, où la croissance du pin maritime est généra-

lement remarquable ; dans ces sols, l'horizon illuvial est enrichi en fer mais, par contre, l'accumulation de matière organique est très peu marquée.

— *les podzols* : on les subdivise en podzols jeunes (podzols sans alios), podzols humo-ferrugineux à alios et podzols humiques à alios ; ils se caractérisent par la présence d'un horizon illuvial enrichi en matière organique et en hydrates de fer, horizon que l'on désigne communément par le terme d'alios. C'est essentiellement le niveau moyen de la nappe phréatique durant l'hiver qui conditionne l'évolution des podzols vers l'un de ces trois types.

Trois profils caractéristiques seront décrits en détail : deux sont situés sur le plateau continental (P_1 et P_2), le troisième, S_1 , étant un sol squelettique de dune littorale.

P_2 et P_1 caractérisent, l'un la lande à drainage déficitaire (P_1) et l'autre (P_2) la lande bien drainée. Ces deux profils ont été choisis parce qu'ils offrent la particularité d'être situés à une dizaine de mètres l'un de l'autre (fig. 4), dans une région qui

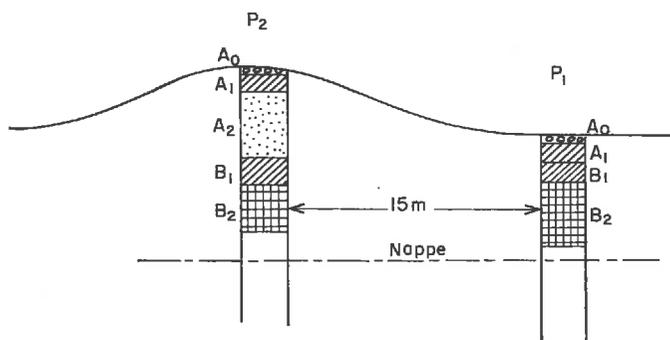


FIG. 4. — Schéma de situation de deux profils P_1 (lande humide) et P_2 (lande sèche) caractéristiques des sols sableux des Landes de Gascogne

correspond cependant à une zone où domine la lande humide ; on peut en effet trouver quelquefois, dans ces zones où la nappe phréatique est proche de la surface du sol durant la majeure partie de l'hiver, des buttes mieux drainées où se développe une végétation caractéristique de la lande sèche : c'est sous l'une de ces buttes que s'est formé le profil P_2 . Le choix de ces deux formations a été fait dans le but de bien mettre en évidence que, pour des conditions climatiques et des substrats pratiquement identiques, l'évolution de ces sols des Landes ne dépend plus que de la position moyenne de la nappe et du type de végétation qui en dérive.

A. — PROFIL DÉVELOPPÉ EN LANDE HUMIDE (P_1)

Emplacement : Le Puch, Cestas (Gironde) ;

Roche-mère : sable des Landes ;

Relief : plaine ;

Usage actuel : pineraie (jeunes pins maritimes de 12 à 15 ans) ;

Végétation : *Molinia coerulea* (4) — *Erica scoparia* (3) — *Ulex nanus* (1) — quelques *Erica tetralix* ;

Description :

- A₀ (0-20cm) : Litière, consistance fibreuse. Couleur (Munsell) : 10 YR — 3/2. Brun grisâtre très foncé ;
 A₁ (20-38 cm) : Très riche en matière organique. Couleur : 10 YR — 3/1. Gris très foncé ;
 B₁ (38-56 cm) : Horizon d'accumulation (alios). Couleur : 10 YR — 5/3. Brun.
 B₂ (56-85 cm) : Horizon d'accumulation. Couleur : 10 YR — 6/4. Brun jaune clair.
 C (> 85 cm) : Frange d'altération de la roche-mère.

Analyse (tabl. 5).

TABLEAU 5

Caractères analytiques du profil P₁
(Lande humide)

Horizon	A ₀	A ₁	B ₁	B ₂
Profondeur (cm)	0-20	20-38	38-56	56-85
<i>Granulométrie</i> (p. 100 terre fine séchée à l'air)				
Argile, < 2 μ		3,0	2,0	
Limon fin, 2-20 μ		6,0	2,0	
Limon grossier, 20-50 μ		2,5	1,5	
Sable fin, 50-200 μ		6,5	7,5	
Sable grossier, 200-2000 μ		70,5	82,5	
<i>Matière organique</i> (p. 100 terre fine séchée air)				
Carbone	8,3	6,5	1,7	0,4
Azote	4,93	3,81	1,01	0,24
C/N	0,23	0,20	0,07	0,02
pH-eau	22	19	14	11
pH-KCl N	4,8	5,1	5,2	5,8
	3,8	4,1	4,4	4,4
<i>Complexe absorbant</i> (méq./100 g t. fine séché. air)				
K ⁺		0,04	0,01	
Na ⁺		0,15	0,08	
Ca ⁺⁺		0,47	0,24	
Mg ⁺⁺		0,06	0,03	
Al ⁺⁺⁺		2,5	0,8	
S		3,2	1,2	
T		17,0	6,0	
S/T × 100		19	20	
<i>Aluminium et fer</i> (p. 1 000 terre fine séchée air)				
Al ⁺⁺⁺ échangeable	0,220	0,227	0,069	0,036
Al ₂ O ₃ S.A. (1)	10,040	14,500	12,690	3,700
Fe ₂ O ₃ S.A. (1)	3,500	2,730	5,050	0,810

(1) Al₂O₃ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts.
 Fe₂O₃ S.A. = fer soluble dans les acides forts.

Commentaire :

- Taux important de matière organique, décroissant régulièrement en profondeur ;
- C/N de l'ordre de 20 en surface et décroissant régulièrement en profondeur ;
- Capacité totale d'échange de 17 méq./100 g dans le A₁ ;
- pH-eau et pH-KCl N respectivement de l'ordre de 5 et 4 en surface ;
- Accumulation notable d'aluminium échangeable dans les horizons de surface ;
- Accumulation d'aluminium et de fer solubles dans les acides forts dans les horizons de surface (indices d'entraînement apparents Al₂O₃ = 1,3 ; Fe₂O₃ = 1,4).

B. — PROFIL DÉVELOPPÉ EN LANDE SÈCHE (P₂)

Emplacement : Le Puch, Cestas (Gironde).

Roche-mère : sable des Landes.

TABLEAU 6

Caractères analytiques du profil P₂
(Lande sèche)

Horizon	A ₀	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂
Profondeur (cm)	0-13	13-30	30-56	56-75	75-150
<i>Granulométrie</i> (p. 100 t. fine séchée à l'air)					
Argile, < 2 μ.....		0			0,7
Limon fin, 2-20 μ.....		1,0			0,8
Limon grossier, 20-50 μ.....		1,0			0,5
Sable fin, 50-200 μ.....		7,5			9,0
Sable grossier, 200-2 000 μ.....		81,0			83,5
<i>Matière organique</i> (p. 100 t. fine séché. air)					
Carbone	6,4	6,9	1,8	1,8	1,8
Azote	3,76	4,05	1,05	1,03	0,16
C/N	0,117	0,100	0,050	0,040	0,010
pH-eau	32	40	21	26	14
pH-KCl N	4,3	4,0	4,6	4,6	5,0
pH-KCl N	3,0	2,7	3,0	3,8	4,7
<i>Complexe absorbant</i> (méq/100 g t. fine séché. air)					
K ⁺		0,09	0,03	0,01	
Na ⁺		0,16	0,05	0,03	
Ca ⁺⁺		0,24	0,00	0,00	
Mg ⁺⁺		0,34	0,06	0,02	
Al ⁺⁺⁺		1,00	0,27	1,78	
S		1,83	0,27	1,84	
T		12,00	5,50	10,00	
S/T × 100		15	7	18	
<i>Aluminium et fer</i> (p. 1 000 t. fine séché. air)					
Al ⁺⁺⁺ échangeable	0,096	0,087	0,024	0,159	0,020
Al ₂ O ₃ S.A. (1)	1,430	1,200	0,530	10,030	3,840
Fe ₂ O ₃ S.A. (1)	0,400	0,340	0,280	1,890	2,330

(1) Al₂O₃ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts,
Fe₂O₃ S.A. = fer soluble dans les acides forts.

Relief : plaine.

Usage actuel : pineraie (jeunes pins de 12 à 15 ans).

Végétation : *Pteridium aquilinum* (3) — *Calluna vulgaris* (3) — *Erica cinerea* (2)
— quelques *Erica scoparia* et *Ulex nanus*.

Description :

A₀ (0-13 cm) : Litière. Couleur : 10 YR — 6/1. Gris.

A₁ (13-30 cm) : Légèrement compact. Couleur : 10 YR — 6/1 ; gris.

A₂ (30-56 cm) : Très friable. Couleur : 10 YR — 7/1 ; gris pâle.

B₁ (56-75 cm) : Très compact (alios). Couleur : 7,5 YR — 4/4 ; brun foncé.

B₂ (75-150 cm) : Compact, devenant de plus en plus friable en profondeur.
Couleur : 7,5 YR - 6/6 ; jaune rougeâtre.

Analyse : (tabl. 6).

Commentaire :

- Taux de matière organique décroissant quand la profondeur augmente ;
- C/N de l'ordre de 40 dans le A₁, décroît régulièrement en profondeur ;
- Capacité totale d'échange : 12 méq./100 g dans le A₁ ;
- pH-eau et pH-KCl N respectivement de l'ordre de 4 et 3 en surface ;
- Accumulation d'aluminium échangeable dans le B₁ ;
- Accumulation d'aluminium et de fer solubles dans les acides forts dans les horizons B₁ et B₂ (indices d'entraînement apparents : Al₂O₃ = 19,1 ; Fe₂O₃ = 6,8).

C. — PROFIL DÉVELOPPÉ SUR VIEILLE DUNE LITTORALE,
SOL SQUELETTIQUE (S₁)

Emplacement : La Teste (Gironde) ;

Roche-mère : sable des Landes ;

Relief : flanc continental de la dune ;

Usage actuel : pineraie (20-25 ans) ;

Végétation : chênaie dégradée — *Pteridium aquilinum* (3) — *Ulex nanus* (1) —
Sarothamnus scoparius (3) — abondant tapis de Mousses.

Description :

A₀ (6-2 cm) : Litière très peu épaisse. Couleur : 5 Y — 6/5.

A₂ (2-7 cm) : Horizon légèrement éclairci. Couleur : 2,5 Y — 6/2 ; gris brun pâle.

B (7-17 cm) : Couleur 10 YR — 6/2 ; gris brun pâle.

C (> 17 cm) : Roche-mère, sable de plage. Couleur : 10 YR — 6/3 ; brun pâle.

Analyse : (tabl. 7).

TABLEAU 7 .
Caractères analytiques du profil S₁
(sol squelettique de dune)

Horizon	A ₀	A ₂	B	C
Profondeur (cm)	0-2	2-7	7-17	> 17
<i>Matière organique</i> (p. 100 terre fine séchée air)	4,5	0,8	0,3	0,1
Carbone	2,63	0,48	0,15	0,05
Azote	0,14	0,03	0,02	0,01
C/N	18	16	7,5	5,0
pH-eau	4,8	5,6	5,7	5,8
pH-KCl N	3,7	4,2	4,4	4,5
<i>Aluminium et fer</i> (p. 1 000 terre fine séchée air)				
Al ⁺⁺⁺ échangeable	0,008	0,007	0,005	0,004
Al ₂ O ₃ S.A. (1)	2,830	2,710	3,190	3,310
Fe ₂ O ₃ S.A. (2)	6,550	5,520	7,270	5,610

(1) Al₂O₃ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts.
(2) Fe₂O₃ S.A. = fer soluble dans les acides forts.

Commentaire :

- Taux très faibles de matière organique, décroissant rapidement en profondeur ;
- C/N de l'ordre de 16 à 18 en surface, décroissant également très vite avec la profondeur ;
- pH-eau et pH-KCl N respectivement de l'ordre de 4,8 et 3,7 en surface ;
- Teneurs très faibles en aluminium échangeable sur l'ensemble du profil ;
- Léger appauvrissement de l'horizon (2-7 cm) en fer et aluminium solubles dans les acides forts (Indices d'entraînement apparents : Al₂O₃ = 1,2 ; Fe₂O₃ = 1,3).

3. Caractères essentiels des sols sableux des Landes de Gascogne

La description et l'analyse de ces quelques profils-types permettent de dégager les traits principaux caractérisant les sols sableux des Landes.

A. — TEXTURE

Elle est évidemment essentiellement sableuse, 70 à 80 p. 100 des sables se classant dans la fraction granulométrique 100-200 μ . Les éléments inférieurs à 2 μ ne représentent qu'un infime pourcentage, de l'ordre de grandeur de l'erreur que l'on peut commettre au cours de l'analyse granulométrique.

B. — MATIÈRE ORGANIQUE

Les taux rencontrés en lande humide et en lande sèche sont supérieurs à ceux des sols squelettiques ; ce fait résulte sans doute de la dilution de la matière organique des sols de dunes, dilution provoquée soit par des apports sableux éoliens, soit par le balayage des litières sous l'action du vent.

C. — RAPPORTS C/N

Le rapport C/N est toujours beaucoup plus élevé en lande sèche qu'en lande humide ; ce fait a déjà été signalé par JACQUIN, JUSTE et DUREAU (1965), qui ont montré également que les C/N des acides humiques formés en lande humide étaient très nettement inférieurs à ceux des acides humiques formés en lande sèche. Ce phénomène est sans doute la conséquence, soit de la nature de la végétation qui domine dans chaque type de lande, soit des conditions opposées d'hydromorphie qui orientent différemment la synthèse des composés humiques. Quoi qu'il en soit, il s'agit là d'un fait d'observation important, la valeur de ce rapport C/N jouant un rôle primordial dans le mode d'évolution de la matière organique des sols.

D. — ALUMINIUM ÉCHANGEABLE

Les taux de Al^{+++} échangeable sont voisins de zéro dans les sols de dunes, ce qui confirme bien le très faible degré d'évolution de ces formations.

Ils sont plus faibles en lande sèche qu'en lande humide ; en lande sèche, le taux de Al^{+++} échangeable est important dans les horizons d'accumulation, notamment dans le B (alios) ; en lande humide, la teneur en Al^{+++} échangeable diminue régulièrement quand la profondeur augmente : les fortes concentrations en cet élément rencontrées dans les horizons de surface des profils développés en lande humide sont susceptibles de poser des problèmes lors de la mise en valeur agronomique de ces secteurs.

E. — ALUMINIUM ET FER SOLUBLES DANS LES ACIDES FORTS

Il y a toujours beaucoup plus de fer que d'aluminium soluble dans les acides forts dans les sols squelettiques de dunes. On observe l'inverse dans le cas des profils développés sur le plateau landais, aussi bien en lande humide qu'en lande sèche.

En lande humide, les taux de fer sont importants dans le A_0 et le A_1 et décroissent rapidement quand la profondeur augmente ; la distribution de Al_2O_3 est parallèle à celle de Fe_2O_3 ; cependant, les taux d'aluminium décroissent moins vite en profondeur que ceux du fer.

En lande sèche, on note une accumulation notable de Fe_2O_3 et d' Al_2O_3 dans les horizons B_1 (alios) et B_2 , cette accumulation étant plus marquée pour l'aluminium que pour le fer, ce qui a pour corollaire l'existence d'indices d'entraînement plus importants pour l'aluminium que pour le fer.

F. — CAPACITÉ D'ÉCHANGE, DEGRÉ DE SATURATION EN BASES,
pH-EAU ET pH-KCl N

Pour des taux de carbone sensiblement identiques, l'horizon A_1 du profil P_1 possède une capacité d'échanges de l'ordre de 17 méq./100 g, alors que celle de l'horizon A_1 du profil P_2 développé en lande sèche n'est que de 12 méq./100 g. Cette différence peut s'expliquer par le plus grand degré d'humification de la matière organique du profil développé en lande humide ; de même, le taux de saturation en bases de P_1 est de 19 p. 100 alors qu'il n'est que de 15 p. 100 pour P_2 : selon DUCHAUFOUR (1957), c'est essentiellement le rapport C/N qui détermine, pour un type de sol donné, la vitesse de minéralisation de la matière organique et, partant, le degré de saturation en bases (bases provenant précisément de cette minéralisation) de la fraction humique de ce sol. En règle générale, les sols à rapport C/N de l'ordre de grandeur de ceux d'un moder ont une matière organique qui minéralise plus vite que celle des sols à C/N élevé (du type mor), pour lesquels l'accumulation de débris végétaux se décomposant difficilement entraîne l'existence d'une acidité d'origine essentiellement organique, non compensée par des bases. ROUSSEAU (1959) a particulièrement insisté sur l'importance de ce rapport C/N — et du degré de saturation en bases qui en résulte — sur la manifestation de la toxicité du manganèse vis-à-vis des jeunes sapins des Vosges. Des observations comparables peuvent être faites

pour P_1 (C/N du $A_1 = 19$; S/T du $A_1 = 19$ p. 100)
et P_2 (C/N du $A_1 = 40$; S/T du $A_1 = 15$ p. 100).

Ces différences dans les taux de saturation en bases se reflètent d'ailleurs dans le pH-eau et le pH-KCl N qui sont, en règle générale, toujours plus élevés en lande humide qu'en lande sèche. A ce sujet, il faut cependant attirer l'attention sur le fait qu'en lande humide, la saturation d'une bonne partie du complexe d'échange par de l'aluminium échangeable contribue à atténuer les écarts séparant le pH-eau du pH-KCl N. Pour préciser ce point, on a fait passer, dans une colonne contenant l'échantillon de terre correspondant à l'horizon A_1 du profil de lande sèche P_2 , des volumes crois-

TABLEAU 8

*Influence du degré de saturation en aluminium de l'horizon A_1
d'un profil développé en lande sèche sur la différence
séparant le pH-eau du pH-KCl N*

Volume de la solution d'aluminium qui a traversé la colonne de terre (en ml)	pH-eau	pH-KCl N	Différence
0	4,8	2,7	2,1
5	4,8	3,0	1,8
10	4,8	3,3	1,5
25	4,8	3,3	1,5
50	4,8	3,4	1,4

sants d'une solution aqueuse de chlorure d'aluminium contenant 10 mg/ml de métal. La terre a ensuite été lavée à l'eau distillée jusqu'à élimination complète du chlore et l'on a déterminé le pH-eau et le pH-KCl N de l'échantillon de sol ainsi traité, le témoin étant constitué par de la terre simplement lavée à l'eau distillée.

Les résultats, qui figurent dans le tableau 8, indiquent qu'il y a bien décroissance régulière des écarts séparant les pH-eau des pH-KCl N quand on augmente le volume de la solution aqueuse d'aluminium traversant la colonne de terre : cette décroissance résulte d'une remontée progressive du pH-KCl N de l'échantillon de sol.

La substitution de l'aluminium aux protons saturant les sites d'échange entraîne donc une modification du pH-KCl N, ce qui veut dire que le déplacement des ions Al^{+++} et leur hydrolyse ultérieure conduisent à une acidification moins marquée de la suspension de sol que celle qui se produit lorsque seulement des protons sont déplacés. Toutefois, il faut signaler que McLEAN *et al.* (1965) donnent une autre interprétation de ce phénomène, interprétation basée sur le fait que la présence des ions Al^{+++} modifie les constantes de dissociation des groupements carboxyliques et phénoliques de la matière organique du sol.

4. Conclusion

Abstraction faite des sols squelettiques de dunes dont l'aire d'extension est assez limitée, il ressort de ce qui précède que les caractères essentiels des sols landais sont sous la dépendance étroite des conditions de drainage du milieu.

Cependant — et quelles que soient ces conditions de drainage — l'acidité, souvent très accentuée, constitue un caractère commun à la plupart des formations ; elle a pour corollaire la présence d'aluminium échangeable, la distribution de ce dernier le long du profil étant elle aussi sous la dépendance des conditions de drainage. Cette acidité demeure cependant d'origine essentiellement organique, comme en témoignent les pH-KCl N extrêmement faibles (souvent inférieurs à 3) que l'on rencontre fréquemment dans certains horizons de surface totalement désaturés.

CHAPITRE III

LES SOLS DE « TOUYAS » DES BASSES-PYRÉNÉES

L'expression « sol de touyas » est une expression vernaculaire des Basses-Pyrénées, qui s'applique à des zones non cultivées, recouvertes en majeure partie de fougères et d'ajoncs. Ces sols sont encore pour la plupart utilisés, soit comme terrains de parcours pour les troupeaux de moutons, soit comme réserve naturelle de litière.

Cette région, qui représente une grande partie du piémont pyrénéen, est limitée à l'Ouest par l'Atlantique et à l'Est par la région de Tarbes ; elle remonte au sud jusqu'à l'altitude de 500 mètres environ et descend vers le nord jusqu'à la Chalosse.

1. Facteurs de formation

A. — ROCHE-MÈRE

a) *Sols du flysch*

Les sols de « touyas » dérivent en majorité du flysch crétacé ; les sédiments qui constituent ce dernier se seraient déposés au Crétacé supérieur (Cénomaniens) dans le fossé sous-pyrénéen qui reliait à cette époque l'Atlantique à la Méditerranée.

Ces sédiments, de nature gréseuse, marneuse et très rarement calcaire, ont été soulevés et plissés au cours de l'Éocène inférieur, en donnant toute une série de schistes qui offrent les pendages les plus divers avec des variations très rapides.

La caractéristique essentielle de ces formations est leur très faible résistance aux facteurs de l'altération : « le flysch en affleurement se décompose très facilement et la pourriture y pénètre rapidement en profondeur » (ENJALBERT, 1960). La texture, aussi bien que la nature des matériaux qui la constituent, contribuent à expliquer la labilité de cette roche-mère.

D'après DELMAS et DUTIL (1964), la texture moyenne de l'horizon situé au niveau de la frange d'altération appartient à la sous-classe « limono-argileuse ». La granulométrie moyenne d'une quarantaine d'échantillons fournit en effet les résultats suivants : argile 37 p.100, limons 46 p.100, sables 17 p.100.

La nature des argiles entrant dans la constitution des matériaux originels a été précisée par quelques analyses aux rayons X effectuées au Laboratoire de Géologie et Paléontologie de Strasbourg : ces analyses indiquent que la teneur en illite diminue lorsque l'on passe de la frange d'altération de la roche-mère aux horizons de surface

tandis que, parallèlement, les teneurs en interstratifiés illite-vermiculite et en vermiculite augmentent. Il est vraisemblable que, dans le cas du flysch, l'altération des minéraux argileux est représentée par un passage progressif des feuillets du type mica à ceux de la vermiculite, la formation en quantités abondantes des interstratifiés illite-vermiculite correspondant à la phase intermédiaire de cette évolution.

b) *Sols des terrasses supérieures et moyennes du Quaternaire*

Ces sols se sont développés sur les alluvions anciennes déposées par les gaves. Les surfaces qu'ils occupent sont moins importantes que celles des sols du flysch ; cependant — et contrairement à ces derniers qui occupent les croupes et les versants — leur situation sub-horizontale les rend plus facilement exploitables, ce qui fait que leur reconversion en sols agricoles est généralement assez avancée.

La texture de la roche-mère est beaucoup moins fine que celle caractérisant le flysch (argile : 20-25 p.100 ; limons : 40-45 p.100 ; sables : 30 à 40 p.100) et l'analyse aux rayons X ne fait apparaître aucune différence entre les différents horizons : on note la présence simultanée d'illite, de vermiculite et d'interstratifiés non gonflants ainsi que de quelques traces de kaolinite ; les raies du quartz apparaissent à tous les niveaux. L'origine alluviale et le degré d'altération très variable de la roche-mère ne permettent donc pas d'établir une filiation précise des minéraux argileux entrant dans la constitution de ces sols.

B. — CLIMAT

a) *Pluviosité*

Les hauteurs des précipitations annuelles sont extrêmement élevées dans toute la zone des sols de touyas (tabl. 9). Elles varient de 1 150 mm à 1 800 mm dans la plaine et atteignent des valeurs plus importantes dès que l'altitude augmente.

Les pluies sont à peu près bien réparties tout au long de l'année, avec cependant des maximums plus accusés au printemps et surtout en automne.

TABLEAU 9

*Normales des précipitations (en mm)
Basses-Pyrénées — Période 1921-1950
(Météorologie Nationale, 1959)*

Station	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. annuel.
Biarritz-Aérodrome	120	110	85	100	100	80	100	120	125	150	160	160	1 410
Laruns	143	129	131	154	135	107	64	90	102	147	150	164	1 516
Pau-Pont-Long	108	92	90	107	114	80	56	72	83	105	107	131	1 145
Navarrenx	110	85	90	105	115	85	60	70	90	115	120	140	1 185
Banca	205	188	159	180	144	111	75	91	124	172	197	256	1 900

A cette abondance exceptionnelle des précipitations, abondance qui résulte de la présence de la chaîne pyrénéenne, s'ajoute une nébulosité quasi permanente qui renforce le caractère extrêmement humide de ce climat.

b) *Température* (tabl. 10)

La température moyenne annuelle est voisine de 13,5°C, les moyennes mensuelles oscillant de 7,5 à 19°C. Les faibles amplitudes thermiques traduisent évidemment l'influence très marquée de l'océan.

TABLEAU 10

Moyennes annuelles des températures normales, minima et maxima
Basses-Pyrénées — Période 1921-1950

Station	Température normale (°C)	Température minimum (°C)	Température maximum (°C)
Pau	12,5	7,2	17,9
Biarritz	13,7	9,9	17,6

c) *Diagrammes ombrothermiques* (fig. 5)

Les courbes $P = 3 T$ n'ont pas de point commun avec les courbes pluviométriques pour aucune des stations de la région ; il n'est donc pas possible de mettre

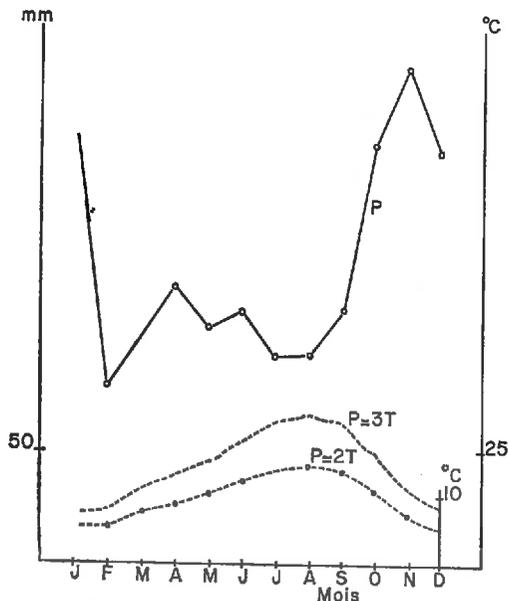


FIG. 5. — Diagramme ombrothermique de la station de Lahonce (1956-1962)

$P = 3 T$: subsécheresse $P = 2 T$: sécheresse

en évidence la moindre période de sub-sécheresse, ce qui confirme bien que l'on a affaire à un climat tempéré maritime caractéristique.

C. — RELIEF

En raison de la très grande friabilité de la roche-mère et de l'abondance des pluies, les pays du flysch possèdent un relief en lignes arrondies, où les vallées sont nombreuses et bien dessinées. Il en résulte que dans cette zone le drainage est partout excellent.

Par contre, les terrasses quaternaires anciennes qui sont en position sub-horizontale sont assez mal drainées et des phénomènes d'hydromorphie s'y manifestent souvent.

D. — VÉGÉTATION

Les landes à touyas sont recouvertes d'une végétation acidophile où dominent la Fougère (*Pteridium aquilinum*), les ajoncs d'Europe (*Ulex europæus*), les Éricacées et quelques Graminées. Bien souvent la Fougère subsiste seule, en particulier sur les pentes où elle est régulièrement fauchée et amassée en tas (« thuyes »), pour être utilisée une fois sèche à la confection des litières.

Il est bien évident que cette végétation de lande rase qui caractérise les touyas n'a plus rien à voir avec la végétation climacique ; celle-ci était vraisemblablement une forêt de chênes dont quelques vestiges subsistent encore (beaucoup de landes actuelles sont encore appelées « bois » par les habitants du pays).

La régression du climax a été, dans ces zones, particulièrement accélérée par la multiplication de certaines pratiques pastorales comme le brûlis systématique des terrains de parcours ; c'est à de telles pratiques que l'on doit sans doute la prédominance d'espèces se régénérant par voie souterraine comme les fougères. De même, le fauchage régulier de la végétation pour la confection des litières modifie, non seulement la flore mais aussi le mode d'évolution des sols qui supportent cette végétation ; il y a notamment appauvrissement progressif en bases et cette exportation non compensée accélère les processus d'acidification de ces sols, qui sont déjà originellement pauvres en alcalins et alcalino-terreux. La pratique du fauchage systématique de la litière devrait donc conduire tôt ou tard à une stérilisation complète du substrat ; en fait, la végétation des touyas peut subsister parce que la topographie accidentée du pays favorise le rajeunissement fréquent des profils et permet de ce fait à de nouvelles couches de roche-mère de prendre le relais dans la fourniture des éléments nutritifs (DUCHAUFOR, 1957).

2. Description de quelques profils caractéristiques des sols de touyas des Basses-Pyrénées

DELMAS et DUTIL (1964) ont insisté sur la grande homogénéité des sols de touyas ; les caractères analytiques varient très peu d'une station à l'autre. Aussi nous sommes-nous contenté de décrire en détail deux profils, l'un formé sur le flysch crétacé (T₁) et l'autre sur les alluvions anciennes d'un gave (T₂).

A. — PROFIL DÉVELOPPÉ SUR LE FLYSCH CRÉTACÉ (T₁)

Emplacement : Ustaritz (Basses-Pyrénées) ;

Roche-mère : flysch crétacé ;

Relief : très légère pente nord-ouest ;

Usage actuel : lande à touyas ;

Végétation : *Pteridium aquilinum* (4) ; *Erica cinerea* (2) ; *Ulex europæus* (2) ; Mousses

Description :

A₁₁ (0-25 cm) : Structure grumeleuse, friable. Couleur (Munsell) : 10 YR — 5/3 ; brun.

A₁₂ (25-60cm) : Structure massive. Couleur : 10 YR — 5/4 ; brun jaunâtre.

C (60-75cm) : Structure schisteuse. Couleur : 10 YR — 5/4 ; brun jaunâtre.

R (75-90) : Structure massive, assez humide ; quelques taches bleuâtres.

Couleur : 10 YR — 5/4 ; brun jaunâtre.

Analyse (tabl. II).

TABLEAU II

Profil développé sur le flysch crétacé
(sol de touya T₁)

Horizon	A ₁₁ 0-25	A ₁₂ 25-60	C 60-75	R 75-90
Profondeur (cm)				
<i>Granulométrie</i> (p. 100 terre fine séchée à l'air)				
Argile, < 2 μ	33,7	36,5	25,7	31,5
Limon fin, 2-20 μ	35,8	33,5	34,5	31,5
Limon grossier, 20-50 μ	12,0	11,0	14,0	1,0
Sable fin, 50-200 μ	7,5	7,0	11,0	9,5
Sable grossier, 200-2 000 μ	4,0	4,0	6,0	11,0
<i>Matière organique</i> (p. 100 terre fine séchée air)				
Carbone	4,7	2,4	1,2	1,2
Azote	2,75	1,40	0,71	0,71
C/N	0,24	0,22	0,15	0,13
pH-eau	12	6	5	5
pH-KCl N	5,1	5,1	5,0	5,1
pH-KCl N	3,9	3,9	3,9	3,9
<i>Complexe absorbant</i> (még./100 g t. fine séché. air)				
K ⁺	0,500	0,180	0,140	0,130
Na ⁺	0,340	0,230	0,310	0,340
Ca ⁺⁺	1,175	0,710	0,710	0,170
Mg ⁺⁺	0,500	0,370	0,420	0,460
Al ⁺⁺⁺	4,180	8,560	13,070	10,460
S	6,70			
T	17,0			
S/T × 100	39,4			
<i>Aluminium et jcr</i> (p. 1 000 terre fine séchée air)				
Al ⁺⁺⁺ échangeable	0,376	0,599	0,915	0,732
Al ₂ O ₃ S.A. (1)	61,960	67,680	99,100	58,960
Fe ₂ O ₃ S.A. (1)	51,470	53,260	53,410	83,510

(1) Al₂O₃ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts.

Fe₂O₃ S.A. = fer soluble dans les acides forts.

Commentaire :

- Taux important de matière organique décroissant régulièrement en profondeur ;
- C/N voisin de 12 en surface mais décroissant extrêmement vite en profondeur (C/N = 5,5 à 75-90 cm) ;
- Capacité totale d'échange de 17 méq./100 g en surface ;
- pH-eau (5,1) et pH-KCl N (3,9) ne variant pratiquement pas avec la profondeur ;
- Accumulation notable d'aluminium échangeable dans l'horizon 60-75 cm ;
- Taux d'aluminium et de fer solubles dans les acides forts très fluctuants selon la profondeur. Le rapport Al_2O_3 S.A./ Fe_2O_3 S.A. décroît cependant très vite quand la profondeur augmente.

B. — PROFIL DÉVELOPPÉ SUR LES TERRASSES DU QUATERNAIRE ANCIEN (T₂)

Emplacement : Ogeu (Basses-Pyrénées) ;

Roche-mère : alluvions anciennes ;

Relief : plaine alluviale (gave d'Ossau) ;

Usage actuel : lande à touyas ;

Végétation : *Pteridium aquilinum* (4) ; *Ulex europaeus* (2) ; quelques chênes isolés.

Description :

A₀ (0-2 cm) : Litière très peu individualisée ;

A₁₁ (2-20 cm) : Texture limono-argileuse ; horizon très humifère. Couleur : 10 YR — 4/2 ; brun gris foncé ;

A₁₂ (20-40 cm) : Texture limono-argileuse ; horizon humifère. Couleur : 10 YR — 5/2 ; brun gris foncé ;

A₁₃ (40-80 cm) : Texture limono-argileuse ; horizon un peu moins humifère ; Couleur : 10 YR — 5/2 ; brun gris foncé.

C (80-120cm) : Texture argileuse ; horizon très peu humifère ; Couleur : 5YR — 6/4 jaune olive.

Analyse : (tabl. 12).

Commentaire :

- Taux très important de matière organique dans les horizons de surface, décroissant régulièrement en profondeur ;
- C/N de l'ordre de 18 en surface, décroissant assez vite dans les horizons profonds ;
- Capacité totale d'échange très élevée en surface (33 méq./100 g) ;
- pH-eau (4,7) et pH-KCl N (4,0) ne variant pratiquement pas avec la profondeur ;
- Accumulation importante d'aluminium échangeable dans les horizons de surface, décroissance régulière de cet élément dans les horizons profonds ;
- Les taux d'aluminium et de fer solubles dans les acides forts ont tendance à

diminuer en profondeur ; le rapport de ces deux éléments demeure à peu près constant sur l'ensemble du profil.

TABLEAU 12
Profil développé sur les terrasses du Quaternaire ancien
 (sol de touya T₂)

Horizon	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	C
Profondeur (cm)	2-20	20-40	40-80	80-120
<i>Granulométrie (p. 100 terre fine séchée à l'air)</i>				
Argile, < 2 μ	22,5	24,3	26,5	29,5
Limon fin, 2-20 μ	26,0	28,0	29,5	32,3
Limon grossier, 20-50 μ	19,0	21,0	22,5	23,5
Sable fin, 50-200 μ	10,0	11,0	11,5	12,0
Sable grossier, 200-2000 μ	1,0	1,0	1,0	0,5
<i>Matière organique (p. 100 terre fine séchée air)</i>				
Carbone	14,8	8,3	5,5	1,1
Azote	8,47	4,87	3,26	0,62
C/N	0,456	0,280	0,200	0,058
pH-eau	19	17	16	11
pH-KCl N	4,7	4,7	4,8	4,9
pH-KCl N	3,8	4,0	4,2	4,1
<i>Complexe absorbant (még./100 g t. fine séché air)</i>				
K ⁺	0,270	0,120		0,030
Na ⁺	0,270	0,170		0,060
Ca ⁺⁺	0,470	0,000		0,000
Mg ⁺⁺	0,080	0,040		0,020
Al ⁺⁺⁺	5,300	4,150		2,730
S	6,39	4,48		2,84
T	33,5	27,0		13,0
S/T × 100	19	17		22
<i>Aluminium et fer (p. 1 000 terre fine séchée air)</i>				
Al ⁺⁺⁺ échangeable	0,477	0,374	0,259	0,246
Al ₂ O ₃ S.A. (1)	52,940	58,960	58,960	63,320
Fe ₂ O ₃ S.A. (1)	36,040	39,050	41,430	46,860

(1) Al₂O₃ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts.
 Fe₂O₃ S.A. = fer soluble dans les acides forts.

3. Caractères essentiels des sols de touyas

La description et l'analyse de ces profils types permettent de dégager les traits principaux caractérisant les sols de touyas.

A. — TEXTURE

La texture des formations développées sur le flysch crétaé est plus fine que celle des profils formés sur les alluvions anciennes ; pour ces derniers le taux d'argile s'abaisse à 25 p. 100 et celui des limons grossiers s'élève à 20 p. 100.

B. — MATIÈRE ORGANIQUE

Le taux de matière organique des profils développés sur alluvions anciennes est généralement plus élevé que celui caractérisant les sols du flysch.

C. — ALUMINIUM ÉCHANGEABLE

La distribution de Al^{+++} échangeable est très différente dans les sols formés sur alluvions anciennes et dans les sols formés sur le flysch : dans les premiers, la teneur en Al^{+++} décroît régulièrement en profondeur, alors que dans les seconds elle passe par un maximum dans l'horizon C, pour rediminuer ensuite. T_2 est donc, à ce point de vue-là, comparable à un profil de lande humide des sols sableux des Landes et T_1 à un profil de lande sèche. Cependant, il convient de préciser que généralement, dans le cas des profils formés en lande sèche, l'accumulation de Al^{+++} échangeable dans les horizons illuviaux est parallèle à celle de la matière organique, ce qui n'est absolument pas le cas de T_1 .

D. — ALUMINIUM ET FER SOLUBLES DANS LES ACIDES FORTS

Il paraît difficile de dégager les traits principaux concernant la distribution de ces deux éléments le long du profil ; on peut cependant remarquer que les taux de fer ont tendance à augmenter en profondeur. Le rapport Al_2O_3 S.A./ Fe_2O_3 S.A. diminue très sensiblement dans les horizons profonds du profil développé sur flysch, alors qu'il demeure assez constant dans le profil formé sur alluvions anciennes.

E. — CAPACITÉ D'ÉCHANGE, DEGRÉ DE SATURATION EN BASES,
pH-EAU ET pH-KCl N

La valeur importante de la capacité d'échange de l'horizon A_{11} du profil formé sur alluvions anciennes (33,5 méq./100 g) est à relier à la teneur très élevée en matière organique de cet horizon (14,8 p. 100). Le degré de saturation en bases de ce même horizon est cependant peu élevé (19 p. 100), alors que celui de l'horizon homologue développé sur flysch est beaucoup plus important (40 p. 100). Là encore, on peut observer que ces différences sont en liaison avec des rapports C/N très différents dans les deux cas : C/N de l'ordre de 12 pour T_1 , avec un taux de saturation en bases de 40 p. 100 et C/N de l'ordre de 19 pour T_2 , avec un taux de saturation en bases de 17 p. 100. Ces observations confirment donc bien l'hypothèse de DUCHAUFOR (1957), attribuant au rapport C/N un rôle essentiel dans la vitesse de minéralisation et, partant, dans le degré de saturation en bases de la matière organique d'un sol.

La constance remarquable des pH-eau et pH-KCl N de l'ensemble du profil, aussi bien pour le profil formé sur alluvions anciennes que pour celui développé sur flysch, résulte de la présence de quantités très importantes d'aluminium échangeable ; le mécanisme à invoquer est identique à celui qui permet d'expliquer la constance

des pH des profils formés dans les zones humides des Landes de Gascogne, à savoir : le pouvoir tampon élevé des solutions aqueuses suffisamment enrichies en aluminium, qui masque l'acidité due aux protons échangeables.

F. — RAPPORTS C/N

Alors que les rapports C/N des profils formés sur alluvions anciennes sont de l'ordre de grandeur de ceux des moders, ceux caractérisant les profils développés sur flysch sont, par contre, toujours très faibles : ils dépassent rarement 10 à 12 en surface et 6 à 7 dans les horizons profonds. On peut donc classer ces sols dans la catégorie des mulls acides (DUCHAUFOR, 1957).

La valeur très faible du rapport C/N dans les sols du flysch est assez surprenante : il est en effet difficile de mettre en cause la nature de la végétation, celle-ci étant en tous points comparable à celle qui recouvre les zones bien drainées des Landes de Gascogne, zones dans lesquelles les sols ont précisément des rapports C/N extrêmement élevés.

L'importance des quantités d'azote accumulées dans ces sols résulte en partie de la fixation irréversible de l'ion ammonium par les colloïdes argileux ; ceux-ci contiennent en effet un pourcentage important d'illite, laquelle, d'après CHAMINADE (1962) et STEVENSON et DHARIWAL (1959), intervient fortement dans la rétrogradation de NH_4^+ .

TABLEAU 13

Influence du traitement thermique d'un échantillon de sol de touya sur le taux d'azote minéral extractible

Température en °C	en mg/kg de terre	
	N (NH_4)	N (NO_3)
Témoin non chauffé	11	17
100	21	9
150	73	
200	117	0
300	115	0
500	0	0

Pour préciser ce point, des échantillons d'un sol de touyas formé sur flysch créacé (azote total = 3 p. 1000 ; carbone total = 31 p. 1000 ; C/N = 10) ont été chauffés une heure au four électrique à différentes températures (100, 150, 200, 300, 500°C). On a ensuite extrait et dosé l'azote minéral contenu dans ces échantillons. Les résultats, qui figurent dans le tableau 13, indiquent que pour les températures de chauffage de 200 et 300°C le taux d'azote ammoniacal extractible est multiplié par dix. D'après CHAMINADE (1962), la désorption de NH_4^+ rétrogradé se produit à des températures de cet ordre de grandeur dans le cas de l'illite : les résultats obtenus pour les sols du flysch tendraient donc bien à prouver que c'est la fraction illitique de l'argile de ces sols qui est responsable de la rétrogradation de l'ammonium.

Il est bien évident que, dans l'expérience décrite ici, une partie importante de l'ammonium désorbé au cours du chauffage est volatilisée sous forme de NH_3 ; on peut donc penser que la quantité réelle d'ammonium rétrogradé est plus importante que celle retrouvée dans le réactif d'extraction. Par conséquent, la valeur anormalement faible du rapport C/N de ces sols est due en partie à une immobilisation de l'ammonium par la fraction colloïdale minérale du sol, ce blocage freinant fortement la nitrification et, par suite, augmentant le taux d'azote total (BAERT-DEBIEVRE, VAN DEN HENDE et LOX, 1961 ; SMIRNOV et FRUKTOVO, 1963).

Il convient cependant de souligner que la pratique du fauchage systématique des litières, pratique qui s'oppose à l'enrichissement de l'horizon superficiel en débris végétaux, peut aussi contribuer à expliquer le faible rapport C/N des horizons de surface de ces sols (DUCHAUFOR, 1957).

En dehors des conséquences pédogénétiques qui résultent de l'existence d'un rapport C/N voisin de 10, il est possible que la présence d'ammonium rétrogradé puisse fournir une explication à l'effet indiscutablement bénéfique qu'exerce le brûlis sur la flore spontanée de ces secteurs, la température du sol avoisinant facilement 200°C dans ces cas-là.

4. Conclusion

Comme pour les Landes de Gascogne, l'acidité constitue le caractère essentiel des sols de tuyas ; dans ce cas-là aussi, cette acidité a pour corollaire la présence d'aluminium échangeable à des taux cependant beaucoup plus élevés que pour les sols sableux des Landes, et cela en raison de la présence d'un pourcentage important d'argile constituant précisément la source de cet aluminium échangeable.

C'est également le pourcentage élevé de l'argile dans les sols du flysch qui est responsable de l'existence de rapports C/N très faibles, entraînant un mode d'évolution de ces sols totalement différent de celui des sols landais.

CHAPITRE IV

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Il est certain que la pauvreté en bases des roches-mères à partir desquelles se sont développés les sols de touyas et les sols sableux des Landes est à l'origine de l'acidité très prononcée de ces sols, pour lesquels les facteurs physiques, chimiques et biologiques de l'altération ont en outre souvent joué à plein (pluviosité, température, couvert végétal) ; la présence de taux élevés d'aluminium échangeable constitue un témoignage de cette altération. Ces taux de Al^{+++} échangeable sont particulièrement importants dans les sols de touyas, où le stock de silicates altérables est évidemment beaucoup plus élevé que dans les sols sableux des Landes ; il en résulte que l'acidité des sols développés sur le flysch crétacé est une acidité d'origine essentiellement minérale, alors qu'à l'opposé celle des sols de la zone sèche des Landes de Gascogne est d'origine essentiellement organique. Les sols sableux de la zone humide des Landes, ainsi que les sols formés sur les terrasses moyennes et supérieures des gaves bas-pyrénéens, occupent une position intermédiaire, car ils sont à la fois assez bien pourvus en aluminium échangeable et riches en matière organique désaturée.

C'est donc en définitive l'importance relative de l'aluminium échangeable et de la matière organique qui détermine le pH des sols acides du Sud-Ouest atlantique ; cependant, en accord avec McLEAN et *al.* (1964), il convient de souligner que l'acidité aluminique prend très rapidement le pas sur l'acidité organique dès que les taux de Al^{+++} échangeable s'élèvent suffisamment.

DEUXIÈME PARTIE

**DYNAMIQUE DE L'ALUMINIUM
DANS LES SOLS ACIDES DU
SUD-OUEST ATLANTIQUE**

CHAPITRE I

DÉFINITION

La dynamique de l'aluminium peut se définir comme étant l'ensemble des processus à la suite desquels cet élément est extrait des édifices minéraux originels, généralement silicates phylliteux ou hydrates cristallisés, puis éventuellement exporté hors de la zone où cette extraction a eu lieu.

La première phase résulte de la décomposition ou altération des minéraux, altération qui se traduit en fait par une augmentation du degré de mobilité de Al^{+++} ; on appellera donc cette phase : mobilisation de l'aluminium.

Les agents qui sont responsables de cette mobilisation peuvent être : soit des agents strictement chimiques (gaz carbonique, oxygène, acides minéraux, acides organiques de la série aliphatique ou de la série aromatique), dont l'intervention correspond à ce que nous appellerons : mobilisation chimique de l'aluminium, soit des agents biologiques tels que les micro-organismes et les végétaux, dont l'action directe sur les minéraux originels entraîne l'altération de ces derniers ; cette forme de décomposition des minéraux correspond à ce que nous appellerons : mobilisation biologique de l'aluminium.

La mobilisation de l'aluminium n'est pas toujours suivie d'une mise en mouvement effective de cet élément ; quand cette mise en mouvement se produit, la répartition de Al^{+++} le long du profil est modifiée, aussi appellerons-nous cette deuxième phase : redistribution de l'aluminium.

Bien entendu, il n'entre pas dans le cadre de ce travail d'étudier en détail les mécanismes de la mobilisation et de la redistribution de l'aluminium dans les sols ; on essaiera simplement, dans le cas particulier de certains sols acides du Sud-Ouest atlantique, de préciser la nature et l'intensité des facteurs qui paraissent avoir une influence déterminante sur la dynamique de cet élément.

CHAPITRE II

MOBILISATION DE L'ALUMINIUM DANS LES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE

1. Mobilisation par voie chimique

La dégradation des minéraux originels sous l'influence des agents chimiques conduit, à la longue, à la rupture des liens associant entre eux les éléments constitutifs de ces minéraux, y compris l'aluminium qui occupe généralement, parmi ces éléments, la deuxième place après le silicium.

PEDRO (1964) a montré que cette extraction de Al^{+++} pouvait être obtenue même à partir des fragments de roche soumis simplement à l'action de l'eau. L'altération est beaucoup plus intense, donc plus facile à observer, quand on substitue des acides à l'eau ; un grand nombre de travaux, relatifs à l'étude de ce mode de destruction des silicates phylliteux et des conséquences qui en dérivent, ont été publiés : MUKHERJEE (1948), GASTUCHE (1953, 1957, 1960), HARWARD et COLEMAN (1954), TCHERNOV (1956), LAUDELOUT (1957, 1958), MASSART et LAUDELOUT (1959), COLEMAN (1961), CHAUSSIDON et VILAIN (1962), COOK et RICH (1963), ARVIEU et CHAUSSIDON (1964).

Parmi ces auteurs, beaucoup ont insisté sur la relative labilité des édifices silicatés en milieu acide, labilité telle qu'il est pratiquement impossible de préparer des argiles H^+ , celles-ci se transformant rapidement en argiles Al^{+++} .

Il convient de souligner que, dans la majorité des travaux réalisés et surtout pour des raisons de commodité d'emploi, ce sont des acides minéraux qui ont été mis en œuvre, le plus fréquemment utilisé étant l'acide chlorhydrique à différentes normalités.

L'étude de l'influence des acides organiques sur l'altération des minéraux silicatés et des roches a fait l'objet d'un nombre plus restreint de travaux ; GASTUCHE (1957) a comparé l'action de l'acide chlorhydrique et de l'acide oxalique sur l'extraction, à 80°C, de l'aluminium d'une kaolinite ; dès les premières heures de l'attaque et bien que le pH de la solution chlorhydrique soit inférieur à celui de la solution oxalique, cette dernière extrait plus d'aluminium. PEDRO (1964) a montré que l'attaque acétique des roches se traduisait par une libération et une exportation massives de l'aluminium. COOK et RICH (1963) ont insisté sur le rôle joué par l'anion citrate dans l'élimination des ions hydroxy-aluminium plus ou moins condensés saturant les sites d'échange de minéraux micacés en voie de décomposition.

L'agressivité particulière des acides organiques est à relier à l'action complexante de l'anion organique vis-à-vis des éléments métalliques des silicates, action qui vient s'ajouter à celle des protons ; il en résulte que l'influence des acides organiques est

variable selon la nature de l'acide considéré : elle dépend avant tout de la valeur de la constante de stabilité des complexes formés entre le radical organique et l'aluminium. Il paraît donc hasardeux de généraliser le mode d'action de ces substances, tout au moins en ce qui concerne leur aptitude à extraire préférentiellement l'aluminium des minéraux originels.

Dans le cas particulier des sols acides du Sud-Ouest atlantique, on peut penser que les associations végétales actuelles ou révolues ont été assez puissantes pour que, dans cette région, la « géochimie organique » telle que la définit PEDRO ait pu largement supplanter la « géochimie minérale » ; dans ces conditions, l'étude de l'influence des produits de l'activité biologique et, parmi ceux-ci, celle des acides organiques hydrosolubles sur la mobilisation de l'aluminium des sols de cette région, ne saurait être négligée.

A. — IDENTIFICATION DES ACIDES ORGANIQUES CONTENUS DANS UNE LITIÈRE FORESTIÈRE

a) *Rappel bibliographique*

Relativement peu de travaux ont été consacrés à l'identification et à la détermination quantitative des acides organiques de la série aliphatique contenus dans les litières.

KAURICHEV (1963) a montré que, dans certaines litières de sapinières, le maximum d'accumulation des acides organiques hydrosolubles avait lieu au printemps : on trouve alors jusqu'à 60 mg d'acide oxalique par litre d'extrait aqueux, lequel contient également, en beaucoup moindre quantité, de l'acide citrique et de l'acide formique ; d'après ce même auteur, la teneur en acides organiques diminue au cours des mois d'été en raison de l'accroissement de l'activité microbienne durant cette période. NYKVIST (1963) a trouvé que, parmi les acides organiques isolés de la fraction soluble à l'eau des litières, les acides malique et citrique étaient prépondérants, vraisemblablement à cause de leur plus grande résistance à la décomposition microbienne. Cet auteur a par ailleurs mis en évidence que la stérilisation préalable des litières ne modifiait pas les résultats obtenus ; on peut en conclure que ces acides ne proviennent pas nécessairement de néosynthèses microbiennes mais qu'ils préexistent déjà dans les débris végétaux tombés au sol. Cette interprétation est d'ailleurs implicitement admise par MUIR et *al* (1964) lorsque ces auteurs attribuent à l'acide citrique que renferment les aiguilles de Pin sylvestre un rôle prépondérant dans le maintien en solution du fer des sols.

Tout dernièrement enfin, JACQUIN et BRUCKERT (1965) ont isolé et dosé dans des percolats de litières de chênes et de litières de pins cinq acides organiques de la série aliphatique (avec prédominance de l'acide succinique et de l'acide citrique) et deux acides de la série aromatique (acide vanillique et acide para-hydroxybenzoïque) : d'après ces auteurs, les litières fraîches contiennent beaucoup moins d'acides-phénols que d'acides aliphatiques, ce qui peut laisser supposer que ce sont surtout ces derniers qui interviennent dans l'altération des minéraux du sol.

Il n'est évidemment pas possible, dans le cadre de ce travail, d'effectuer la détermination systématique de tous les acides organiques susceptibles d'être rencontrés dans les différents types de litières de la région correspondant aux sols acides du Sud-

Ouest atlantique ; nous nous sommes contenté, simplement pour fixer les idées, d'effectuer cette détermination dans le cas d'une litière assez fréquemment rencontrée dans les Landes de Gascogne : il s'agit d'une litière épaisse (7-10 cm), formée en majorité de débris de Mousses, de pseudophylles de Pin maritime et d'Ericacées (*Calluna vulgaris*, *Erica cinerea*) ; ce type de formation caractérise les secteurs bien drainés de la lande, où elle recouvre généralement un horizon cendreux, reposant lui-même sur un alios peu induré.

b) *Technique utilisée*

— La litière a été prélevée au mois de janvier ; après séchage à l'air, elle a été broyée puis tamisée à 2 mm.

— Cent grammes du produit ainsi préparé sont mis en suspension dans 200 ml d'eau distillée. Cette suspension est chauffée à ébullition durant 15 minutes dans un appareil à reflux puis filtrée sur Büchner.

— La titration du filtrat, après passage de ce dernier sur Permolite, donne l'acidité totale correspondant aux fonctions acides libres.

TABLEAU I4

Acides organiques hydrosolubles contenus dans une litière de lande sèche
(Constitution : débris de Mousses, de pseudophylles de Pin maritime, de *Calluna vulgaris* et d'*Erica cinerea*). Litière prélevée au mois de janvier

	még. en % de l'acidité organique	még. en % de l'acidité totale	még. en % de la litière séchée à l'air
<i>Acides non volatils</i>			
Shikimique	traces	traces	
Quinique	traces	traces	
Fumarique	0,42	0,06	traces
Succinique	4,97	0,76	
Malonique	1,88	0,29	0,022
Oxalique	16,44	2,51	0,008
Malique	6,00	0,92	0,073
Citrique	9,11	1,39	0,027
Tartrique	4,19	0,64	0,040
			0,018
<i>Acides volatils</i>			
Butyrique + propionique + acétique.....	25,49	3,89	
Formique + pyruvique.....	31,48	4,81	0,113
	99,98	15,27	0,140
			0,443
Acides totaux non salifiés			2,395
Acides totaux salifiés			0,520
Acidité totale			2,915
Acidité due aux acides organiques aliphatiques			0,445

— La galette solide qui est demeurée sur le Büchner est broyée dans de l'eau froide puis agitée pendant 3 heures en présence d'une résine Dowex 50. La suspension est à nouveau filtrée sur Büchner.

— La titration de ce nouveau filtrat, après passage sur Permolite, donne l'acidité correspondant aux fonctions acides salifiées.

— Les deux filtrats sont réunis ; les acides organiques qu'ils contiennent sont fixés par passage sur une résine Amberlite I.R.A.400, élués par $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$, concentrés sous vide puis séparés par une chromatographie classique sur colonne de silice.

c) Résultats obtenus (tabl. 14)

L'acidité organique due aux acides aliphatiques hydrosolubles ne représente que 15 p. 100 de l'acidité totale ; 85 p. 100 de cette acidité totale sont donc attribuables aux acides minéraux, aux acides-phénols et aux composés fulviques qui passent en solution dans l'extrait aqueux.

Parmi les acides non volatils identifiés, l'acide oxalique se détache nettement, suivi par le citrique, le malique et le succinique. Il y a donc assez bon accord, tout au moins en ce qui concerne l'acide majoritaire, avec les résultats obtenus par KAURICHEV.

Les acides formique, pyruvique, butyrique, propionique et acétique constituent, dans des proportions non définies, l'essentiel de la fraction correspondant aux acides volatils de l'extrait aqueux. L'importance de cette fraction est à souligner car elle permet, entre autres, d'expliquer la variabilité prévisible des résultats obtenus en fonction de l'époque de prélèvement de la litière.

B. — INFLUENCE DE QUELQUES ACIDES ORGANIQUES SUR LA MOBILISATION DE L'ALUMINIUM

Nous nous sommes surtout limités à l'étude du mode d'action de l'acide oxalique et de l'acide citrique, d'une part parce que ces acides ont été mis en évidence, à des concentrations notables, dans beaucoup de litières par différents auteurs et, d'autre part, parce que l'acide citrique arrive en tête des acides contenus dans des extraits aqueux de pseudophylles de *Pinus* (MUIR, 1964), lesquels sont très souvent les constituants principaux de la majorité des litières forestières du Sud-Ouest atlantique.

Chaque fois, nous avons comparé l'action solubilisatrice de ces deux acides vis-à-vis de l'aluminium à leur action solubilisatrice vis-à-vis du fer, de manière à essayer de préciser l'influence spécifique de l'acide organique sur la mobilisation préférentielle de Al^{+++} ou de Fe^{+++} et sur les conséquences pédogénétiques qui peuvent en dériver.

a) Technique utilisée

Un échantillon de 2 g de sol est introduit dans un tube de centrifugeuse de 100 ml. On ajoute 75 ml d'une solution normale d'acide citrique ou oxalique ; le pH de cette solution est préalablement ajusté à 3 par addition d'ammoniaque. La suspension est agitée 12 heures à l'agitateur rotatif ; on la laisse reposer durant 24 heures et on la centrifuge à 4 000 tours/minute pendant 5 minutes ; le surnageant est éliminé et

l'on détermine l'aluminium et le fer solubles dans les acides forts que renferme le culot de centrifugation. Le témoin est constitué par un poids identique de sol mis en suspension dans 75 ml d'eau distillée et soumis au même traitement. On peut donc connaître, par différence, les quantités de fer et d'aluminium extraites par les acides organiques. Avant la minéralisation au four, les couleurs des échantillons ainsi traités sont comparées à celles du code Munsell.

On a également comparé l'action à plus long terme d'un certain nombre d'acides (acide ascorbique, acide acétique, acide oxalique, acide citrique) sur l'extraction de Al^{+++} et de Fe^{+++} d'un échantillon de sol donné. Pour cela, 25 g de l'échantillon de sol ont été placés dans une fiole de 500 ml dans laquelle on a ajouté 150 ml d'une solution d'acide de normalité N/100 dont le pH a été ajusté à 3 par addition d'ammoniaque ; on a également ajouté quelques gouttes d'azide de sodium dans la suspension pour limiter l'activité microbienne. La fiole a été bouchée et laissée au repos durant 5 mois, à la température du laboratoire, la solution d'acide étant renouvelée tous les 15 jours. Au bout de 5 mois, on a éliminé le surnageant et l'on a dosé, après lavage à l'eau distillée, le fer et l'aluminium solubles dans les acides forts que contiennent les échantillons de sol ainsi traités ; dans ce cas-là également, le témoin est constitué par 25 g de sol qui sont demeurés en contact durant 5 mois avec 150 ml d'eau distillée ; les couleurs des différents échantillons traités de cette manière ont été comparées à celles du code Munsell. Dans toutes ces expériences, chaque traitement a comporté 3 répétitions.

b) Types de sols étudiés

— *Échantillon A* : il s'agit d'un sable de plage provenant de la région de Contis (Landes).

— *Échantillon B* : échantillon prélevé à 80 cm de profondeur dans une dune littorale (forêt domaniale de Lit-et-Mixe, Landes).

— *Échantillon C* : échantillon provenant de l'horizon profond (150 cm) d'un profil de la zone du flysch crétacé des Basses-Pyrénées (sol de touyas).

L'expérience de mobilisation de Al^{+++} et de Fe^{+++} , en un temps long (5 mois), a été réalisée avec le seul échantillon B.

c) Résultats obtenus (tabl. 15 et 16)

Comme l'on pouvait s'y attendre, c'est essentiellement la nature de l'acide organique mis en jeu qui conditionne la mobilisation de l'aluminium ou du fer.

L'expérience conduite pendant une durée de 5 mois indique que c'est surtout le fer qui est extrait, ce qui se traduit par une élévation du rapport Al^{+++}/Fe^{+++} des échantillons soumis à l'action des acides. Exception doit être faite cependant pour l'acide citrique qui mobilise un pourcentage de fer légèrement inférieur à celui de l'aluminium

L'action dissolvante des acides organiques diminue dans l'ordre : acide oxalique, acide ascorbique, acide citrique, acide acétique.

La mobilisation préférentielle du fer par rapport à l'aluminium est surtout importante pour l'acide oxalique (Al^{+++}/Fe^{+++} du sol traité = 1,03), suivi par l'acide

ascorbique ($Al^{+++}/Fe^{+++} = 0,79$) et par l'acide acétique ($Al^{+++}/Fe^{+++} = 0,73$). Le traitement par l'acide oxalique est particulièrement spectaculaire, le sol ayant subi l'action de cet acide étant à peu près totalement décoloré à la fin de l'expérience.

TABLEAU 15

Influence de l'acide citrique et de l'acide oxalique en solution normale (pH ajusté à 3) sur la mobilisation de l'aluminium et du fer de trois échantillons de sol (Période de contact : 12 heures)

	Témoins	Acide citrique N	Acide oxalique N
<i>Échantillon A</i> (sable littoral)			
Al^{+++} S.A. ⁽¹⁾	309	329	353
Fe^{+++} S.A. ⁽¹⁾	761	690	665
Al^{+++}/Fe^{+++}	0,40	0,47	0,53
dAl^{+++} S.A. ⁽²⁾	0	0	0
dFe^{+++} S.A. ⁽²⁾	9	9	13
Couleur ⁽²⁾	10 YR—7/4 brun très pâle	10 YR—7/4 brun très pâle	10 YR—8/1 blanc
<i>Échantillon B</i> (sable de dune)			
Al^{+++} S.A. ⁽¹⁾	520	519	432
Fe^{+++} S.A. ⁽¹⁾	773	783	573
Al^{+++}/Fe^{+++}	0,67	0,66	0,75
dAl^{+++} S.A. ⁽²⁾	0	0	17
dFe^{+++} S.A. ⁽²⁾	0	0	26
Couleur ⁽²⁾	10 YR—7/4 brun très pâle	10 YR—7/3 brun très pâle	10 YR—8/1 blanc
<i>Échantillon C</i> (sol du flysch)			
Al^{+++} S.A. ⁽¹⁾	92 870	91 200	84 000
Fe^{+++} S.A. ⁽¹⁾	90 000	85 350	73 670
Al^{+++}/Fe^{+++}	1,03	1,06	1,14
dAl^{+++} S.A. ⁽²⁾	2	2	9
dFe^{+++} S.A. ⁽²⁾	5	5	18
Couleur ⁽²⁾	10 YR—5/4 brun jaune	10 YR—7/4 brun très pâle	10 YR—7/3 brun très pâle

⁽¹⁾ Aluminium et fer solubles dans les acides forts (en mg/kg de sol séché à l'air). Moyenne de 3 répétitions.

⁽²⁾ Couleur selon Munsell.

⁽³⁾ Variation de la teneur en aluminium et en fer solubles dans les acides forts (en p. 100 par rapport à la teneur du témoin).

L'expérience conduite en un temps court (12 heures) fournit des résultats qualitativement identiques à ceux de l'expérience précédente. C'est l'acide oxalique qui se montre dans ce cas-là également le plus agressif, notamment vis-à-vis du fer, ce qui entraîne une décoloration très prononcée des échantillons à la fin de l'opération.

d) Discussion des résultats

La décoloration spectaculaire du sable de plage et du sable dunaire lorsque l'on soumet ces derniers à l'action de l'acide oxalique, et cela même pour des conditions de pH correspondant à une faible acidité, permet de supposer que la couleur initiale brun pâle de ces sables résulte de l'existence d'hydrates ferriques facilement altérables entourant les particules de quartz sous forme d'enduits de recouvrement ; dans ces conditions, on peut penser que certaines formations, à horizon A₂ très blanchi, qui se sont développées sur le plateau landais ne sont peut-être pas aussi anciennes que pourrait le laisser croire leur aspect très évolué ; les couvertures végétales qui se sont succédées sur ces sols sont, sans doute, à l'origine de la formation d'acides organiques parmi lesquels dominait peut-être l'acide oxalique. Ce point souligne l'importance du rôle joué indirectement par la végétation sur le mode d'évolution du substrat, la nature de cette végétation conditionnant celle des acides organiques libérés au cours de la décomposition des litières.

TABLEAU I6

*Influence de la nature de l'acide organique (normalité N/100
pH ajusté à 3) sur la mobilisation du fer et de l'aluminium
d'un échantillon de sol*

Période de contact : 5 mois

Nature de l'acide	Al ⁺⁺⁺ S. A. (1)	Fe ⁺⁺⁺ S. A. (1)	Al ⁺⁺⁺ Fe ⁺⁺⁺	dAl ⁺⁺⁺ (2)	dFe ⁺⁺⁺ (2)	Couleur (3)
Témoin	586	865	0,67	/	/	10 YR — 7/4 brun très pâle
Ac. acét. (N/100) ...	610	830	0,73	0	4	10 YR — 7/4 brun très pâle
Ac. ascorb. (N/100) .	435	547	0,79	26	37	10 YR — 8/3 brun très pâle
Ac. citr. (N/100) ...	440	705	0,62	25	19	10 YR — 7/3 brun très pâle
Ac. oxal. (N/100) ...	349	338	1,03	41	61	10 YR — 8/1 blanc

(1) Aluminium et fer solubles dans les acides forts (en mg/kg de sol séché à l'air. Moyenne de trois répétitions).

(2) Variation de la teneur en fer et en aluminium (en p. 100 par rapport à la teneur du témoin).

(3) Couleur selon Munsell.

On peut remarquer que, pour des conditions de normalité et de pH identiques, l'acide ascorbique, qui est un réducteur puissant, mobilise cependant moins de fer que l'acide oxalique ; ceci confirme donc bien que la mobilisation du fer peut avoir lieu sans qu'interviennent nécessairement des processus de réduction.

Le fait que l'acide oxalique soit susceptible de mobiliser un pourcentage de Al⁺⁺⁺ supérieur à celui mobilisé par l'acide citrique paraît en désaccord avec les résultats obtenus par JONES (1961), résultats qui montrent que l'acide citrique forme avec

l'aluminium des complexes plus stables que ceux formés entre l'acide oxalique et l'aluminium.

En définitive, un des points les plus importants établis par ces expériences est que si la mobilisation de l'aluminium et du fer des sols acides du Sud-Ouest atlantique était le seul fait de certains acides organiques aliphatiques hydrosolubles, ces derniers devraient provoquer une libération préférentielle de Fe^{+++} , phénomène qui est loin d'être toujours observé dans la nature.

e) Conclusion

Au cours de deux séries d'expériences menées l'une en un temps relativement long (5 mois) et l'autre en un temps court (12 jours), on a pu observer que la majorité des acides organiques testés mobilisaient proportionnellement plus de fer que d'aluminium, le plus réactif d'entre eux étant l'acide oxalique. Cette mobilisation du fer est suffisamment importante pour entraîner, dans certains cas, des modifications très sensibles de la couleur initiale des échantillons de sols, notamment dans le cas du sable de plage et du sable dunaire.

Cette agressivité variable des acides organiques en fonction de leur nature souligne l'importance de la litière et, en conséquence, celle du type d'association végétale dont dérive cette dernière, sur la plus ou moins grande différenciation apparente des horizons du substrat.

2. Mobilisation de l'aluminium par voie biologique

A. — DÉFINITION ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Cette forme de mobilisation de l'aluminium peut être considérée comme résultant de la mise en œuvre de processus biologiques. Si l'on s'en tient à cette définition, on devrait assimiler la solubilisation de l'aluminium par les acides organiques à une mobilisation d'ordre biologique puisque ces acides ont été eux-mêmes élaborés à la suite de l'intervention de processus biologiques ; en fait, ces substances, qui sont issues en majorité de débris végétaux morts tombés au sol, peuvent exercer leur action destructrice vis-à-vis des édifices minéraux même en l'absence de tout phénomène vital : leur action correspond donc bien à un phénomène purement chimique qui justifie leur classement parmi les facteurs principaux de la mobilisation chimique de Al^{+++} .

La mobilisation biologique proprement dite se fait simultanément à la mise en œuvre de processus biologiques intervenant notamment au niveau des racines : elle ne se produit plus dès que ces processus cessent eux-mêmes de se manifester ; il est probable que cette forme de mobilisation de Al^{+++} correspond en définitive à un certain nombre de mécanismes chimiques liés à la manifestation de la vie, mécanismes encore ignorés pour la plupart mais qui sont suffisamment puissants pour détruire, dans des conditions normales de température et de pression, des édifices minéraux réputés très résistants aux agents chimiques conventionnels les plus agressifs. Comme illustration de ceci, on peut rappeler que la majeure partie des cendres de beaucoup de végétaux est représentée par le silicium, élément qui entre pourtant dans la cons-

titution de composés généralement peu solubles : d'après EVANS (1962, 1965) et d'après MANDL, GRAUER et NEUBERG (1962) l'adénosine triphosphate exsudé par les racines jouerait un rôle fondamental dans la dissolution et la recristallisation ultérieure des composés du silicium.

La remarquable puissance d'extraction des organismes végétaux vis-à-vis de beaucoup d'éléments minéraux a retenu l'attention de nombreux pédologues et géologues, qui ont été amenés à attribuer à l'action directe de la végétation un rôle essentiel dans la formation des sols (EHRHART, 1955; KOVDA, 1956; REMEZOV, 1956; LOVERING, 1958; HARRIS, 1961; ZONN, 1963). Certains de ces concepts relatifs à une synthèse strictement biologique des sols peuvent donner lieu à des critiques ; cependant, il faut bien reconnaître que la masse des éléments minéraux pouvant être mobilisés par certains types de formations végétales exigerait, pour être mise en mouvement par le simple jeu des facteurs physico-chimiques de la géochimie (eau, CO₂, etc.) des périodes de temps incomparablement plus longues. La mobilisation par voie biologique peut donc supplanter la mobilisation par voie chimique, notamment dans les zones où le climat est favorable à l'installation de puissantes formations végétales.

C'est ainsi que, d'après KOVDA (1956), la végétation forestière actuelle du globe contiendrait de 10⁸ à 10⁹ tonnes de substances minérales, dont un pourcentage variable (10 à 50 p. 100) retournerait chaque année au sol ; d'après ce même auteur, un hectare de conifères extrait chaque année de 80 à 100 kg d'éléments minéraux, un hectare d'espèces à feuilles caduques de 400 à 600 kg, la quantité extraite atteignant de 1 000 à 2 000 kg/ha dans le cas de la végétation herbacée des steppes. MARCHENKO (1962) a calculé qu'un hectare de sapins de 200 ans représente 256 tonnes de matière sèche et 4 000 kg d'éléments minéraux. OVINGTON (1959) a estimé à 186 tonnes la matière sèche correspondant à un hectare de Pins sylvestres de 33 ans, la fraction minérale étant dans ce cas de l'ordre de 1 200 kg/ha environ. Bien entendu, dans ces bilans, on fait généralement intervenir la matière sèche et les substances minérales contenues dans les litières mais on ne tient cependant compte ni des éléments minéraux qui ont été solubilisés au niveau des racines sans avoir été nécessairement tous absorbés par le végétal, ni de ceux qui ont été entraînés par le lessivage : par exemple, KARPACHEVSKY (1963) a montré que les eaux de pluies qui traversent le couvert d'une forêt de sapins s'enrichissent en éléments minéraux au contact des feuilles et des troncs (enrichissement de l'ordre de quelques mg par litre) ; les substances qui reviennent ainsi au sol peuvent être soit reprises par la végétation, soit entraînées par lessivage hors de la portée des racines ; des exemples de cycle biologique rapide des éléments minéraux ont été donnés par d'autres auteurs, notamment par OVINGTON (1960) et plus récemment par MECKLENBURG (1964).

La puissance d'extraction des végétaux dépend évidemment des espèces considérées, lesquelles mobilisent préférentiellement, selon un déterminisme assez mal connu, telle ou telle substance minérale : LOVERING (1958) cite l'exemple de certaines forêts tropicales accumulatrices de silice qui peuvent, en 5 000 ans, extraire 4 000 t/ha de ce composé ; d'après CHAUDHRI (1964), *Suaeda fruticosa* est une espèce qui accumule suffisamment de sels minéraux pour que l'on puisse envisager, par son extension provoquée, le dessalage biologique de certaines zones désertiques de l'Est pakistanais actuellement complètement stérilisées par de fortes concentrations en sels ; WILDE (1959) a souligné l'aptitude de certaines espèces du genre *Pinus* (*Pinus resi-*

nosa et *Pinus banksiana*) à extraire les éléments nutritifs qui leur sont nécessaires à partir de micas, de feldspaths et de ferro-magnésiens ; il est vraisemblable que les Pins maritimes, qui se développent remarquablement sur les sols squelettiques dunaires, possèdent également cette aptitude, la majorité de ces sols étant dépourvus d'éléments extractibles par les réactifs agronomiques usuels.

En ce qui concerne plus particulièrement l'aluminium, FABER en 1927, puis BERTRAND en 1931, ont montré que certaines familles de végétaux, en particulier les Théacées, étaient susceptibles d'accumuler de fortes quantités de cet élément ; un certain nombre de ces familles ont été systématiquement étudiées par CHENERY (1948-1955). Un cas spectaculaire d'accumulation d'aluminium dans un organisme végétal a été cité dès 1904 par SMITH : ce dernier a mis en effet en évidence la présence de fortes quantités de succinate d'aluminium cristallisé dans le tronc d'*Orites excelsa*. Plus récemment, HUMPHREYS (1964) a souligné l'importance des taux de Al^{+++} rencontrés chez certains *Pinus* poussant sur des sols acides de l'Est de l'Australie.

L'aptitude de certaines espèces à extraire et à accumuler Al^{+++} est donc un fait bien établi, qui a conduit quelques auteurs comme HARRIS (1961) à donner aux formes mobiles de l'aluminium des sols une origine essentiellement biologique : d'après HARRIS, la très grande richesse en Al^{+++} soluble des sols formés dans les sites marécageux de la Guyanne britannique trouverait son origine dans l'accumulation et la décomposition d'énormes masses végétales riches en aluminium. Cette aptitude à la mobilisation ou à l'accumulation de Al^{+++} n'est pas d'ailleurs limitée aux végétaux supérieurs, certaines bactéries et diatomées ayant la possibilité de scinder en aluminium et silice des minéraux aussi résistants que la kaolinite (HUTCHINSON, 1945 ; ANTIPOV-KARATAYEV, TSYURUPA, 1963).

B. — MOBILISATION DE L'ALUMINIUM PAR LA VÉGÉTATION DES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE

Dans le but de préciser le rôle joué par les végétaux caractérisant les sols acides du Sud-Ouest atlantique dans la mobilisation de l'aluminium du substrat, on a procédé à des déterminations systématiques de cet élément dans différentes espèces. On a également dosé le fer qu'elles contiennent de manière à pouvoir apprécier l'aptitude de la flore à mobiliser préférentiellement Fe^{+++} ou Al^{+++} en comparant les rapports $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ dans le végétal et $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ dans le substrat.

Les résultats obtenus pour un certain nombre de profils développés dans la zone sableuse des Landes ou sur le flysch crétaé des Basses-Pyrénées figurent dans le tableau 17. Les observations suivantes peuvent être faites :

a) Rapports $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ dans les végétaux et dans le substrat

D'une manière générale, on constate que les rapports $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ dans les végétaux sont presque toujours supérieurs à ceux caractérisant l'ensemble du profil. Ce fait est plus particulièrement net pour les sols squelettiques de dunes, sols pour lesquels

TABLEAU I7

Rapports Al⁺⁺⁺/Fe⁺⁺⁺ dans les végétaux et dans les sols acides du S. O. Atlantique

Profil	Type de sol	Horizon	Sols			Végétaux			Végétation
			mg/kg (1)		mg/kg (2)	mg/kg (2)		Al ⁺⁺⁺ /Fe ⁺⁺⁺	
			Al ⁺⁺⁺ S.A.	Fe ⁺⁺⁺ S.A.		Al ⁺⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺		
1	Sol squelettique de dune	A ₀ /A ₁	1 500	4 610	0,3	181	24	7,5	<i>Pinus pinaster</i> 20/25 ans, pseudophylles verts <i>Pinus pinaster</i> 20/25 ans, pseudophylles secs <i>Pteridium aquilinum</i> (3) <i>Ulex europaeus</i> (1) <i>Sarothamnus scoparius</i> (3)
		A ₂	1 440	3 890	0,4	150	50	3,0	
		B	4 700	5 120	0,3	27	33	0,8	
		C	1 760	3 950	0,4	18	38	0,5	
2	Sol squelettique de dune	A ₀ /A ₁	520	1 220	0,4	138	13	10,6	<i>Pinus pinaster</i> 20/25 ans, pseudophylles verts <i>Pinus pinaster</i> 20/25 ans, pseudophylles secs Mousses <i>Pteridium aquilinum</i> (3) <i>Ulex europaeus</i> (2)
		A ₂	300	1 240	0,2	246	29	8,5	
		B	590	1 530	0,4	344	149	2,3	
		C	440	1 270	0,4	53	42	1,3	
3	Sol squelettique de dune	A ₀ /A ₁	560	830	0,9	186	32	5,8	<i>Pinus pinaster</i> 15/20 ans, pseudophylles verts <i>Pinus pinaster</i> 15/20 ans, pseudophylles secs Mousses <i>Sarothamnus scoparius</i>
		A ₂	450	870	0,7	312	40	7,8	
		B	520	1 310	0,3	512	270	1,9	
		C	560	1 100	0,7	57	80	0,7	
4	Podzol humoferrugineux (lande sèche)	A ₀	1 060	840	1,3	236	29	8,1	<i>Pinus pinaster</i> 30 ans, pseudophylles verts <i>Pinus pinaster</i> 30 ans, pseudophylles secs Mousses <i>Calluna vulgaris</i> (3) <i>Erica cinerea</i> (2)
		A ₁	720	380	1,9	218	40	5,5	
		A ₂	0	120	0,0	513	198	2,6	
		B	3 200	890	3,6	84	47	1,8	
		C	1 260	530	2,4	62	36	1,7	

Al⁺⁺⁺ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts, Fe⁺⁺⁺ S.A. = fer soluble dans les acides forts,

(1) = en mg par kg de terre fine séchée à l'air ;

(2) = en mg par kg de matière végétale séchée à 105°C

TABLEAU 17 (suite n° 1)

Profil	Type de sol	Horizon	Sols			Végétaux			Végétation	
			mg/kg (1)			mg/kg (2)				
			Al+++ S.A.		Fe+++ S.A.	Al+++		Fe+++		Al+++ Fe+++
			Al+++ S.A.	Fe+++ S.A.	Al+++	Fe+++	Al+++ Fe+++			
5	Podzol humoferrugineux (lande sèche)	A ₀	960	1 020	0,9	125	22	5,7	<i>Pinus pinaster</i> 25/30 ans pseudophylles verts <i>Pinus pinaster</i> 25/30 ans pseudophylles secs Mousses <i>Calluna vulgaris</i> (4) <i>Erica cinerea</i> (2) <i>Pteridium aquilinum</i> (2)	
		A ₂	0	360	0,0	259	29	8,9		
		B	4 450	2 440	1,6	244	400	2,4		
6	Podzol humoferrugineux (lande sèche)	A ₀	1 120	1 140	1,0	171	48	3,6	<i>Pinus pinaster</i> 20 ans, pseudophylles verts Mousses <i>Erica cinerea</i> (4) <i>Calluna vulgaris</i> (2) <i>Pteridium aquilinum</i> (3)	
		A ₂	1 010	1 140	0,9	408	158	2,6		
		B ₁	3 260	2 400	1,4	54	44	1,2		
		B ₂	4 540	1 820	2,5	67	52	1,3		
		C	3 710	1 810	2,1	51	64	0,8		
7	Podzol humoferrugineux (lande humide)	A ₀	380	770	0,5	135	60	2,3	<i>Pinus pinaster</i> 15/20 ans pseudophylles verts <i>Pinus pinaster</i> 15/20 ans pseudophylles secs <i>Erica scoparia</i> (4) <i>Molinia caerulea</i> (3)	
		A ₁	450	390	1,2	103	68	1,5		
		A ₂	380	430	0,9	87	61	1,4		
		B	3 456	850	4,1	51	74	0,7		
8	Podzol humoferrugineux (lande sèche)	A ₀	960	1 540	0,6	224	35	6,4	<i>Pinus pinaster</i> 30 ans, pseudophylles verts <i>Erica cinerea</i> (2) Mousses <i>Calluna vulgaris</i> (4)	
		A ₂	360	1 020	0,4	72	45	1,6		
		B'	750	1 810	0,4	286	142	2,0		
		B''	2 100	3 920	0,5	92	60	4,5		
		B'''	2 530	3 170	0,8					
		B''''	2 440	1 220	1,8					

Al+++ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts, Fe+++ S.A. = fer soluble dans les acides forts,

(1) = en mg par kg de terre fine séchée à l'air ;

(2) = en mg par kg de matière végétale séchée à 105°C.

TABLEAU I7 (suite n° 2)

Profil	Type de sol	Horizon	Sols			Végétaux			Végétation
			mg/kg (1)			mg/kg (2)			
			Al+++ S.A.	Fe+++ S.A.	Al+++ S.A. Fe+++ S.A.	Al+++	Fe+++	Al+++ Fe+++	
9	Sol de tuya mull acide flysch crét.	0-2	51 160	51 600	1,0	91	54	1,7	<i>Pteridium aquilinum</i> (4) <i>Erica cinerea</i> (2) Mousses <i>Festuca ovina</i> (2)
		2-20	62 080	60 060	1,1	440	126	3,5	
		20-50	67 400	63 880	1,1	4 070	1 980	2,1	
		50-150	73 000	87 980	0,8	320	242	1,3	

Al+++ S.A. = aluminium soluble dans les acides forts,

Fe+++ S.A. = fer soluble dans les acides forts,

(1) = en mg par kg de terre fine séchée à l'air;

(2) = en mg par kg de matière végétale séchée à 105°C.

le rapport $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ est toujours inférieur à 1, alors qu'il est très souvent largement supérieur à l'unité dans la végétation qui recouvre ces sols. Ce fait est d'autant plus remarquable que les sols dunaires sont dépourvus d'aluminium mobile. On peut donc dire que la végétation caractérisant ces sols paraît capable d'extraire plus facilement l'aluminium que le fer. Il en résulte que l'on pourrait prévoir un enrichissement relatif en Al^{+++} des horizons de surface si la mobilité de l'aluminium et du fer provenant des débris végétaux était la même.

b) Concentrations en Al^{+++} et Fe^{+++} dans les différentes espèces végétales

Sur le tableau 18 figurent les teneurs moyennes en Al^{+++} et Fe^{+++} rencontrées dans différents végétaux caractéristiques des Landes de Gascogne.

TABLÉAU 18

Teneurs moyennes en aluminium et en fer de différents végétaux caractéristiques des sols sableux des landes de Gascogne

Végétaux	mg/kg de matière végétale séchée à 105°				$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$
	Al^{+++}	Fe^{+++}	écart-type estimé (Al^{+++})	écart-type estimé (Fe^{+++})	
Pseudophylles verts (<i>Pinus pinaster</i>)	193	37	57	12	5,2
Pseudophylles secs (<i>Pinus pinaster</i>)	207	45	63	14	4,6
Écorce « Bark » (<i>Pinus pinaster</i>)	225	30	43	13	7,5
Mousses	404	175	116	63	2,3
<i>Pteridium aquilinum</i>	48	58	17	13	0,8
<i>Calluna vulgaris</i>	67	44	20	8	1,5
<i>Erica cinerea</i>	57	45	20	9	1,3
<i>Erica scoparia</i>	142	74	61	24	1,9
<i>Molinia coerulea</i>	57	76	6	15	0,8

C'est dans les Mousses que l'on rencontre les plus fortes teneurs en Al^{+++} et Fe^{+++} ; quoique assez bien établie, l'aptitude de ces végétaux à accumuler les éléments minéraux a cependant donné lieu à certaines controverses relatives à la nature des éléments accumulés. C'est ainsi que d'après POLYNOV (1) les Mousses concentrent fortement le fer, la silice, le calcium, le soufre et le phosphore mais assez peu l'aluminium; par contre, MANAKOV (1962) affirme que les Mousses accumulent le calcium et la silice mais aussi, et en plus grande quantité, l'aluminium. Les résultats exposés dans le tableau 18 semblent confirmer les conclusions de Manakov, le rapport $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ étant

(1) Cité par KOVDA (1956).

de l'ordre de 2,3 et ceci même pour les Mousses provenant des sols squelettiques de dunes, où le rapport $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ est pourtant bien inférieur à l'unité.

La Molinie (*Molinia coerulea*), espèce caractérisant les zones à drainage déficitaire de la lande, contient généralement plus de fer que d'aluminium : ce fait peut s'expliquer soit par des exigences particulières de cette graminée, soit par l'existence de conditions d'hydromorphie qui favorisent la solubilisation du fer par réduction et par là même son absorption par le végétal.

Toutes les Ericacées et, parmi elles, plus particulièrement la grande Bruyère (*Erica scoparia*) sont plus riches en Al^{+++} qu'en Fe^{+++} ; ce fait n'est peut-être pas sans rapport avec l'action dégradante marquée qu'exerce sur les sols ce type de couverture végétale.

c) *Accumulation comparée du fer et de l'aluminium dans le Pin maritime (Pinus pinaster)*

Le tableau 18 indique que c'est dans les pseudophylles du Pin maritime que l'on rencontre les rapports $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ les plus élevés de tous les végétaux analysés. La même observation est valable pour l'écorce ou plus précisément le « bark » de cet arbre. Là encore, il n'est pas possible de relier ce rapport à celui existant dans les sols puisque des taux de Al^{+++} élevés se rencontrent aussi bien dans les pseudophylles ou le bark de pins poussant sur les dunes que chez ceux de pins poussant sur le plateau continental.

Compte tenu de l'importance des surfaces actuellement ou anciennement occupées par le Pin maritime dans les Landes, on a essayé de préciser un peu mieux l'aptitude de cet arbre à accumuler Al^{+++} ou Fe^{+++} en procédant à des déterminations de ces éléments dans différentes parties de trois arbres voisins, âgés de 15 à 20 ans et provenant d'une pineraie de dune. Les résultats qui figurent dans le tableau 19 confirment

TABLEAU 19

Comparaison des teneurs en fer et en aluminium dans le Pin maritime et dans le substrat (Sols squelettiques de dunes)

Arbre n°	Bois			Écorce			Pseudophylles verts			Substrat (hor. 0-60 cm)		
	mg/kg (1)		$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$	mg/kg (1)		$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$	mg/kg (1)		$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$	mg/kg (1)		$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$
	Al^{+++}	Fe^{+++}		Al^{+++}	Fe^{+++}		Al^{+++}	Fe^{+++}		Fe^{+++} S.A.	Al^{+++} S.A.	
I	10	10	1	346	27	12,8	278	32	8,7	760	270	0,4
II	6	23	0,4	316	27	11,8	192	35	5,5	690	265	0,4
III	7	15	0,5	496	27	18,4	303	47	6,5	670	306	0,4

Al^{+++} S.A. = aluminium soluble dans les acides forts.

Fe^{+++} S.A. = fer soluble dans les acides forts.

(1) = en mg/kg de matière végétale séchée à 105°C.

l'essentiel de ceux déjà obtenus, à savoir l'importance des taux de Al^{+++} et des rapports $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ dans les pseudophylles et dans l'écorce ; dans le bois, par contre, les taux de Al^{+++} et de Fe^{+++} sont très faibles, la valeur moyenne du rapport $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ se situant dans ce cas-là aux alentours de 1.

Les concentrations relativement élevées en Al^{+++} rencontrées dans les pseudophylles et dans le « bark » du Pin maritime signifient que cet élément joue peut-être un rôle dans le métabolisme de cette espèce ; cependant, les observations faites par HUMPHREYS et TRUMAN (1964) tendraient à prouver au contraire que les fortes concentrations en Al^{+++} peuvent s'avérer toxiques pour certains *Pinus* dont l'alimentation phosphatée n'est pas convenablement assurée.

Quoi qu'il en soit, le Pin maritime constitue, grâce à son aptitude à la mobilisation de l'aluminium et à l'importance des surfaces qu'il occupe ou a occupées, un facteur non négligeable dans la pédogenèse du Sud-Ouest atlantique.

d) Conclusion

Il apparaît que, d'une manière générale, la flore caractéristique des sols acides du Sud-Ouest atlantique extrait et concentre plus intensément l'aluminium que le fer. L'accumulation d'importantes masses végétales en voie de décomposition permet de se faire une idée un peu plus précise des conséquences que peut entraîner à long terme la seule action de la végétation : une accumulation de ce genre a été rencontrée dans une tourbière haute de 3 mètres d'épaisseur de la région d'Ogeu (Basses-Pyrénées). Les caractéristiques de cette formation figurent dans le tableau 20. On

TABLEAU 20

Caractéristiques analytiques de la tourbière haute d'Ogeu (Basses-Pyrénées)

Horizon (cm)	pH-eau	pH-KClN	Mat. org. % t. fine séch. air	en ‰ de terre fine séchée à l'air				$\frac{Al^{+++} \text{ S.A.}}{Fe^{+++} \text{ S.A.}}$
				Carbone	Al^{+++} échang.	Al^{+++} S.A.	Fe^{+++} S.A.	
0-20	4,0	3,0	74	434	0,534	23,200	6,200	3,7
20-50	3,6	2,8	93	549	0,512	13,120	2,600	5,3
50-120	4,2	3,1	93	549	0,394	12,960	2,280	5,7

peut remarquer que, dans les horizons où la masse végétale représente 93 p. cent de l'échantillon, le rapport $\frac{Al^{+++} \text{ S.A.}}{Fe^{+++} \text{ S.A.}}$ est de l'ordre de 5,5 alors que ce rapport n'est que de 3,7 dans l'horizon de surface où la masse végétale en décomposition ne représente plus que 74 p. 100 de la masse totale. En outre, on peut également noter que ces rapports sont de 3 à 4 fois supérieurs à ceux qui caractérisent le profil T₂, profil situé pourtant à quelques mètres seulement de la tourbière. La prédominance de

l'aluminium sur le fer apparaît donc d'autant plus marquée que le sol est riche en matières organiques.

Ces faits d'observation semblent donc militer en faveur de l'hypothèse d'HARRIS (1961), qui, s'appuyant sur des observations comparables effectuées par lui dans des sols marécageux de la zone côtière de la Guyane britannique, attribue aux fortes concentrations en aluminium mobile de ces sols une origine strictement biologique.

C. — MOBILISATION DE L'ALUMINIUM PAR VOIE MICROBIENNE

Si le rôle direct ou indirect des micro-organismes dans la solubilisation des composés du fer et du manganèse a donné lieu à de nombreux travaux, parmi lesquels on peut citer ceux de BÉTRÉMIEUX (1951), MAIGNIEN (1958) et ARISTOVSKAYA (1963), il n'en a pas été de même pour l'aluminium, la mobilisation et la mise en mouvement de ce dernier passant généralement inaperçues en raison de l'absence de coloration des composés de ce métal.

En 1953 cependant, CHOUBERT, HÉNIN et BÉTRÉMIEUX ont remarqué, au cours d'expériences relatives à la mise au point d'une technique de purification des bauxites par voie biologique, que la fermentation en anaérobiose permettait, non seulement la solubilisation du fer constituant l'essentiel des impuretés de ces bauxites, mais aussi celle de l'aluminium lorsque le pH s'abaissait suffisamment : d'après ces auteurs, certaines accumulations de gibbsite à allure concrétionnée, que l'on rencontre au Surinam et en Guyane anglaise, proviendraient de la solubilisation antérieure de l'aluminium au cours de fermentations qui se seraient déroulées en milieu particulièrement acide.

Il paraît donc bien établi que les processus microbiens qui modifient localement le pH sont susceptibles de contribuer à la mobilisation de l'aluminium. Des variations saisonnières des taux d'aluminium mobile, en rapport avec la variation de l'intensité de ces processus microbiens, ont d'ailleurs été citées par KAC-KACAS (1963) et par PLUCKNETT (1963).

La nitrification ou l'ammonification font précisément partie des processus pouvant intervenir dans une modification du pH du sol ; cette forme de l'activité microbienne peut revêtir une certaine ampleur dans le cas de sols riches en matières organiques, où le rapport C/N est suffisamment faible pour entretenir une bonne activité des micro-organismes (DUCHAUFOR, 1957). Les sols des touyas développés sur le flysch crétacé correspondent à ce type de sols, aussi a-t-on utilisé l'un d'entre eux pour mettre en place le dispositif expérimental suivant, destiné à préciser le rôle de la nitrification et de l'ammonification dans la mobilisation de l'aluminium.

— Trente petits pots en matière plastique à drainage naturel ont reçu chacun 1 kg de terre provenant de l'horizon de surface d'une lande à touyas (pH-eau = 5,0, pH-KCl N = 3,9, Al⁺⁺⁺ échangeable = 336 mg/kg, C = 27,5 p. 1000, N = 2,38 p. 1000, C/N = 11,6).

— Les pots ont été placés à température constante (25° C environ) durant 70 jours. La moitié d'entre eux ont été arrosés journalièrement à 60 p. 100 de la capacité de rétention en eau, de manière à permettre le déroulement normal de la minéralisation.

— A intervalles de temps définis (8, 15, 21, 30 et 70 jours), on a prélevé 3 pots de chacun des deux lots de terre (lot maintenu humide et lot non humidifié) ; sur la terre provenant de chaque pot, on a procédé aux déterminations suivantes : pH-eau, aluminium échangeable, azote nitrique et azote ammoniacal extractibles.

Les résultats obtenus (moyennes de 3 répétitions) sont représentés par la figure 6.

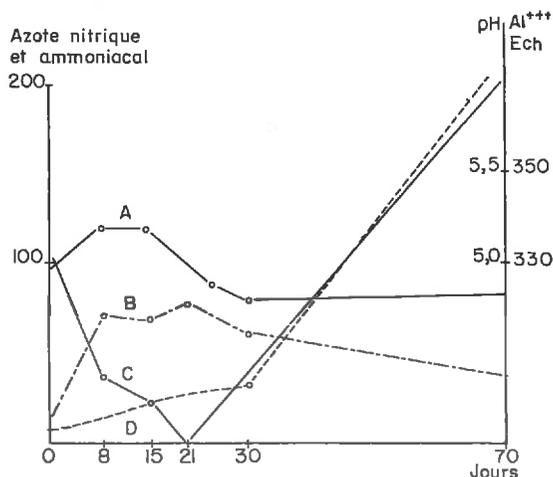


FIG. 6. — Variation des taux d'aluminium échangeable et du pH-eau en fonction des taux d'azote nitrique et d'azote ammoniacal produits au cours de la minéralisation de la matière organique d'un sol de touyas

A : pH-eau ;
 B : taux d'azote ammoniacal (en mg/kg de terre) ;
 C : taux d'aluminium échangeable (en mg/kg de terre) ;
 D : taux d'azote nitrique (en mg/kg de terre).

Dans les pots témoins non humidifiés, le pH, le taux d'azote minéral et le taux d'aluminium échangeable ne varient pratiquement pas au cours des 70 jours : Al^{+++} échangeable = 336 mg/kg, pH-eau = 5,0, azote nitrique = 8 mg/kg, azote ammoniacal = 15 mg/kg.

Dans les pots dont l'humidité est maintenue à 60 p. 100 de la valeur correspondant à la capacité de rétention, l'ammonification démarre beaucoup plus rapidement que la nitrification ; elle s'accompagne d'un gain de 2/10 d'unité pH et d'une chute du taux d'aluminium échangeable, lequel passe par un minimum au bout de 21 jours (diminution de l'ordre de 13 p. 100 par rapport au témoin non humidifié). A partir du trentième jour environ, la nitrification s'intensifie de sorte que, dans les pots prélevés le soixante-dixième jour, elle a largement supplanté l'ammonification ; cette inversion du phénomène s'accompagne d'une chute du pH de l'ordre de 2/10 d'unité et d'une augmentation du taux d'aluminium échangeable de 12 p. 100 environ par rapport au témoin non humidifié.

La prédominance des processus d'ammonification ou des processus de nitrification dans ce type de sol dépourvu de bases entraîne donc une légère modification du pH-eau et une variation beaucoup plus sensible du taux d'aluminium échangeable puisque celui-ci peut passer de 290 mg/kg à 370 mg/kg selon que l'un ou l'autre des deux phénomènes domine.

Il est vraisemblable que la mesure du pH de la suspension de terre effectuée selon la technique conventionnelle ne permet pas de saisir les variations locales résultant de l'accumulation, en un point donné du sol, de l'acide nitrique ou de l'ammoniac produits au cours de la nitrification et de l'ammonification ; ces accumulations sont cependant suffisamment importantes pour entraîner momentanément la solubilisation ou la précipitation d'une partie des hydrates d'aluminium du milieu.

Ces résultats permettent donc de souligner l'importance des processus de minéralisation de l'azote dans la mobilisation de l'aluminium des sols acides. Cette forme de mobilisation biologique ne saurait être négligée, surtout dans les sols à C/N suffisamment faible pour que l'on puisse escompter une minéralisation assez intense.

D. — CONCLUSION

Les résultats obtenus tendent à prouver que le couvert végétal caractérisant les sols acides du Sud-Ouest atlantique extrait et concentre en plus grande quantité l'aluminium que le fer et ceci quelle que soit l'importance relative de ces deux éléments dans le substrat. Ce fait est plus particulièrement net pour le Pin maritime dont l'aptitude à mobiliser l'aluminium se manifeste d'une manière très marquée, même dans les sols squelettiques dunaires dépourvus de Al^{+++} mobile.

Dans le cas particulier des sols formés sur le flysch crétacé des Basses-Pyrénées (sols de touyas), la mobilisation de l'aluminium au cours des processus de nitrification a pu facilement être mise en évidence en raison de l'intensité que peut revêtir ce phénomène, même au cours de périodes de temps relativement courtes.

L'intervention directe de la végétation et des micro-organismes paraît donc jouer un rôle très important dans l'altération des minéraux originels de ces sols et, par conséquent, dans la genèse des formes mobiles de l'aluminium. On peut donc se demander si, dans le cas particulier de cet élément et de ces sols, l'intervention des processus biologiques n'est pas susceptible de prendre le pas sur celle des facteurs purement physico-chimiques de l'altération.

CHAPITRE III

REDISTRIBUTION DE L'ALUMINIUM DANS LES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE

On essaiera, dans ce chapitre, de préciser la nature et l'intensité des processus qui provoquent le déplacement effectif de l'aluminium hors de la zone où la phase de mobilisation de ce métal a eu lieu.

1. Distribution de l'aluminium soluble dans les acides forts et de l'aluminium échangeable dans quelques profils caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique

Les commentaires relatifs à la distribution de Al^{+++} ont été faits dans les chapitres I et II de la première partie. On peut les résumer comme suit :

A. — SOLS SABLEUX DES LANDES DE GASCOGNE

a) *Sols squelettiques de dunes*

La distribution de l'aluminium soluble dans les acides forts est homogène tout le long du profil ; l'aluminium échangeable n'existe qu'à l'état de traces.

b) *Sols formés en lande sèche*

L'accumulation de l'aluminium soluble dans les acides est très marquée dans les horizons illuviaux, surtout dans les B_1 (alios), horizons où l'on rencontre également les taux les plus importants d'aluminium échangeable.

c) *Sols formés en lande humide*

Les taux les plus importants d'aluminium soluble dans les acides sont rencontrés dans les horizons de surface, notamment dans le A_1 . La différence avec la lande sèche s'accroît encore en ce qui concerne l'aluminium échangeable, le taux de ce dernier diminuant rapidement en profondeur dans les profils situés en lande humide.

B. — SOLS DE TOUYAS

a) *Sols du flysch*

Les teneurs en Al^{+++} soluble dans les acides forts sont très variables avec la profondeur. Dans certains cas cependant, on peut observer une accumulation de cet élément dans les horizons de surface. En tout état de cause, les taux d'aluminium soluble dans les acides ne paraissent pas liés aux teneurs en argile.

Les taux d'aluminium échangeable sont également très variables avec la profondeur et ne sont pas, eux non plus, liés aux teneurs en argile. On note quelquefois une augmentation brusque de ce taux à une certaine profondeur (entre 50 et 70 cm en général).

b) *Sols des terrasses moyennes et supérieures du Quaternaire ancien*

La teneur en Al_2O_3 S.A. est relativement homogène sur l'ensemble du profil, avec cependant une légère tendance à l'augmentation en profondeur. Les taux d'aluminium échangeable, contrairement aux sols du flysch, décroissent régulièrement et très sensiblement quand la profondeur augmente.

C. — CONCLUSION

Dans les sols sableux des Landes de Gascogne, la répartition de l'aluminium soluble dans les acides forts, ainsi que celle de l'aluminium échangeable, sont étroitement liées aux conditions de drainage du milieu ; en particulier, l'abondance de l'aluminium échangeable dans les horizons de surface des profils développés en lande humide peut poser des problèmes lors de la remise en valeur de ces sols, remise en valeur qui porte en priorité sur les zones correspondant précisément à la lande humide.

La répartition homogène de Al^{+++} soluble dans les acides forts dans les sols squelettiques de dunes et sa répartition hétérogène dans les profils développés sur le plateau continental confirment l'énorme différence qui sépare les degrés d'évolution de ces formations. Une remarque analogue pourrait être faite en ce qui concerne les sols de touyas ; cependant, il convient de rappeler que, pour ces derniers, une texture totalement différente de celle caractérisant les sols sableux des Landes a freiné la redistribution des éléments, ce qui confère à ces profils un aspect peu évolué.

2. Comparaison entre la distribution du fer et celle de l'aluminium dans quelques profils caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique

C'est la comparaison des taux de fer libre des différents horizons d'un profil qui sert généralement à apprécier le degré de lessivage d'un sol soumis à une pluviosité abondante, comme c'est le cas pour les sols acides du Sud-Ouest atlantique. La

détermination du rapport $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ (1) dans les différents horizons d'un profil donné, ainsi que celle des indices d'entraînement respectifs de ces deux éléments, permettent de comparer leur mobilité et de préciser dans quelle mesure les processus qui conduisent à la mise en mouvement de Fe_2O_3 sont identiques ou non à ceux qui régissent les déplacements de Al_2O_3 .

Ces déterminations ont été effectuées systématiquement pour un certain nombre de profils de sols sableux ou de sols de touyas (tabl. 21). Elles appellent les commentaires suivants :

A. — SOLS SABLEUX DES LANDES DE GASCOGNE

Les rapports $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ dans les sols squelettiques sont toujours inférieurs à l'unité ; les sols de dunes sont donc plus riches en fer qu'en aluminium : c'est vraisemblablement à la prédominance des composés du fer que l'on doit la teinte jaunâtre qui caractérise les formations littorales (JUSTE et DUTIL, 1965).

Les rapports $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ sont très souvent supérieurs à l'unité dans les sols développés sur le plateau continental. Si l'on admet que la roche-mère sur laquelle se sont développés ces sols était à l'origine, comme les sables littoraux actuels, beaucoup plus riche en fer qu'en aluminium, il faut aussi admettre qu'il y a eu, au cours des temps, extraction et exportation préférentielle du fer hors du profil. Il est vraisemblable que l'ennoyage à peu près permanent de la majeure partie du territoire landais par la nappe phréatique, avant les grands travaux d'assainissement contemporains, est responsable de cette mobilisation massive du fer par glyification. Cette hypothèse paraît être confirmée par l'existence d'importantes accumulations d'hydrates cristallisés de ce métal dans les zones situées en bordure des axes de drainage naturels, zones dans lesquelles la réoxygénation de la nappe conduit à l'oxydation et à la précipitation du fer. Les formations, souvent très fortement indurées (garluches et alios ferrugineux), que l'on rencontre dans ces secteurs dont l'extension géographique est assez limitée, s'expliquent mieux si l'on tient compte de l'importance du stock de fer que représentait sans doute à l'origine la masse des sables recouvrant le plateau landais. Une autre confirmation de cette hypothèse est fournie par le fait que les sols formés en lande sèche sont généralement plus riches en fer soluble dans les acides forts que les sols développés dans des conditions d'hydromorphie très accusée (DUCHAUFOUR, 1955, 1957) ; dans ces derniers, l'extraction et l'exportation du fer hors du profil, par l'intermédiaire de la nappe phréatique, ont donc masqué les mouvements verticaux de cet élément ; dans ces conditions, la valeur calculée de l'indice d'entraînement apparent est difficilement interprétable.

C'est dans les horizons illuviaux organiques que l'on rencontre les rapports $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S. A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ les plus élevés ; l'enrichissement en aluminium de ces horizons a donc été beaucoup plus notable que leur enrichissement en fer ; leur teinte brune à rougeâtre

(1) $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}$ = aluminium et fer solubles dans les acides forts.

TABLEAU 21

*Distribution de l'aluminium et du fer
dans quelques profils caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique*

Profil	Type de sol ou végétation	Horizon	p. 1000 terre fine séchée à l'air			Rapport Al ₂ O ₃ S.A. Fe ₂ O ₃ S.A.	Indice d'entraînement (2)	
			Al+++ échang.	Al ₂ O ₃ S.A. (1)	Fe ₂ O ₃ S. A. (1)		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
L ₁	Lande sèche	A ₀	0,096	1,440	0,440	3,5	6,9	19,0
		A ₁	0,087	1,210	0,350	3,5		
		A ₂	0,024	0,530	0,280	1,9		
		B ₁	0,159	10,120	1,920	5,3		
		B ₂	0,020	3,850	2,350	1,6		
L ₂	Lande sèche, (dune conti- nentale)	A ₀	0,012	2,010	1,190	1,7	7,4	très grand
		A ₁	0,012	1,360	0,540	2,5		
		A ₂	0,000	0,000	0,170	0,0		
		B ₁	0,056	6,040	1,270	4,8		
		B ₂	0,000	2,390	0,770	3,1		
L ₃	Lande humide	A ₀	0,220	10,040	3,500	2,9	1,4	1,3
		A ₁	0,227	14,500	2,730	5,3		
		B ₁	0,069	12,690	5,050	2,5		
		B ₂	0,036	3,700	0,810	4,6		
L ₄	Lande humide	A ₀	0,290	7,560	3,610	2,1	0,3	1,2
		A ₁	0,171	7,990	2,540	3,1		
		B	0,116	9,290	0,710	13,0		
		B	0,043	7,440	1,190	6,3		
S ₁	Solsquelettique de dune	A ₀ -A ₁	0,008	2,840	6,590	0,4	1,3	1,1
		A ₂	0,007	2,720	5,550	0,5		
		B	0,005	3,200	7,310	0,4		
		C	0,004	3,320	5,640	0,6		
S ₂	Solsquelettique de dune	A ₀ -A ₁	0,003	1,060	1,190	0,9	2,6	1,2
		A ₂	0,007	0,850	1,240	0,7		
		B	0,009	0,990	3,130	0,3		
		C	0,011	1,070	1,370	0,7		
T ₁	Sol de touyas (flich cré- tacé)	Prof. (cm)					1,6	1,4
		0- 2	0,393	96,180	73,270	1,9		
		2- 20	0,513	116,710	85,290	1,4		
		20- 50	0,465	126,710	90,710	1,4		
50-150	1,165	164,190	131,770	1,2				
T ₂	Sol de touyas (sol des ter- rasses ancien- nes du Qua- ternaire)	Prof. (cm)					1,2	1,1
		0- 2	0,477	52,940	36,040	1,5		
		2- 20	0,374	58,960	39,050	1,5		
		20- 40	0,259	58,960	41,430	1,4		
40- 80	0,246	63,320	41,860	1,4				

(1) Al₂O₃ S.A. Fe₂O₃ S.A. = aluminium et fer solubles dans les acides forts.

(2) Indice d'entraînement = $\frac{R_2O_3 \text{ S.A. de B}}{R_2O_3 \text{ S.A. de A}_2}$ ou de A₁.

ne traduit pas nécessairement la présence d'une forte accumulation ferrique, elle est plutôt liée à la nature ou, plus précisément, au degré de condensation des acides humiques qui se sont accumulés. L'extraction de la matière organique de ces horizons, à l'aide d'un réactif alcalin conventionnel (soude ou pyrophosphate), ne laisse subsister qu'un résidu de sable incolore : c'est donc elle qui est à la base de la coloration des horizons illuviaux de ces formations (Van DIEPEN, 1956 ; JUSTE et DUTIL, 1965).

Si le rapport $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ est très élevé dans les horizons d'accumulation, il est par contre généralement assez faible dans les horizons de surface, ce qui peut laisser supposer que c'est surtout l'aluminium qui est lessivé. En définitive, et quel que soit le mécanisme exact à faire intervenir, l'ensemble de ces observations tend à prouver que, dans le cas particulier des sols sableux des Landes de Gascogne, la mobilité de l'aluminium n'est pas identique à celle du fer, ce qui peut laisser supposer que les facteurs qui régissent les déplacements de ces deux métaux ne sont pas nécessairement les mêmes.

B. — SOLS DE TOUYAS

Dans le cas des sols formés sur le flysch crétacé, les rapports $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ sont voisins de 1 pour l'ensemble du profil, avec cependant une certaine tendance à l'augmentation au voisinage de la surface.

Pour les sols développés sur les terrasses du Quaternaire ancien, les rapports $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ S.A.}}$ sont légèrement plus élevés que pour les sols du flysch. Cette tendance s'accroît nettement pour le profil de la tourbière d'Ogeu (tabl. 20) où des valeurs de l'ordre de plusieurs fois l'unité sont observées. Ceci confirme donc une fois de plus la prédominance croissante de l'aluminium sur le fer quand augmente le taux de matière organique du sol.

Malgré tout, et en dehors du cas exceptionnel que représente le profil développé dans la tourbière haute d'Ogeu, la répartition de l'aluminium et celle du fer sont assez homogènes dans les sols de touyas : il est certain que, contrairement aux sols des Landes de Gascogne, la texture et peut-être plus encore l'insaturation du complexe absorbant minéral de ces sols ont freiné les mouvements de Al^{+++} et de Fe^{+++} et par là même atténué les différences de mobilité de ces deux métaux.

3. Influence des colloïdes humiques sur la redistribution de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique

De longue date, les déplacements des sesquioxydes de fer et d'aluminium ont été associés à ceux des colloïdes humiques ou de leurs précurseurs. En vérité, il faut reconnaître que la majorité des auteurs se sont surtout intéressés au fer, élément dont le dosage n'a jamais posé que peu de problèmes et dont les déplacements s'accompagnent presque toujours d'une modification spectaculaire de la couleur initiale du profil (HÉNIN et BÉTRÉMIEUX, 1948 ; BÉTRÉMIEUX, 1951 ; BLOOMFIELD, 1964 ; WRIGHT et LEVICK, 1956 ; DE LONG et SCHNITZER, 1955 ; BLOOMFIELD, 1956 ; SWINDALE et

JACKSON, 1956 ; LOSSAINT, 1959 ; KAURICHEV, KULAKOV et NOZDRUNOVA, 1960 ; DUCHAUFOUR, 1963). Un grand nombre d'expériences de pédologie expérimentale mettant en jeu des extraits aqueux de litières ou de feuilles fraîches ont ainsi été réalisées ; elles ont permis de conclure que le fer migrerait généralement sous forme de complexes organo-métalliques solubles, suffisamment stables pour demeurer en solution dans les conditions de pH du sol. En réalité, la majorité des auteurs, notamment BÉTRÉMIEUX (1951), BLOOMFIELD (1956), BROMFIELD (1954) et MAIGNIEN (1958) ont insisté sur le fait que la mise en solution et le transport du fer nécessitaient l'intervention de processus de réduction, l'influence de ces derniers étant souvent difficile à dissocier de l'action complexante proprement dite des substances organiques. Notons aussi que certains auteurs, et en particulier De LONG et SCHNITZER (1955), LOSSAINT (1959), puis plus récemment MUIR *et al.* (1964), attribuent à l'action dispersante des composés organiques du sol la mobilisation et le déplacement du fer.

L'étude de l'influence des composés humiques proprement dits sur le transport du fer a donné lieu à un nombre de travaux aussi importants que ceux relatifs à l'intervention d'extraits aqueux de végétaux frais ou incomplètement humifiés : ALEXANDROVA (1960), KONONOVA (1961), TITOVA (1962), DYAKANOVA (1962), DUCHAUFOUR (1948-1957), PONOMAREVA (1962), PASTERNAK (1962), WHRIGHT et SCHNITZER (1963), ont montré l'étroite association existant entre les composés humiques (notamment les acides fulviques) et le fer au cours de la migration de ce dernier ; en particulier, il est bien établi que la majorité du fer engagé dans des complexes organo-métalliques naturels migre vers l'anode lorsque l'on soumet à l'électrophorèse les acides humiques d'un sol.

Si une masse abondante de travaux a été consacrée au rôle des composés humiques ou de leurs précurseurs sur la mobilisation et le déplacement du fer, ceux relatifs à la mobilisation et au déplacement de l'aluminium par l'intermédiaire de ces mêmes composés ont été beaucoup plus restreints : BLOOMFIELD (1954) a été l'un des rares auteurs à comparer systématiquement l'action solubilisatrice d'extraits aqueux de différents végétaux vis-à-vis de Fe^{+++} et de Al^{+++} : les résultats qu'il a obtenus paraissent prouver que la mobilisation de Al^{+++} par les extraits aqueux est toujours moins importante que celle de Fe^{+++} ; HÉNIN (1956) a insisté sur cette différence de mobilité des deux éléments, différence qui ne devrait pas exister si les processus qui conduisent à la mobilisation et à l'entraînement des deux métaux étaient les mêmes. Cette différence de comportement de Al^{+++} et de Fe^{+++} vis-à-vis des substances assurant leur mobilisation et leur transport est en contradiction flagrante avec les faits d'observation, lesquels montrent que, dans les horizons illuviaux des sols podzoliques, on trouve généralement beaucoup plus d'aluminium qui a été entraîné par la matière organique que de fer (KAPLYUK, 1963 ; ARISTOVSKAYA, 1963 ; DUCHAUFOUR, 1964 ; MARTIN et REEVE, 1960 ; JACQUIN, JUSTE et DUREAU, 1965). D'après WHRIGHT et SCHNITZER (1963), cette anomalie pourrait résulter de la plus grande instabilité des complexes organo-métalliques contenant du fer que de ceux contenant de l'aluminium vis-à-vis des sels de calcium, lesquels sont souvent rendus responsables de la floculation des composés humiques dans les horizons d'accumulation.

Cette accumulation marquée de l'aluminium se rencontre également, comme nous l'avons déjà signalé à plusieurs reprises, dans les horizons illuviaux de certains

sols acides du Sud-Ouest atlantique, et notamment dans ceux des sols sableux des Landes de Gascogne. La coexistence, dans ces horizons illuviaux, d'une accumulation de matière organique et d'une accumulation d'aluminium, amène donc, pour préciser le rôle éventuel joué par les colloïdes organiques sur la migration de Al^{+++} , à déterminer la quantité de ce métal effectivement liée aux fractions humiques rencontrées dans les divers horizons de quelques profils caractéristiques de cette région.

A. — TECHNIQUE UTILISÉE

— Les acides humiques sont extraits par une solution de pyrophosphate 0,1 M, précipités par HCl, lavés à l'eau distillée, puis redissous dans 1 ml de soude normale.

— Une partie aliquote de la solution sodique est soumise à l'électrophorèse sur papier.

— Après séchage à l'air, les électrophorégrammes sont découpés en bandes perpendiculaires au sens de la migration ; ces bandes, situées au niveau de la fraction acides humiques gris et acides humiques bruns, sont incinérées au four et l'on dose l'aluminium et le fer contenus dans les liquides de minéralisation.

— Les acides humiques et fulviques du même échantillon de sol sont dosés dans un autre extrait au pyrophosphate 0,1 M. Il est donc possible de calculer les quantités de fer et d'aluminium associées à un poids donné de carbone des acides humiques à partir du dosage de Fe^{+++} et de Al^{+++} contenus dans les électrophorégrammes et du dosage quantitatif des acides humiques que renferme l'échantillon de sol.

B. — PROFILS ÉTUDIÉS

Ces déterminations ont porté sur tous les horizons de six profils caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique :

- P_2 et L_2 : profils situés en lande sèche (sol sableux des Landes).
- P_1 et L_1 : profils situés en lande humide (sol sableux des Landes).
- T_1 : profil développé sur le flysch crétacé (Ustaritz, Basses-Pyrénées).
- T_2 : profil développé sur les terrasses du Quaternaire ancien (Ogeu, Basses-Pyrénées).

Il convient de rappeler que les profils P_1 et P_2 déjà décrits par ailleurs sont situés à quelques mètres l'un de l'autre.

C. — RÉSULTATS OBTENUS (tabl. 22)

a) Sols sableux des Landes de Gascogne

— Les quantités d'aluminium associé aux acides humiques sont plus importantes que les quantités de fer associé à ces mêmes acides, excepté pour les horizons d'accumulation de l'un des deux profils de lande sèche où le taux de fer du carbone humique est supérieur à celui de l'aluminium.

— Le pourcentage d'aluminium lié aux acides humiques est très élevé dans les

horizons profonds, notamment dans le B₂ ; cette observation est également valable pour le fer, le degré d'association de ce dernier avec les acides humiques étant cependant moins important que celui de Al⁺⁺⁺.

TABLEAU 22

Quantités d'aluminium et de fer associés aux acides humiques dans quelques sols acides du Sud-Ouest atlantique

Profondeur (cm)	Profil	Horizon	En g de C p. 100 g de terre fine		$\frac{\Sigma A.F.}{\Sigma A.H.}$	En mg associés à 1 g de C humique		En % du métal lié aux acides humiques			
			acides humiques	acides fulviques		Al ⁺⁺⁺ des ac. hum.	Fe ⁺⁺⁺ des ac. hum.	Al ⁺⁺⁺ des acides hum.		Fe ⁺⁺⁺ des acides hum.	
								bruns	gris	bruns	gris
0-20	P ₁	A ₀	1,028	0,581	0,6	8,6	2,7	18	82	29	71
20-38		A ₁	1,581	0,708	0,6	6,6	4,1	19	81	29	71
38-56		B ₁	0,259	0,424	1,6	98,0	63,0	30	70	9	91
56-85		B ₂	0,038	0,152	4,0	850,0	37,0	4	96	19	71
0-2	L ₁	A ₀	0,915	0,405	0,5	3,1	6,3	26	74	34	66
2-20		A ₁	0,896	0,271	0,3	3,9	0,0	34	66	0	0
20-40		A ₁ /B ₁	0,688	0,388	0,6	10,2	0,0	18	82	0	0
40-55		B ₁	0,291	0,219	0,8	67,0	9,2	5	95	0	100
55-80		B ₂	0,034	0,054	1,6	240,0	31,7	11	89	0	100
0-13	P ₂	A ₀	0,399	0,147	0,4	6,0	0,0	33	67	0	0
13-30		A ₁	0,549	0,114	0,2	4,5	0,0	55	45	0	0
30-56		A ₂	0,122	0,077	0,6	50,0	0,0	37	63	0	0
36-75		B ₁	0,261	0,868	3,3	16,8	5,1	0	100	0	100
75-150		B ₂	0,027	0,115	5,4	78,0	0,0	0	100	0	0
0-2	L ₂	A ₀	0,313	0,284	0,9	6,1	5,1	42	58	100	0
2-6		A ₂	0,056	0,074	1,3	10,8	32,5	0	100	0	100
6-12		B'	0,026	0,098	3,7	255	98	12	88	0	100
12-35		B''	0,028	0,108	3,6	712	970	0	100	12	88
35-70		B'''	0,043	0,087	2,0	270	205	0	100	0	100
2-20	T ₁	A ₁₁	0,449	0,772	1,7	153	373	0	100	2	98
20-50		A ₁₂	0,330	0,480	1,5	305	500	0	100	3	97
50-150		C	0,108	0,183	1,7	550	1 760	0	100	5	95
2-20	T ₂	A ₁₁	1,691	1,022	0,6	9,5	9,5	10	90	0	100
20-40		A ₁₂	1,559	0,880	0,6	20,8	13,4	6	94	0	100
40-80		A ₁₃	1,248	0,504	0,4	66,0	23,0	0	100	0	100
80-120		C	0,203	0,186	0,9	580,0	740,0	0	100	0	100

A.H. = acides humiques ; A.F. = acides fulviques.

— D'une manière générale, les pourcentages de Al⁺⁺⁺ ou de Fe⁺⁺⁺ liés aux acides humiques gris sont beaucoup plus élevés que ceux liés aux acides humiques bruns. Dans les horizons d'accumulation, près de 100 p. 100 de Al⁺⁺⁺ ou de Fe⁺⁺⁺ associés sont liés à la fraction grise.

b) *Sols de touyas*

(sols du flysch et sols des terrasses anciennes du Quaternaire).

Les quantités d'aluminium et de fer retrouvées dans les électrophorégrammes sont beaucoup plus élevées que dans le cas des sols sableux des Landes de Gascogne. Pour le profil développé sur flysch, les taux de fer associé aux acides humiques sont beaucoup plus importants que les taux d'aluminium lié à ces mêmes acides. En ce qui concerne le profil développé sur les terrasses anciennes, le taux d'aluminium associé aux acides humiques est plus important que celui du fer dans les horizons de surface. Dans l'horizon 80-120 cm, le taux de fer redevient supérieur à celui de l'aluminium.

Comme pour les sols des Landes, on peut noter là encore qu'il existe un certain parallélisme entre l'importance du rapport $\frac{\text{acides fulviques}}{\text{acides humiques}}$ et celle des taux de Fe^{+++} et de Al^{+++} associés aux colloïdes organiques. De même, et beaucoup plus nettement encore que pour les sols sableux, la quasi-totalité des deux métaux est retrouvée dans la fraction acides humiques gris.

D. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

a) *Sols sableux des Landes de Gascogne*

L'augmentation de la quantité de Al^{+++} lié aux colloïdes humiques dans les horizons d'accumulation a déjà été signalée, en particulier par DUCHAUFOR (1964) qui a montré que, dans le cas de sols formés sur grès, c'est-à-dire sur roches peu alumineuses, la polymérisation et l'insolubilisation des complexes organo-métalliques contenant de l'aluminium intervenaient surtout au niveau des horizons B_2 .

Le parallélisme assez étroit qui existe entre les rapports $\frac{\text{acides fulviques}}{\text{acides humiques}}$ et les taux de Al^{+++} lié au carbone humifié confirme, comme l'ont déjà signalé plusieurs auteurs (D'YAKANOVA, 1962 ; PONOMAREVA, 1962 ; TITOVA, 1962 ; DUCHAUFOR, 1963-1964), que la fraction fulvique est vraisemblablement la plus réactive vis-à-vis des composés métalliques et que c'est cette fraction qui est responsable en premier lieu de l'entraînement en profondeur de ces composés.

b) *Sols de touyas*

Ce qui retient plus particulièrement l'attention, dans le cas de ces deux profils, est l'importance de la fraction minérale liée aux colloïdes humiques. Dans les horizons profonds, on note en effet des quantités de fer ou d'aluminium associées à 1 mg de carbone humifié de l'ordre de 500 à 800 mg, la majorité de Al^{+++} ou de Fe^{+++} engagés dans ces associations se trouvant dans la fraction acides humides gris.

Compte tenu du taux important de colloïdes minéraux que renferment ces sols, on peut se demander si Al^{+++} ou Fe^{+++} trouvés dans les électrophorégrammes sont réellement liés aux acides humiques ou s'ils traduisent l'existence d'impuretés minérales que l'on disperse au cours de l'extraction par le pyrophosphate 0,1 M et que l'on ne

peut séparer de la fraction organique, en raison de leurs très petites dimensions. Cette observation peut être également valable pour les horizons illuviaux des profils développés dans les sols sableux des Landes de Gascogne, horizons dans lesquels on a d'ailleurs pu mettre en évidence l'existence de très fines particules de quartz qui sont libérées au cours de l'extraction de la fraction humique la plus polymérisée (JUSTE et DUREAU, 1964).

c) *Origine de certains composés du fer et de l'aluminium
contenus dans les électrophorogrammes d'acides humiques*

L'application de la technique de l'absorption dans l'infrarouge à l'étude de la structure des acides humiques n'a pas, jusqu'à présent, toujours fourni les résultats auxquels on aurait pu s'attendre ; on retrouve en effet, quelle que soit l'origine de l'acide humique considéré, presque toujours les mêmes bandes : hydroxyyles organiques associés par des liaisons hydrogène dans la région $3\ 200$ à $3\ 400\text{ cm}^{-1}$, vibrations des C—H aliphatiques vers $2\ 900\text{ cm}^{-1}$, vibrations des carbonyles à $1\ 720\text{ cm}^{-1}$, vibrations correspondant aux déformations dans le plan des noyaux aromatiques condensés constituant le *nucleus* des acides humiques vers $1\ 620\text{ cm}^{-1}$, vibrations C—O—H des groupements carboxyliques non ionisés vers $1\ 220\text{ cm}^{-1}$. Par contre, cette technique d'identification permet de déceler dans les extraits humiques la présence de certains composés minéraux qui peuvent donner lieu à une absorption intense et bien localisée dans ce domaine spectral.

L'examen en infrarouge des acides humiques d'un profil complet peut donc fournir des renseignements utiles sur la nature des composés minéraux que renferment ces acides. On a donc extrait les acides humiques des horizons des deux profils P₁ et P₂ développés dans les sols sableux des Landes, à l'aide d'une solution de pyrophosphate 0,1 M : après précipitation et lavage à l'eau, l'extrait humique a été séché à l'étuve à 60° C durant 48 heures, puis examiné sous forme de pastille de KBr (1 mg pour 100 mg de KBr), à l'aide d'un appareil à optique de NaCl. (fig. 7 et 8).

Pour les horizons de surface, les spectres obtenus présentent les bandes caractéristiques des acides humiques. Cependant, on note à $1\ 030\text{ cm}^{-1}$, à $1\ 080$ et 910 cm^{-1} , la présence de pics peu accentués dénotant l'existence, à faible concentration, de substances minérales silicatées.

Ces pics s'accroissent fortement pour les horizons illuviaux pour lesquels apparaissent, en outre, les bandes du quartz (690 , 780 , 800 , $1\ 080\text{ cm}^{-1}$). Pour ces horizons profonds, on note également la présence d'une bande située vers $3\ 630\text{ cm}^{-1}$ attribuable aux vibrations de valence des hydroxyyles libres de la fraction minérale ; parallèlement à l'apparition de ces bandes, le pic situé à $1\ 720\text{ cm}^{-1}$ (pic dû aux vibrations de valence des groupements carbonyles) s'estompe, tandis que la bande de $1\ 610/1\ 620\text{ cm}^{-1}$ glisse vers des fréquences plus élevées, de l'ordre de grandeur de la fréquence correspondant aux vibrations de déformation de l'eau liée.

En définitive, il apparaît donc que, lorsque l'on s'adresse à des horizons de profondeur croissante, on assiste à une superposition progressive du spectre des substances minérales à celui des acides humiques, ce qui témoigne de l'enrichissement croissant de ces derniers en éléments minéraux dans les horizons illuviaux ; ces observations confirment donc les résultats du dosage chimique de Fe⁺⁺⁺ et de Al⁺⁺⁺ qui montrent

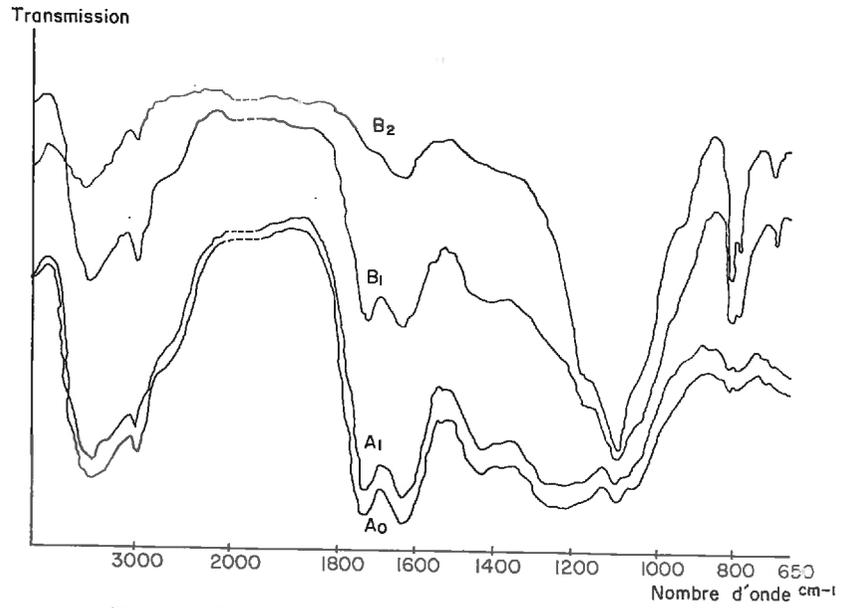


FIG. 7. — Spectres d'absorption dans l'infrarouge des acides humiques extraits des différents horizons d'un profil développé en lande sèche

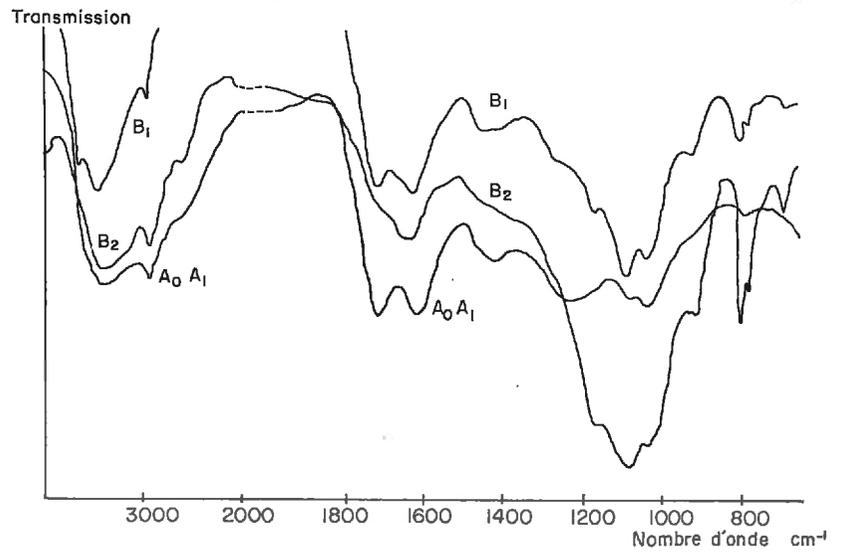


FIG. 8. — Spectres d'absorption dans l'infrarouge des acides humiques extraits des différents horizons d'un profil développé en lande humide

que la quantité de ces éléments associés au carbone humifié va en augmentant, comme nous l'avons vu, avec la profondeur.

La présence de bandes à 1030 cm^{-1} , 910 cm^{-1} et 3630 cm^{-1} tendrait à prouver qu'il existe des silicates d'alumine bien cristallisés inclus dans la fraction humique ; il n'est pas possible, compte tenu du très faible pouvoir de résolution de l'optique utilisée dans le domaine des 3000 cm^{-1} de localiser avec précision la position de la bande des OH libres et, en conséquence, d'identifier les minéraux argileux qui donnent lieu à cette absorption.

Quoi qu'il en soit, on est bien obligé d'admettre que des particules argileuses sont déposées, en même temps que les acides humiques, sur les électrophorogrammes. Dans ces conditions, on peut supposer que l'aluminium et le fer que contiennent ces électrophorogrammes peuvent avoir différentes origines :

— Al^{+++} et Fe^{+++} effectivement liés aux acides humiques (notamment aux acides humiques gris) sous forme de complexes organo-métalliques qui n'auraient aucun lien avec les impuretés minérales silicatées qui les accompagnent ;

— Al^{+++} et Fe^{+++} provenant des enduits de recouvrement entourant les particules argileuses déposées sur l'électrophorogramme et n'ayant aucun lien avec les acides humiques ;

— Al^{+++} et Fe^{+++} liés à la fois à l'argile et aux acides humiques et jouant en quelque sorte le rôle de ponts, ces liaisons étant suffisamment fortes pour résister à l'action du réactif d'extraction.

Pour tenter de préciser ce point, l'expérience suivante a été réalisée : on a extrait par du pyrophosphate $0,1\text{ M}$ les acides humiques d'un échantillon de sol de touyas bien pourvu en colloïdes minéraux (fraction granulométrique inférieure à $2\ \mu$ de l'ordre de 30 p. 100 environ) ; l'argile de l'extrait humique a été floculée par addition d'un électrolyte et, au bout de quatre heures de sédimentation, on a centrifugé deux parties aliquotes du surnageant : une partie a été centrifugée à 4 000 tours/minute

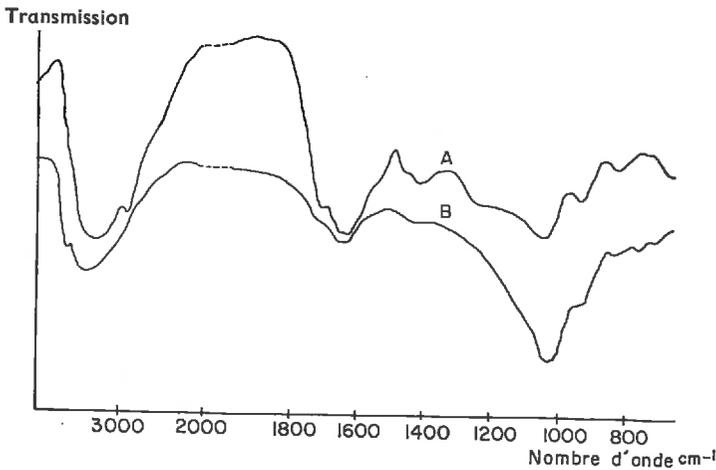


FIG. 9. — Influence de la vitesse de centrifugation d'un extrait humique de sol (pyrophosphate $0,1\text{ M}$) sur le spectre d'absorption dans l'infrarouge de l'acide humique préparé à partir de cet extrait

A : Extrait humique centrifugé à 30 000 t/mn (teneur en cendres : 39,5 p. 100)

B : Extrait humique centrifugé à 4 000 t/mn (teneur en cendres : 76,4 p. 100)

pendant 5 minutes et l'autre a été centrifugée à 30 000 tours minute à l'ultra-centrifugeuse.

Les surnageants ont été précipités par HCl et les acides humiques ainsi obtenus ont été soumis d'une part à l'électrophorèse sur papier et d'autre part à un examen en spectroscopie infrarouge. Dans les électrophorégrammes obtenus, on a procédé en outre au dosage du fer et de l'aluminium contenus dans la fraction acides humiques gris ; enfin, on a dosé le carbone dans des parties aliquotes des extraits humiques centrifugés à différentes vitesses avant la précipitation par HCl.

Le spectre infrarouge (fig. 9) de l'extrait humique préalablement centrifugé à 4 000 tours minute est assez voisin de celui d'une argile : on note seulement la présence d'un léger épaulement vers 1720 cm^{-1} dénotant l'existence des fonctions carbonyles. L'échantillon centrifugé à très grande vitesse fournit, par contre, un spectre très voisin de celui des acides humiques purs : on retrouve en effet les bandes à 2900 cm^{-1} , 1720 cm^{-1} et 1220 cm^{-1} caractéristiques de ces derniers ; en outre, les bandes des silicates (notamment celle située à 1030 cm^{-1}) sont beaucoup moins intenses, la bande correspondant aux vibrations de valence des hydroxyyles libres disparaissant même totalement. Ceci montre donc que l'extrait humique centrifugé à très grande vitesse est beaucoup moins riche en particules argileuses que ne l'est celui centrifugé à plus faible vitesse, ce qui se traduit d'ailleurs par des teneurs en cendres des composés humiques nettement différentes.

TABLEAU 23

*Quantités de Al^{+++} et de Fe^{+++} retrouvées
au niveau de la dépose d'électrophorégrammes d'acides humiques
préparés à partir d'extraits humiques centrifugés à différentes vitesses*

Vitesse de centrifugation de l'extrait humique (tours/minute)	Fe^{+++} retrouvé à la dépose (en μg)	Al^{+++} retrouvé à la dépose (en μg)	Carbone contenu dans 50 ml de l'extrait humique (en mg)
4 000	127	50	23,3
30 000	68	16	18,9

Les électrophorégrammes des extraits centrifugés à 4 000 tours/minute présentent, au niveau de la dépose, une tache jaune brun qui n'existe pas pour les extraits centrifugés à très grande vitesse. On constate également que les quantités de fer et d'aluminium retrouvées au niveau des gris dans les électrophorégrammes diminuent fortement après centrifugation à très grande vitesse (tabl. 23).

Ces observations pourraient permettre de conclure qu'une bonne part de Fe^{+++} et de Al^{+++} dosés dans la fraction acides humiques gris des électrophorégrammes n'est peut-être pas associée aux acides humiques mais plutôt associée à l'argile sous forme d'enduits de recouvrement. Cependant, le dosage du carbone effectué dans les extraits humiques indique que l'extrait centrifugé à grande vitesse est moins

riche en cet élément que celui centrifugé à plus grande vitesse. Par conséquent, si l'ultra-centrifugation a permis d'éliminer une plus forte quantité d'argile elle a, du même coup, favorisé l'élimination d'une partie des composés humiques de l'extrait, lesquels étaient liés à cette argile vraisemblablement par des ponts Al^{+++} ou Fe^{+++} , ce type de liaison étant suffisamment stable pour résister à l'action du pyrophosphate 0,1 M. On peut concevoir que ces associations dominent dans les horizons inférieurs qui sont généralement plus riches en argiles ou en sesquioxydes que les horizons de surface, ce qui expliquerait l'augmentation de la quantité de Fe^{+++} ou de Al^{+++} associée aux acides humiques quand on s'adresse à des horizons de profondeur croissante.

La question reste cependant posée de savoir si Al^{+++} et Fe^{+++} , qui jouent le rôle de ponts entre particules argileuses et acides humiques, se sont fixés sur ces particules en même temps que les acides humiques qui les transportaient ou s'ils étaient déjà associés à l'argile avant que les acides humiques ne viennent s'y adsorber au cours de leur migration.

En d'autres termes, il est donc difficile de conclure que l'aluminium et le fer dosés dans la fraction grise des électrophorégrammes ont bien été véhiculés par les acides humiques auxquels ils sont actuellement associés.

E. — CONCLUSION

La détermination des quantités d'aluminium associé au carbone humifié des sols acides du Sud-Ouest atlantique montre que, d'une manière générale, ces quantités augmentent avec la profondeur et que c'est surtout la fraction acides humiques gris qui est de loin la plus riche en cet élément.

La valeur particulièrement élevée des taux de Al^{+++} associé au carbone humifié dans le cas de sols riches en colloïdes minéraux (sols de touyas) peut s'expliquer d'une part par la présence d'associations très stables, colloïdes minéraux-colloïdes organiques, des composés du fer et de l'aluminium jouant le rôle de ponts entre les deux types de colloïdes et d'autre part par la présence d'impuretés minérales qui seraient libérées au cours de la dépolymérisation des composés humiques (MARTIN et REEVE, 1947 ; ALEXANDROVA, 1960).

Il est vraisemblable que la majorité des complexes organo-métalliques assurant le transport de Al^{+++} vers les horizons inférieurs de ces sols doivent se trouver dans la fraction fulvique, ce qui est en accord avec l'existence d'un parallélisme assez net entre la valeur du rapport. $\frac{\text{acides fulviques}}{\text{acides humiques}}$ et celle des taux de Al^{+++} associé au carbone humique.

Dans ces conditions, on peut se demander si l'on doit, tout au moins pour les horizons illuviaux des profils développés dans la zone sableuse des Landes, exclure la possibilité d'une néosynthèse de minéraux argileux, l'aluminium pouvant exister dans les complexes organo-métalliques qui parviennent à ces horizons dans un état de coordination favorable précisément à cette néosynthèse (BURROWS et WARK, 1928 ; SIFFERT, 1962).

4. Influence de la végétation sur la redistribution de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique

A. — RAPPORTS Al^{+++}/Fe^{+++} DANS LA VÉGÉTATION EN PLACE, DANS LES FRAGMENTS DE VÉGÉTAUX EN VOIE DE DÉCOMPOSITION ET DANS LES LITIÈRES

On a montré dans le chapitre 2 de la deuxième partie que la flore des sols acides du Sud-Ouest atlantique était susceptible de mobiliser l'aluminium et le fer, la mobilisation de l'aluminium étant beaucoup plus intense que celle du fer, et cela même pour des substrats où le taux de Fe^{+++} est supérieur à celui de Al^{+++} . Ces deux éléments qui sont extraits des zones profondes du profil reviennent donc à la surface de ce dernier inclus dans les débris végétaux et l'on devrait, en conséquence, s'attendre à un enrichissement des horizons de surface beaucoup plus marqué pour l'aluminium que pour le fer.

En fait si l'on examine le tableau 21, on constate au contraire que les rapports $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ des horizons supérieurs sont, en général, plus faibles que ceux des horizons sous-jacents, ce fait étant surtout vérifiable pour les profils développés sur le plateau continental landais.

L'examen du tableau 17 montre par ailleurs que le rapport $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ des litières est généralement beaucoup plus faible que celui du couvert végétal dont les débris assurent précisément l'alimentation de ces litières. Ce fait est particulièrement net pour la litière du profil 4 : cette dernière, bien individualisée et constituée essentiellement de Mousses et de pseudophylles de Pin maritime en cours de décomposition, pos-

TABLEAU 24

Teneur en aluminium et en fer de pseudophylles verts, de pseudophylles morts et de litière prélevés à la base de trois pins maritimes poussant sur des sols dunaires

(Moyenne de 3 répétitions)

		mg/kg de matière végétale séchée à 105°C		
		Al^{+++}	Fe^{+++}	Al^{+++}/Fe^{+++}
Arbre A	pseudophylles verts	276	32	8,7
	pseudophylles morts	288	49	5,9
	litières	648	800	0,8
Arbre B	pseudophylles verts	192	35	5,5
	pseudophylles morts	225	69	3,2
	litières	648	800	0,8
Arbre C	pseudophylles verts	308	47	6,5
	pseudophylles morts	220	68	3,2
	litières	648	820	0,8

sède un rapport Al^{+++}/Fe^{+++} de l'ordre de 1,3, alors que ce rapport varie de 2,6 à 8,1 dans les pseudophylles et les Mousses vivantes. De même, la litière du profil 3 où dominent des pseudophylles et des débris d'écorce de Pin maritime possède un rapport Al^{+++}/Fe^{+++} voisin de 0,9, alors que les pseudophylles non encore altérés qui l'alimentent ont un rapport variant de 6 à 8.

Ces observations tendraient donc à prouver que les débris végétaux retombant au sol paraissent s'appauvrir plus rapidement en aluminium qu'en fer ; une confirmation de ce phénomène est d'ailleurs donnée par le tableau 17, dans lequel on peut remarquer que les pseudophylles secs prélevés au sommet des litières ont en général, un rapport Al^{+++}/Fe^{+++} inférieur à celui des pseudophylles encore verts, même lorsque ces derniers sont âgés de 3 ou 4 ans, c'est-à-dire lorsqu'ils ont atteint leur âge maximum. À cet égard, le tableau 24 montre bien que l'on assiste à une diminution progressive du rapport Al^{+++}/Fe^{+++} quand on passe des pseudophylles verts aux pseudophylles morts tombés au sol, puis à la litière constituée uniquement par des pseudophylles en cours de décomposition.

Tous ces faits permettent donc d'émettre l'hypothèse selon laquelle le devenir de l'aluminium contenu dans les végétaux serait différent de celui du fer, le premier étant beaucoup plus facilement lessivé que le second.

B. — VARIATION DES TENEURS EN FER ET EN ALUMINIUM DES PSEUDOPHYLLES DE PIN MARITIME, AU COURS DE LEUR DÉCOMPOSITION A L'AIR LIBRE

Les pseudophylles de Pin maritime représentent l'essentiel des litières formées sur le plateau landais : l'évolution des teneurs en fer et en aluminium de ces fragments de végétaux, au cours de leur décomposition, peut donc fournir des renseignements qui permettront de mieux comprendre la dynamique de l'aluminium et du fer entrant dans la constitution des litières. A cet effet, le dispositif expérimental suivant a été mis en place :

— des pseudophylles frais âgés de 3 ans ont été prélevés sur des pins maritimes de la forêt domaniale de Biscarosse (sols squelettiques de dunes) ; ils ont été coupés en fragments de 2 à 3 cm et introduits dans des petits récipients en polystyrène disposés de telle manière qu'une contamination par le sol ne soit pas possible (voir schéma fig. 10). Chacun de ces récipients a reçu 10 g de matière végétale et l'ensemble du dispositif comprenant au total 15 récipients a été placé à l'air libre (début de la période hivernale), loin de tout couvert végétal. A intervalles de temps réguliers, on a prélevé 3 pots et l'on a déterminé, après séchage à 105°C, les teneurs en cendres, en aluminium et en fer des pseudophylles contenus dans ces pots, en les comparant chaque fois à celles des pseudophylles non altérés conservés au laboratoire. Les récipients étant conçus de manière à éviter toute contamination par le sol, les variations des taux de cendres, de Al^{+++} et de Fe^{+++} que l'on observe ne peuvent provenir que d'une modification de ces taux au cours de l'altération des fragments de végétaux, et non d'un enrichissement dû à un contact avec la fraction minérale du sol.

Les résultats sont donnés sous forme de graphique (fig. 11).

En cinq mois, la teneur en cendres de la matière sèche passe de 24 p. 1000 à 32 p. 1000 tandis que le taux de fer passe de 48 mg/kg à 132 mg/kg et celui de l'aluminium de 203 à 343 mg/kg. L'enrichissement apparent en Al^{+++} de la matière sèche, au cours

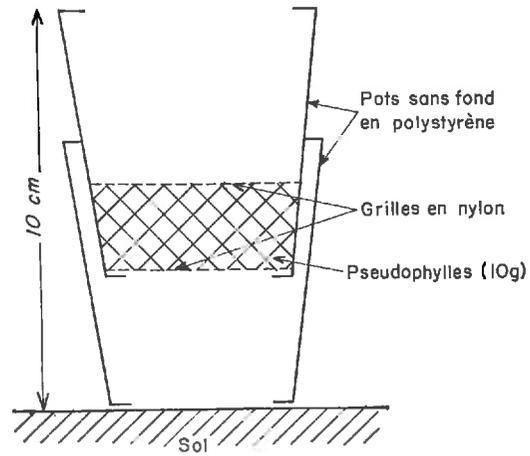


FIG. 10. — Dispositif expérimental utilisé pour suivre la décomposition à l'air libre de pseudophylles de *Pin maritime*

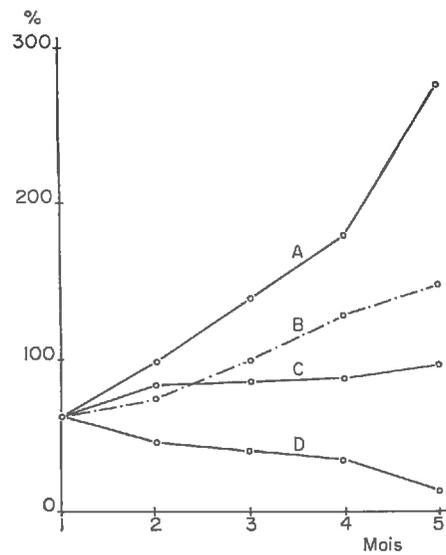


FIG. 11. — Variation des teneurs en cendres, en fer, en aluminium et des rapports Al^{+++}/Fe^{+++} de pseudophylles de *Pin maritime* au cours de leur décomposition à l'air libre

- A : Évolution de la teneur en fer (en p. 100 de la teneur initiale) ;
- B : Évolution de la teneur en aluminium (en p. 100 de la teneur initiale) ;
- C : Évolution de la teneur en cendres (en p. 100 de la teneur initiale) ;
- D : Évolution du rapport $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ (en p. 100 de la valeur initiale).

de la décomposition, est donc beaucoup plus faible que l'enrichissement en Fe^{+++} , ce qui se traduit évidemment par une diminution du rapport Al^{+++}/Fe^{+++} , lequel passe de 4,2 à 2,6. On peut calculer que, dans le même temps, la teneur en aluminium des cendres passe de 8,5 à 10,6 p. 1000, soit une augmentation de 25 p. 100, alors que la teneur en fer passe de 2 p. 1000 à 4 p. 1000, soit une augmentation de 100 p. 100.

Ces résultats confirment donc sans ambiguïté que les pseudophylles en voie de décomposition s'enrichissent moins vite en Al^{+++} qu'en Fe^{+++} , ce qui veut dire que l'aluminium est plus facilement lessivé de ces fragments végétaux par les eaux de pluie que le fer. Les variations des teneurs en Fe^{+++} et en Al^{+++} que l'on observe résultent en effet de la coexistence de plusieurs processus : il y a simultanément disparition de la matière végétale par fermentation ou par dissolution et entraînement par l'eau de pluie des substances organiques hydrosolubles, et dissolution et entraînement par cette même eau de pluie de certaines substances minérales, la vitesse d'élimination de ces dernières étant bien entendu fonction de leur nature.

SLOVIKOVSKI (1960) a montré que le bilan final se traduit, généralement mais pas toujours, par un gain de la teneur en cendres, ce qui ne signifie pas bien entendu qu'il y ait accumulation systématique de tous les éléments minéraux. La plupart des auteurs sont en effet d'accord sur le fait que les taux de Mg, K, Ca, P, S, diminuent au cours du vieillissement des litières, alors que ceux de Si, Fe, Al et Mn augmentent (LIVENS et VANSTALLEN, 1957 ; GRADUSOV, 1958 ; ROUSSEAU, 1959 ; LEVINA, 1960 ; SAMOÏLOVA, 1961 ; KARTASHOV, 1961 ; REMEZOV, 1961 ; MANAKOV, 1962 ; KARAYEVA, 1963 ; STEPANETS, 1963). MANAKOV, (1962) a, pour chaque élément, défini un coefficient d'accumulation en faisant le rapport de la concentration de cet élément dans une litière vieillie à la concentration de ce même élément dans une litière fraîche : des observations faites par ce même auteur, il ressort que le fer est l'élément dont l'accumulation est la plus marquée ; il est suivi par l'aluminium et par la silice (coefficients d'accumulation $Fe = 5,3$; $Al = 3,5$; $Si = 1,3$). Les résultats obtenus dans le cas des pseudophylles de Pin maritime sont donc en accord avec les conclusions de cet auteur.

C. — COMPARAISON DE LA SOLUBILITÉ DANS L'EAU DES COMPOSÉS DU FER ET DE L'ALUMINIUM CONTENUS DANS DES PSEUDOPHYLLES DE PIN MARITIME

L'accumulation différente du fer et de l'aluminium dans les pseudophylles de Pin maritime en voie de décomposition peut s'expliquer par un degré de lessivage différent de ces éléments par les eaux de pluie. L'expérience décrite ci-dessous a pour but de préciser les possibilités de solubilisation par l'eau du fer et de l'aluminium inclus dans les pseudophylles. La même expérience a été réalisée avec des fragments d'autres végétaux, notamment des Mousses prélevées en lande sèche et des feuilles d'*Erica scoparia* prélevées en lande humide, dans le but de vérifier si le phénomène observé dans le cas des pseudophylles se manifeste également pour d'autres végétaux

a) Technique utilisée

Les fragments de végétaux (pseudophylles de Pin maritime de même âge prélevés sur un même arbre — feuilles d'*Erica scoparia* — mousse fraîche *Schreberii*)

ont été séchés 12 heures à 105°C, puis broyés au mixer; la poudre végétale a été une nouvelle fois séchée à 105°C durant 12 heures, puis conservée dans un dessiccateur.

— 2,5 g de la poudre ainsi obtenue sont placés dans un tube de centrifugeuse de 100 ml dans lequel on ajoute 50 ml d'eau distillée. On agite à l'agitateur rotatif pendant 1 heure et l'on centrifuge à 4 000 tours/minute pendant 5 minutes; le surnageant est filtré sur filtre très lent et le culot de centrifugation est agité à nouveau en présence de 50 ml d'eau distillée pendant le même temps; le deuxième surnageant obtenu est joint au premier après centrifugation et filtration. Le culot ainsi épuisé par l'eau est séché à 105°C jusqu'à poids constant ainsi qu'une fraction de la poudre végétale initiale destinée à servir de témoin. Dans la poudre témoin et dans la poudre épuisée par l'eau, on détermine, après minéralisation au four, la teneur en cendres et les teneurs en aluminium et en fer. On détermine également les teneurs en Al^{+++} et en Fe^{+++} du surnageant; une partie aliquote de ce dernier est concentrée sous vide à l'évaporateur rotatif et l'on dose Al^{+++} et Fe^{+++} dans le résidu d'évaporation minéralisé au four.

En résumé, on effectue donc les déterminations suivantes :

- teneurs en cendres, en Al^{+++} et en Fe^{+++} de la poudre végétale témoin,
 - teneurs en cendres, en Al^{+++} et en Fe^{+++} de la poudre végétale épuisée par l'eau,
 - teneurs en fer et en aluminium de l'extrait aqueux,
 - teneurs en fer et en aluminium de l'extrait aqueux minéralisé.
- On mesure, en outre, le pH de cet extrait aqueux.
Toutes ces déterminations comportent 3 répétitions.

b) Résultats obtenus (tableaux 25 et 26)

— pH de l'extrait aqueux : ce sont les extraits aqueux de pseudophylles de Pin maritime qui ont le pH le plus faible (4,1),

TABLEAU 25

Solubilité dans l'eau des cendres, de l'aluminium et du fer
d'une poudre végétale préalablement desséchée à 105° C
(Moyenne de trois répétitions)

Végétaux	Poudre végétale témoin					Poudre végétale épuisée par l'eau				Variation en % par rapport à la poudre végétale témoin		
	pH du filtrat	Teneur en cendres ‰	mg/kg de poudre			Teneur en cendres ‰	mg/kg de poudre					
			Al^{+++}	Fe^{+++}	$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$		Al^{+++}	Fe^{+++}	$\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$	Cendres	Al^{+++}	Fe^{+++}
<i>Erica scoparia</i>	4,8	23	85	77	1,1	15	61	73	0,8	— 35	— 28	— 5
Mousses	5,4	40	185	150	1,2	31	221	164	1,3	— 23	+ 19	+ 9
Pseudophylles de Pin maritime ...	4,1	28	150	33	4,5	17	81	35	2,7	— 42	— 46	+ 3

— *teneurs en cendres des culots de centrifugation* : ce sont les pseudophylles de Pin maritime qui donnent lieu à l'appauvrissement le plus intense ; ils sont suivis par *Erica scoparia* et par les Mousses.

TABLEAU 26

Concentration en aluminium d'extraits aqueux minéralisés ou non minéralisés de différents végétaux

(les résultats sont exprimés en mg d'aluminium par kg de matière sèche à partir de laquelle a été réalisé l'extrait aqueux)
(Moyennes de 3 répétitions)

Végétaux	Teneur en aluminium de l'extrait (en mg/kg de matière séchée à 150°C)	
	non minéralisé	minéralisé
<i>Erica scoparia</i>	1,0	11,0
Mousses	2,0	8,0
Pseudophylles de Pin maritime ..	10,0	54,0

— *teneurs en aluminium et en fer des culots de centrifugation* : ce sont surtout les pseudophylles de Pin maritime qui donnent lieu à l'épuisement le plus marqué en aluminium (46 p. 100), suivis par les feuilles d'*Erica scoparia* (28 p. 100) ; pour les Mousses, par contre, on assiste à une augmentation apparente de la teneur en Al^{+++} à la suite des deux extractions successives par l'eau.

Pour tous les fragments de végétaux considérés, il n'y a pas de variation du taux de fer à la suite du traitement par l'eau, si ce n'est une légère augmentation dans le cas des Mousses.

Il en résulte que pour *Erica scoparia*, comme pour les pseudophylles de Pin maritime, on note une diminution très nette du rapport Al^{+++}/Fe^{+++} à la suite de l'épuisement par l'eau, alors que la variation de ce rapport est négligeable pour les Mousses.

— *teneurs en aluminium et en fer des extraits aqueux* : les quantités d'aluminium trouvées dans les filtrats minéralisés sont toujours supérieures à celles trouvées dans les filtrats non minéralisés. On ne retrouve pas de fer dans les extraits aqueux.

c) Discussion des résultats et conclusion

Le pH faible des extraits aqueux des pseudophylles de Pin maritime résulte vraisemblablement de la teneur élevée de ces extraits en acides organiques (MUIR et al., 1964) et de leur faible contenu en bases. L'acidité marquée de ces extraits est une des raisons qui permettent d'expliquer d'une part le pH généralement très faible des litières où dominent les pseudophylles de Pin maritime et, d'autre part, l'action dégradante bien connue exercée par ces litières sur le substrat.

L'importance du pourcentage d'aluminium qui passe en solution dans l'eau,

dans le cas des pseudophylles de Pin maritime, et l'absence de mobilité du fer constituent une confirmation des résultats obtenus précédemment concernant la variation du rapport Al^{+++}/Fe^{+++} au cours de la décomposition à l'air libre de ces pseudophylles. Les feuilles d'*Erica scoparia* se comportent, d'une manière un peu moins accusée cependant, de la même façon ; pour les Mousses, par contre, on assiste à une augmentation significative des taux de Al^{+++} et de Fe^{+++} de la fraction végétale à la suite de l'extraction par l'eau. Il est vraisemblable que, dans ce cas, la mise en suspension de la matière végétale s'accompagne de celle de fines particules de quartz, qui étaient incluses dans le végétal à l'état d'impuretés ; ces particules sont éliminées lors de la décantation des surnageants, ce qui fait que les culots de centrifugation sont finalement plus riches en matière végétale que ne l'était la poudre initiale, d'où l'accroissement apparent observé des teneurs en Al^{+++} et en Fe^{+++} , accroissement qui se manifeste surtout pour les Mousses dont les chances de contamination par la fraction minérale du sol sont évidemment beaucoup plus importantes que pour les autres végétaux.

Le fait que les quantités d'aluminium trouvées après minéralisation des filtrats soient plus importantes que celles trouvées avant minéralisation permet de supposer que cet aluminium se trouve dans l'extrait aqueux, non pas à l'état ionique mais engagé dans des complexes organo-métalliques qui sont détruits au cours de la minéralisation au four.

D. — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE SÉCHAGE DE LA MATIÈRE
VÉGÉTALE SUR LA SOLUBILITÉ DANS L'EAU DE L'ALUMINIUM
CONTENU DANS DES PSEUDOPHYLLES DE PIN MARITIME

On peut penser que le séchage des poudres végétales à des températures relativement élevées est susceptible d'entraîner une modification des substances qui sont responsables du maintien en solution de l'aluminium des pseudophylles de Pin

TABLEAU 27

*Influence de la température de séchage de pseudophylles de Pin maritime
sur la solubilité dans l'eau de l'aluminium contenu dans ces pseudophylles
(Moyennes de 3 répétitions)*

Température de séchage des pseudophylles	Teneur en Al^{+++} (en mg/kg de matière végétale séchée à 105°C)		Variation de la teneur de Al^{+++} (en % par rapport à la poudre végétale non épuisée par l'eau)	
	Poudre végétale témoin	Poudre végétale épuisée par l'eau		
Poudre végétale séchée à 30° C	échantillon A	287	169	41
	échantillon B	180	95	44
Poudre végétale séchée à 105° C	échantillon A	304	181	41
	échantillon B	184	101	45

maritime. Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, on a procédé à une expérience de traitement par l'eau en tous points identiques à celle décrite plus haut, la poudre végétale ayant été séchée : à 30°C, durant 12 heures, dans un cas et à 105°C dans l'autre. Deux échantillons de pseudophylles d'origine différente ont donné lieu à cet essai.

Les résultats qui figurent dans le tableau 27 indiquent que la température de séchage du matériel végétal n'exerce aucune influence sur la mobilité de l'aluminium contenu dans ce matériel, le pourcentage de cet élément qui passe en solution dans l'eau étant le même pour les deux températures de séchage considérées.

E. — NATURE DES SUBSTANCES ORGANIQUES ASSOCIÉES A L'ALUMINIUM DANS LES EXTRAITS AQUEUX DE PSEUDOPHYLLES DE PIN MARITIME

D'après les résultats figurant dans le tableau 26, il ressort que l'on retrouve toujours plus d'aluminium dans les extraits aqueux minéralisés de pseudophylles de pins que dans ceux qui n'ont pas été minéralisés. Cela peut signifier : soit que l'aluminium se trouve dans ces extraits aqueux, engagé dans des complexes organo-métalliques plus stables que ceux qu'il forme avec l'ériochrome cyanine ou alors qu'il est encore intégré dans de fines particules végétales en suspension dans l'extrait aqueux. L'expérience suivante démontre qu'il s'agit bien d'un masquage de Al^{+++} par formation de complexe.

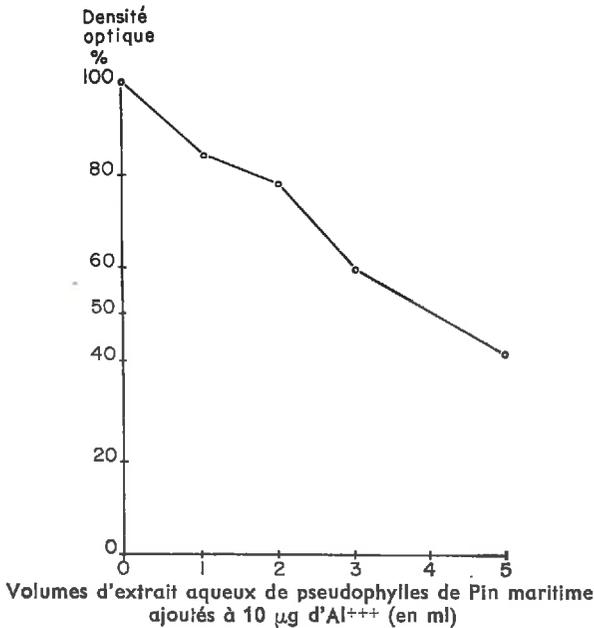


FIG. 12. — Influence de l'addition de quantités croissantes d'extrait aqueux de pseudophylles de Pin maritime sur la variation de la densité optique d'une solution d'ériochrome cyanine contenant 10 µg Al^{+++} /150 ml (Les densités optiques sont exprimées en p. 100 de la densité optique de la solution d'aluminium non enrichie en extrait aqueux de pseudophylles de Pin maritime).

Dans une série de fioles de 50 ml contenant chacune 10 μg d'aluminium, on ajoute des doses croissantes (1, 2, 3, 5 ml) d'un extrait aqueux d'une poudre de pseudophylles de Pin maritime préalablement desséchée à 60°C (2,5 g de poudre agitée dans 100 ml d'eau distillée pendant 2 heures). On complète ces fioles avec les réactifs utilisés pour le dosage de l'aluminium et l'on effectue la colorimétrie en utilisant chaque fois comme solution de référence une solution comprenant le même volume d'extrait aqueux mais pas d'aluminium. On assiste (fig. 12) à une diminution progressive de la densité optique quand on augmente les volumes d'extrait aqueux en contact avec les 10 μg de Al^{+++} , ce qui prouve bien qu'il y a complexage du métal par l'extrait aqueux.

Le problème se pose donc de savoir quelles sont les substances ou le groupe de substances hydrosolubles contenues dans les pseudophylles de pins qui sont responsables du maintien en solution de l'aluminium.

a) Technique utilisée

Cinq grammes de poudre de pseudophylles desséchée à 60°C sont agités pendant 1 heure avec 100 ml d'eau distillée ; on centrifuge ensuite pendant 5 minutes la suspension (4 000 tours/minute) et l'on filtre le surnageant.

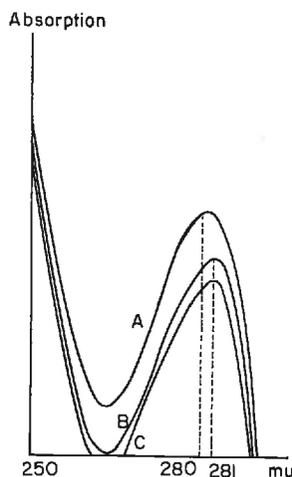


FIG. 13. — Spectres d'absorption dans l'ultraviolet d'extrait aqueux de pseudophylles de Pin maritime enrichis ou non en aluminium

- A : extrait aqueux enrichi en aluminium ;
- B : extrait aqueux acidifié par HCl ;
- C : extrait aqueux.

Dans une partie aliquote (5 ml) de ce dernier, diluée au cinquième, on ajoute 1 000 μg d'aluminium sous forme de chlorure et l'on enregistre les spectres ultraviolets, d'une part de l'extrait dilué et enrichi en Al^{+++} et d'autre part de l'extrait dilué non enrichi en aluminium (fig. 13).

Dans une autre partie aliquote (5 ml) du surnageant, on ajoute également 1 000 μg d'aluminium ; la solution est ensuite concentrée sous vide jusqu'à un volume de 2,5 ml. On procède ensuite à l'électrophorèse sur papier (7 volts/cm — 3 heures —

tampon boraté de COULSON) de 50 μ l de la solution concentrée obtenue. Simultanément, on procède à l'électrophorèse de 50 μ l d'une solution de 2,5 ml provenant de la concentration sous vide de 50 ml d'un extrait aqueux de pseudophylles de pins non enrichi en Al^{+++} .

Les bandes sont examinées, après séchage, à la lumière de Wood puis on révèle à l'aide d'une solution aqueuse contenant les réactifs de la colorimétrie de l'aluminium (ériochromecyanine et tampon acétate d'ammonium à pH 6).

b) Résultats obtenus et discussion

Spectres ultraviolets.

L'extrait aqueux dilué présente un maximum d'absorption très accusé à 2810 Å, ce maximum se déplace à 2800 Å dans le cas de l'extrait aqueux dilué enrichi en aluminium. Ce déplacement du maximum ne résulte pas d'une modification du pH de l'extrait, consécutive à l'introduction du chlorure d'aluminium puisque, si l'on ajoute de l'acide chlorhydrique en excès dans l'extrait témoin, il n'y a pas de modification du spectre (fig. 13). L'effet hypsochrome que l'on observe à la suite de l'introduction de l'aluminium traduit donc bien la formation d'un complexe entre ce métal et le groupe de substances ou la substance dont le maximum d'absorption se situe à 2810 Å. Ces substances correspondent vraisemblablement à des polyphénols ou à des acides phénols ; parmi ceux-ci, on peut signaler que la coumarine et l'acide para-coumarique possèdent en solution aqueuse des maxima d'absorption se situant dans cette zone (2850 Å pour l'acide *para*-coumarique et 2790 Å pour la coumarine).

Examen des électrophorégrammes en lumière naturelle et en lumière ultraviolette.

Les électrophorégrammes sur lesquels on a déposé les extraits aqueux concentrés sans aluminium présentent une tache jaune diffuse s'étalant dans la zone anodique de la bande de papier. Les électrophorégrammes correspondant aux extraits enrichis en Al^{+++} possèdent une tache identique mais entièrement localisée, dans ce cas-là, au niveau de la dépose. Ces taches correspondent sans doute à la présence de pigments colorés dont la mobilité s'atténue fortement en présence d'aluminium.

Aussi bien pour les extraits enrichis en Al^{+++} que pour ceux qui ne l'ont pas été, les électrophorégrammes examinés en UV donnent lieu à une fluorescence d'un bleu lumineux très accentué dans une zone se situant environ à 4-5 cm de la dépose, dans la partie anodique de la bande de papier ; cette fluorescence est comparable à celle que l'on obtient lorsque l'on soumet à l'électrophorèse une solution aqueuse d'acide para-coumarique, l'acide ortho-coumarique donnant lieu dans les mêmes conditions à une fluorescence d'un vert intense.

Révélation des électrophorégrammes à l'ériochromecyanine et répartition de l'aluminium contenu dans ces électrophorégrammes.

Les électrophorégrammes d'extraits enrichis en Al^{+++} se colorent en violet intense, d'une part à la dépose et d'autre part dans la zone qui donne lieu à la fluorescence bleue. La détermination quantitative de l'aluminium contenu dans les différentes zones des électrophorégrammes minéralisés confirme ces résultats (tabl. 28).

L'électrophorégramme correspondant à l'extrait aqueux non enrichi en Al^{+++} ne

se colore pas tandis que celui correspondant à une solution aqueuse d'aluminium concentrée sous vide se colore en violet intense au niveau de la dépose et dans la zone anodique, l'intensité de la couleur décroissant cependant assez vite au fur et à mesure que l'on progresse dans cette zone ; ce déplacement vers l'anode d'une partie de l'aluminium déposé n'est pas surprenant, les conditions de pH du tampon (9,2) entraînant l'existence d'ions aluminates négativement chargés. Quoi qu'il en soit, le fait important à retenir est qu'en présence d'un extrait aqueux concentré de pseudophylles de pins il y a entraînement parallèle de l'aluminium et des substances qui donnent lieu à la fluorescence bleue. Il y a donc de fortes présomptions pour qu'il y ait formation d'un complexe négativement chargé entre ces substances et Al^{+++} .

TABLEAU 28

Répartition de l'aluminium dans l'électrophorégramme
d'un extrait aqueux de pseudophylles de *Pin maritime* enrichi en aluminium.

Partie de l'électrophorégramme	Al^{+++} (en μg par bandes de papier de 3 x 5 cm découpées perpendiculairement au sens de la migration)
Dépose	3,8
Zone comprise entre la dépose et la zone correspondant à la fluorescence bleue..	0,0
Zone correspondant à la fluorescence bleue	9,3

c) Conclusion

L'examen des spectres UV des extraits aqueux de pseudophylles de *Pin maritime* enrichis ou non en Al^{+++} et l'électrophorèse de ces mêmes extraits concentrés sous vide permet de conclure que l'aluminium existe dans ces extraits à l'état de complexes organo-métalliques solubles, la partie organique de ces complexes étant vraisemblablement constituée par des acides-phénols ; les résultats obtenus au cours de ces quelques expériences paraissent prouver que l'acide *para*-coumarique ou un dérivé de ce dernier joue un rôle prépondérant dans la formation de ces complexes.

F. — NATURE DES SUBSTANCES ORGANIQUES ASSOCIÉES A L'ALUMINIUM DANS DES EXTRAITS AQUEUX D' « ERICA SCOPARIA »

a) Technique utilisée

Elle est strictement la même que celle mise en œuvre dans le cas des pseudophylles de *Pin maritime* (§ E. a.).

b) Résultats obtenus et discussion

Spectres ultraviolets.

L'extrait aqueux ne possède pas de maximum d'absorption et donne lieu à une absorption continue.

Examen des électrophorégrammes en lumière naturelle et en lumière ultraviolette.

Les électrophorégrammes correspondant aux extraits aqueux enrichis en aluminium présentent une tache jaune paille diffuse, située à environ 5 cm de la dépose (zone anodique) ; une autre tache, de teinte brune, est observée à 10 cm de la dépose (zone anodique). Pour les électrophorégrammes correspondant aux extraits aqueux enrichis en Al^{+++} , la tache jaune est localisée au niveau de la dépose alors que la tache brune occupe la même position.

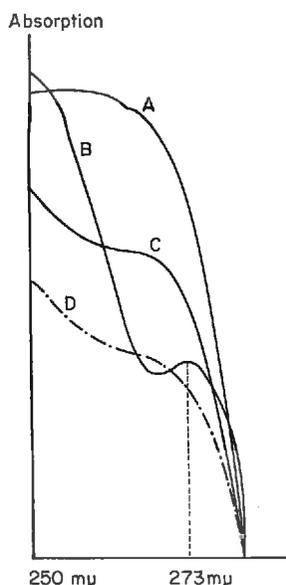


FIG. 14. — Spectres d'absorption dans l'ultraviolet d'éluats de l'électrophorégramme d'un extrait aqueux concentré d'*Erica scoparia*

- A : Éluat de la zone de l'électrophorégramme correspondant à la dépose ;
- B : Éluat de la zone de l'électrophorégramme correspondant à la fluorescence verte ;
- C : Éluat de la zone de l'électrophorégramme correspondant à la fluorescence rose saumon ;
- D : Éluat de la zone de l'électrophorégramme correspondant à la tache jaune.

L'examen à la lumière de Wood montre la présence de deux taches fluorescentes, l'une rose saumon située à environ 3 cm de la dépose (zone anodique) et l'autre d'un vert intense, située à environ 7 cm de la dépose (zone anodique). Les zones où figurent ces taches ont été éluées par 10 ml d'eau distillée durant une nuit et l'on a enregistré les spectres UV des éluats ainsi obtenus (fig. 14) : on note la présence d'un seul maximum d'absorption situé vers 2730-2740 Å pour l'éluat correspondant à la tache fluorescente verte. Ce maximum d'absorption est identique à celui que l'on peut observer dans le cas d'une solution aqueuse d'acide ortho-coumarique, acide qui donne précisément lieu à une fluorescence verte en lumière de Wood. Il y a donc de fortes présomptions pour que l'une des substances séparées par l'électrophorèse soit vraisemblablement un dérivé de ce composé.

Révélation des électrophorégrammes à l'ériochromecyanine et répartition de l'aluminium contenu dans ces électrophorégrammes.

Les électrophorégrammes correspondant aux extraits enrichis en Al^{+++} se colorent en violet intense, d'une part à la dépose et d'autre part au niveau de la zone où

l'on observe la fluorescence verte. La détermination quantitative de l'aluminium contenu dans les différentes zones des électrophorogrammes confirme ces résultats (tabl. 29).

TABLEAU 29

*Répartition de l'aluminium dans l'électrophorogramme
d'un extrait aqueux d'Erica scoparia enrichi en aluminium*

Partie de l'électrophorogramme	Al ⁺⁺⁺ (en µg par bandes de papier de 3 × 5 cm découpées perpendiculairement au sens de la migration)
Dépose.	13,2
Zone comprise entre la dépose et la zone correspondant à la fluorescence verte..	0
Zone correspondant à la fluorescence verte	6,5

c) Conclusion

L'électrophorèse d'extraits aqueux d'*Erica scoparia* enrichis en Al⁺⁺⁺ puis concentrés sous vide, l'examen des spectres UV des éluats obtenus à partir de ces électrophorogrammes et celui de la répartition de l'aluminium dans ces derniers indiquent que cet élément se trouve dans les extraits aqueux intégré dans des complexes organo-métalliques solubles, la partie organique de ces complexes étant vraisemblablement constituée par des acides-phénols, peut-être plus précisément par des dérivés de l'acide ortho-coumarique.

G. — CONCLUSION

L'étude systématique des rapports $\frac{Al^{+++}}{Fe^{+++}}$ dans la végétation en place, dans les jitières en voie de décomposition et dans les substrats, démontre qu'il y a diminution progressive de ce rapport quand on passe de la végétation vivante aux horizons supérieurs des substrats : cette observation résulte du fait que l'aluminium est plus facilement entraîné des débris végétaux en voie de décomposition que le fer.

Ces observations sur le terrain sont confirmées par des expériences conduites, soit au laboratoire, soit dans les conditions naturelles, expériences qui montrent que l'aluminium provenant de fragments de végétaux passe plus facilement en solution dans l'eau que le fer ; ces résultats démontrent également que cet aluminium ne passe pas en solution sous forme ionique mais, vraisemblablement, engagé dans des complexes organo-métalliques, dans la constitution desquels des acides-phénols paraissent jouer un rôle prépondérant.

CHAPITRE IV

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Dans ce qui précède, on a pu établir les points suivants :

1° *En ce qui concerne la mobilisation de Fe^{+++} et de Al^{+++}*

a) Les acides organiques issus des litières paraissent mobiliser préférentiellement plus de fer que d'aluminium ;

b) A l'opposé, la végétation caractéristique de certains sols acides du Sud-Ouest atlantique (notamment les *Ericacées* et les pins maritimes) extrait du substrat plus d'aluminium que de fer.

2° *En ce qui concerne la redistribution de Fe^{+++} et de Al^{+++}*

a) La distribution actuelle de Al^{+++} et de Fe^{+++} le long de certains profils ne peut s'expliquer qu'en attribuant à l'aluminium une plus grande mobilité qu'au fer ; ce fait est particulièrement net pour les sols de la zone sableuse des Landes, où la texture grossière et l'absence de pouvoir absorbant n'opposent aucun frein à la redistribution des éléments minéraux et des substances humiques ; dans ces sols, en effet l'indice d'entraînement de l'aluminium est presque toujours largement supérieur à celui du fer.

b) Il existe un parallélisme étroit entre les quantités de Al^{+++} et de Fe^{+++} associées aux acides humiques et la valeur du rapport $\frac{\text{acides fulviques}}{\text{acides humiques}}$, ce qui laisse supposer que ce sont les acides fulviques qui jouent le rôle essentiel dans les déplacements de Al^{+++} et de Fe^{+++} .

c) Il est, par contre, plus difficile de prouver que Al^{+++} et Fe^{+++} ont migré associés aux acides humiques proprement dits car on peut montrer que l'extraction de ces acides humiques libère des colloïdes minéraux auxquels peuvent être associés des composés du fer et de l'aluminium, lesquels ne sont peut-être pas toujours liés en même temps aux colloïdes humiques.

d) La solubilité dans l'eau des composés du fer que renferment certains végétaux est totalement différente de celle des composés de l'aluminium contenus dans ces mêmes végétaux : nulle dans le cas du fer, cette solubilité est, par contre, très importante dans le cas de l'aluminium.

L'interprétation générale de ces résultats peut être donnée sous forme d'un schéma (fig. 15), qui rend compte du rôle essentiel joué par la végétation dans la dynamique de l'aluminium des sols acides du Sud-Ouest atlantique.

Ce schéma montre que la végétation intervient doublement dans la mobilisation et la redistribution de Al^{+++} et de Fe^{+++} :

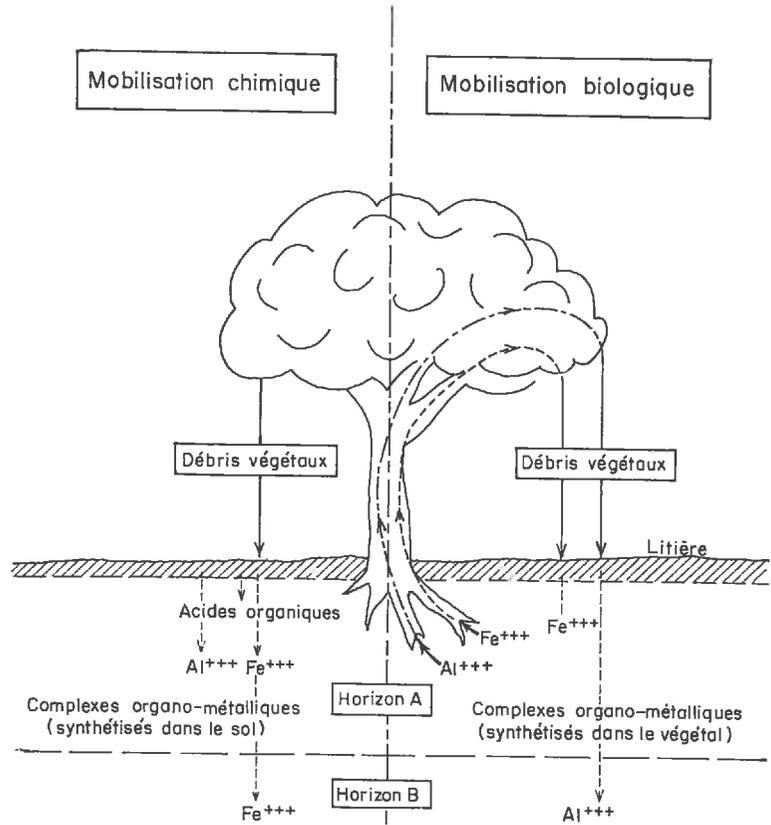


FIG. 15. — Influence de la végétation sur la mobilisation et la redistribution de l'aluminium et du fer dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique

— d'abord en mobilisant directement, au niveau des racines, des formes de Al^{+++} et de Fe^{+++} provenant des minéraux originels ; ces éléments ainsi mobilisés sont absorbés par les plantes au sein desquelles ils sont transformés en complexes organo-métalliques qui reviennent ensuite au sol en même temps que les débris végétaux. On pourrait donc s'attendre à un enrichissement relatif des horizons de surface en aluminium puisque ces débris végétaux sont plus riches en Al^{+++} qu'en Fe^{+++} ; en fait, on observe le contraire en raison de la grande solubilité dans l'eau des complexes contenant l'aluminium et de l'absence de solubilité de ceux contenant le fer ;

— la végétation intervient aussi en engendrant des acides organiques qui participent à l'altération de la fraction minérale du sol : cette forme d'altération paraît intéresser beaucoup plus le fer que l'aluminium, c'est du moins ce qu'ont montré les

quelques expériences relatées dans le chapitre I dont les résultats concordent, dans une certaine mesure, avec ceux de BLOOMFIELD (1954), lequel a montré que l'action dissolvante d'extraits aqueux de végétaux était beaucoup plus marquée pour le fer que pour l'aluminium.

On peut donc dire que l'aluminium contenu dans les horizons illuviaux de certains sols acides du Sud-Ouest atlantique (notamment les podzols landais) possède une origine essentiellement biologique puisque ces horizons ont un rapport Al^{+++}/Fe^{+++} nettement supérieur à celui des horizons de surface : on aurait dû observer l'inverse si l'altération chimique, qui dans ces sols intéresse d'abord le fer, avait surtout joué. Par contre, l'insolubilité à peu près totale des composés du fer existant dans les débris végétaux retombant au sol conduit à considérer que les formes de ce métal qui ont enrichi les horizons illuviaux des podzols landais sont essentiellement le produit d'une altération chimique de la fraction minérale du sol.

En définitive, la végétation naturelle des sols acides du Sud-Ouest atlantique paraît devoir jouer un rôle fondamental dans la mobilisation et le transport de l'aluminium. Les mécanismes précis qui interviennent dans ces phénomènes, notamment dans les phénomènes de mobilisation biologique au niveau des racines, restent encore à élucider pour la plupart : il est probable que l'identification et l'étude des propriétés des exsudats radiculaires produits par cette végétation pourraient permettre d'éclairer, au moins partiellement, ce problème.

TROISIÈME PARTIE

**ALUMINIUM ÉCHANGEABLE ET MISE EN VALEUR
DES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE**

CHAPITRE I

PHYTOTOXICITÉ DE L'ALUMINIUM

1. Rappel bibliographique sommaire

Il y aura bientôt un-demi siècle que HARTWELL et PEMBER démontrèrent de manière rigoureuse que la présence d'aluminium mobile était l'un des principaux facteurs susceptibles d'expliquer l'effet dépressif qu'exerce, sur la croissance de certaines espèces végétales, l'excès d'acidité des sols ; c'est en effet en 1918 que ces auteurs établirent les points suivants :

1° Le Seigle et l'Orge ont un comportement différent en sol acide, uniquement parce que l'une de ces deux plantes est très résistante à l'excès d'aluminium (le Seigle) et l'autre très sensible (l'Orge). Ces deux espèces réagissent en effet de manière identique, en culture sur sable, d'une part à une très forte acidité et d'autre part à un excès de manganèse, élément souvent mis en cause dans les accidents de végétation se produisant en sols très acides.

2° L'influence toxique de l'aluminium se manifeste surtout vis-à-vis de l'appareil racinaire dont le développement peut être totalement inhibé.

3° L'effet bénéfique d'un apport complémentaire de phosphate, en solution nutritive ou dans les sols, ne résulte pas de la correction d'une éventuelle carence en acide phosphorique qu'aurait pu provoquer la formation d'un précipité de phosphate d'aluminium mais de l'atténuation ou de la disparition de la toxicité de l'aluminium, qui précipite à la suite de l'apport d'un excès d'acide phosphorique ; HARTWELL et PEMBER ont d'ailleurs utilisé le terme de « phosphatage » pour bien souligner que cet apport complémentaire de phosphate équivaut, au point de vue de la diminution de l'activité de Al^{+++} , à la réalisation d'un chaulage.

4° Un apport d'azote sous forme strictement ammoniacale, dans un milieu riche en Al^{+++} , entraîne une acidification de ce milieu et, partant, une aggravation des symptômes d'intoxication par l'aluminium, dont l'activité augmente en milieu acide.

Depuis, un très grand nombre de travaux ont été consacrés à l'étude de la toxicité de l'aluminium vis-à-vis de la plupart des espèces végétales cultivées ; parmi les plus récents, on peut citer ceux de AHMAD (1960), HORTENSTINE et FISKELL (1961), RAGLAND et COLEMAN (1962), VOSE et RANDALL (1962-1963), RATNER, SMIRNOV et HUANG HONG SHU (1962), DIOS VIDAL et BROYER (1962), HESSE (1963), HATT AMOS et MASSEY (1963), TAKAHASHI (1963), FOY et BROWN (1963-1964), YOSHIDA et SAKAI (1963), HOFFMAN (1964), CATE et SUKHAI (1964).

La sensibilité à l'excès d'aluminium dépend essentiellement de l'espèce végétale considérée : l'Orge est toujours citée comme l'une des plantes les plus sensibles mais

la toxicité se manifeste, également pour de faibles doses de Al^{+++} , dans le cas de la majorité des Légumineuses, du Riz, du Millet, de la Betterave, de la Moutarde et de nombreuses plantes maraîchères (notamment : l'Épinard, le Céleri, la Laitue). L'Avoine et le Blé sont un peu moins sensibles et le Maïs beaucoup moins encore. Par contre, certaines espèces ont la propriété de pouvoir accumuler sans inconvénient d'importantes quantités d'aluminium ; on rappellera à ce sujet les observations, déjà mentionnées dans la deuxième partie de ce travail, de SMITH (1904), CHENERY (1948), HARRIS (1961), HUMPHREYS et TRUMAN (1964). L'énorme différence de sensibilité des plantes vis-à-vis de l'excès d'aluminium constitue l'un des éléments de base permettant peut-être de résoudre certains problèmes d'écologie (CLYMO, 1962).

Les symptômes d'intoxication par Al^{+++} sont très peu caractéristiques, il faut reconnaître d'ailleurs qu'il en est bien souvent de même pour la plupart des éléments phytotoxiques. Le caractère le plus constant est le nanisme ou même l'arrêt total de la croissance du végétal ; cette atrophie intéresse surtout le système racinaire dont la morphologie peut se trouver en outre profondément modifiée : les racines s'épaississent, brunissent et s'enroulent sur elles-mêmes ; AHMAD (1960) a utilisé le terme « coralloïde » pour qualifier le mode d'enroulement bien particulier des racines d'un maïs fortement intoxiqué par Al^{+++} . En ce qui concerne les parties aériennes, celles-ci peuvent, dans les cas les plus graves, jaunir et se dessécher ; un symptôme assez fréquent est le rougissement général de la plante, rougissement tout à fait comparable à celui que l'on peut observer à la suite d'une sévère carence en acide phosphorique : c'est d'ailleurs ce type de symptôme qui a amené beaucoup d'auteurs à essayer de relier la toxicité de l'aluminium à un trouble dans le métabolisme de l'acide phosphorique. En fait, les mécanismes qui interviennent au cours des phénomènes d'intoxication par Al^{+++} sont encore hypothétiques : d'après STOKŁASA (1911), l'aluminium provoquerait une coagulation des protéines ; HORTENSTINE et FISKELL (1961), TAKAHASHI (1963), JOHNSON et JACKSON (1964) ont plus particulièrement insisté sur l'effet dépressif exercé par Al^{+++} sur l'absorption et le transport de Ca^{++} dans la plante ; HIATT, AMOS et MASSEY (1963) ainsi que LIEBIG, VANSELOW et CHAPMAN (1942) ont montré qu'il y avait également antagonisme entre l'absorption du cuivre et celle de l'aluminium ; DIOS-VIDAL et BROYER (1962) ont mis l'accent sur le fait qu'il était possible, en solution nutritive, d'annihiler l'effet toxique de l'aluminium vis-à-vis du Maïs si l'on augmentait les doses de magnésium présentes dans le milieu nutritif, ce qui peut laisser supposer qu'il existe peut-être aussi un antagonisme entre l'absorption de Al^{+++} et celle de Mg^{++} . Dans le même ordre d'idées, on peut aussi signaler que CHAMURA et HOSKI (1962) ont remarqué que la présence de Al^{+++} déprimait l'absorption de K^+ par le Sorgho et le Maïs. En fait, la plupart des auteurs ont cherché à associer la toxicité de l'aluminium à une perturbation de la nutrition phosphatée des plantes ; c'est ainsi que, d'après FOY et BROWN (1964), l'excès d'aluminium entraînerait une simple carence en acide phosphorique et, que l'on pourrait expliquer la résistance variable des plantes à l'excès de Al^{+++} en faisant intervenir leur aptitude à utiliser plus ou moins facilement l'anion phosphorique en présence de fortes quantités d'aluminium. RAGLAND et COLEMAN (1962) et plus récemment RANDALL et VOSE (1963) ont cependant montré que le problème était beaucoup plus complexe, l'aluminium pouvant, bien au contraire, stimuler à faible dose l'absorption de P. On doit signaler également que quelques chercheurs, notamment BERTRAND (1931) et HACKERT (1962), ont émis l'hypothèse que l'alumi-

nium pouvait, à faible concentration, jouer un rôle bénéfique dans le métabolisme du végétal ; en fait, d'après HUTCHINSON (1945), il serait possible que cet effet bénéfique résulte en partie de la présence de traces de gallium accompagnant les sels d'aluminium utilisés pour la préparation des milieux nutritifs.

L'abondante littérature consacrée à l'étude de l'aspect physiologique de la toxicité de l'aluminium indique bien qu'il s'agit là d'un problème qui est loin d'être résolu, aussi nous bornerons-nous à relater, dans ce qui suit, quelques expériences relatives à l'influence de Al^{+++} sur le développement et sur certains aspects de la nutrition minérale du Maïs, cette plante représentant le matériel végétal essentiel utilisé pour la mise en valeur des sols acides du Sud-Ouest atlantique, lesquels sont précisément souvent très riches en aluminium mobile. L'étude de l'influence de l'aluminium sur la croissance de jeunes plantules de Pin maritime sera également abordée, en raison de l'extension de cette espèce dans la majorité des sols sableux des Landes et du rôle qu'elle semble jouer dans la dynamique de l'aluminium des sols de cette région.

2. Influence de l'aluminium sur le développement et la nutrition minérale de jeunes plantules de Maïs cultivées sur sable

A. — TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE

a) Milieu de culture

Il est constitué par du sable type « sable de Fontainebleau », lavé à l'acide chlorhydrique concentré et tamisé à 2 mm. Ce sable est introduit dans une allonge de verre de 35 cm de hauteur et de 5 cm de diamètre, munie à sa partie inférieure d'une toile de

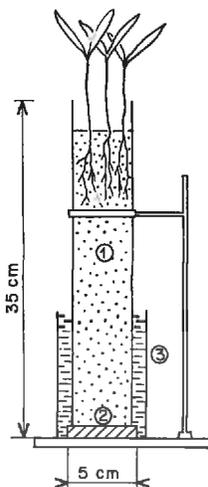


FIG. 16. — Dispositif utilisé pour étudier l'influence de l'aluminium sur la croissance de jeunes plantules de Maïs.

- 1 : allonge contenant du sable de Fontainebleau ;
- 2 : grille de nylon ;
- 3 : bécber de 400 ml contenant la solution nutritive.

nylon à très petites mailles. L'allonge, qui contient environ 750 g de sable, est plongée dans un bécber de 400 ml, dans lequel on verse la solution nutritive (fig. 16), qui remonte par capillarité jusqu'à la partie supérieure du sable. Ce dispositif permet de suivre le développement de l'appareil racinaire en fonction des différents traitements appliqués.

b) *Matériel végétal*

On sème dans chaque allonge 3 graines de Maïs variété *I.N.R.A. 260*.

c) *Solution nutritive*

La composition de la solution nutritive utilisée figure dans le tableau 30. Elle est renouvelée une fois par semaine, les allonges étant préalablement rincées à l'eau distillée ; les bécbers sont maintenus à niveau constant par addition journalière de solution nutritive fraîchement préparée.

TABLEAU 30

*Composition de la solution nutritive
utilisée pour la culture sur sable du Maïs*

(NO ₃) ₂ Ca	PO ₄ H ₂ K	ClK	NO ₃ K	SO ₄ Mg	Oligo-éléments en mg/l					
					Mn ⁺⁺	Zn ⁺⁺	Cu ⁺⁺	B	Mo	Fe ⁺⁺⁺
0,001 8 M	0,002 5 M	0,000 3 M	0,001 0 M	0,002 0 M	0,68	0,08	0,03	0,5	0,01	1,4

B. — TRAITEMENTS

On a étudié l'influence de quatre concentrations en aluminium : 0, 10, 50, 200 mg de métal par litre ; ce dernier a été apporté sous forme de chlorure d'aluminium (Merck P.A.), chaque traitement comportant 4 répétitions.

Les apports ont été réalisés selon deux modes différents :

Apport simultané de l'aluminium et de la solution nutritive

Des parties aliquotes de la solution nutritive ont été enrichies en aluminium pour parvenir aux concentrations choisies (10, 50, 200 mg de Al⁺⁺⁺/litre). Les pH des solutions nutritives enrichies ou non en aluminium ont été ensuite ajustés à 4 par addition de soude ou d'acide chlorhydrique.

Apport séparé dans le temps de l'aluminium et de la solution nutritive

Pendant 3 jours, les allonges reçoivent la solution nutritive seule ;

au bout de ces 3 jours, la solution nutritive est remplacée, après rinçage des allonges à l'eau distillée, par une solution aqueuse de chlorure d'aluminium correspondant à 0, 10, 50 et 200 mg de Al⁺⁺⁺/litre, dont le pH a été également ajusté à 4.

Après 3 jours de contact avec les solutions d'aluminium, les allonges sont rincées à l'eau distillée et on les remet en contact, à nouveau pendant 3 jours, avec la solution nutritive.

Ces apports séparés ont été réalisés de manière à mettre en évidence un éventuel effet dépressif de l'aluminium sur l'absorption d'autres éléments minéraux et à éviter (notamment dans le cas de l'acide phosphorique) la précipitation, au sein de la solution, de certains de ces éléments.

C. — DÉTERMINATIONS EFFECTUÉES

Chacun des deux essais a duré 5 semaines ; au bout de ce laps de temps, les jeunes plantules ont été récoltées et les déterminations suivantes ont été effectuées :

— pesée des parties aériennes (matière végétale fraîche et matière végétale séchée à 105°C) ;

— pesée de l'appareil racinaire (matière végétale séchée à 105°C) ;

— mesure des concentrations en aluminium, en acide phosphorique, en calcium, en magnésium et en potassium des parties aériennes.

Les détails relatifs aux techniques de dosage utilisées sont donnés en appendice.

D. — RÉSULTATS OBTENUS

(fig. 17 et 18 ; tabl. 31, 32, 33 et 34)

L'influence des traitements commence à se manifester vers le dixième jour environ qui suit leur application ; elle est surtout très marquée pour les traitements correspondant aux apports de 50 et de 200 mg d'aluminium par litre, que ces apports

TABLEAU 31

Influence de l'aluminium sur le développement de jeunes plantules de Maïs âgées de 5 semaines
(Apports simultanés de l'aluminium et de la solution nutritive)

Traitement (1)	Récolte matière fraîche (2)		Récolte matière sèche (3)			
	Parties aériennes	Variation (4)	Parties aériennes	Variation (4)	Racines	Variation (4)
0	25,570	0	3,030	0	1,240	0
10	21,840	15	2,370	22	0,880	29
50	15,840	38	1,920	37	0,780	37
200	0,720	97	0,130	96	0,040	97

(1) Traitement : mg d'aluminium contenus dans 1 litre de solution nutritive (pH ajusté à 4).

(2) Poids de la matière fraîche (en grammes) correspondant à 1 pied de maïs (moyenne de 4 répétitions).

(3) Poids de la matière végétale (en grammes) séchée à 105°C correspondant à 1 pied de maïs (moyenne de 4 répétitions).

(4) Diminution du rendement (en p. 100 par rapport au traitement témoin).

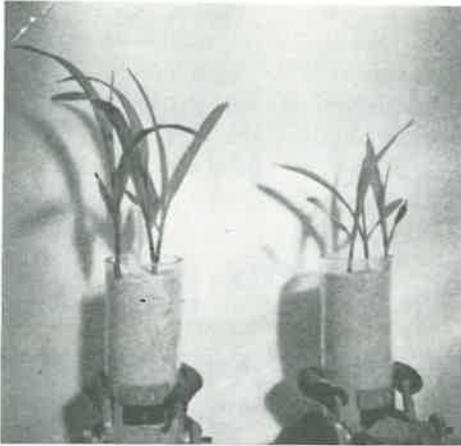


FIG. 17. — Influence de l'aluminium sur la croissance des parties aériennes de jeunes plantules de Maïs cultivées sur sable.

A gauche : Maïs recevant une solution nutritive sans aluminium
A droite ; Maïs recevant une solution nutritive contenant 50mg d'aluminium par litre.

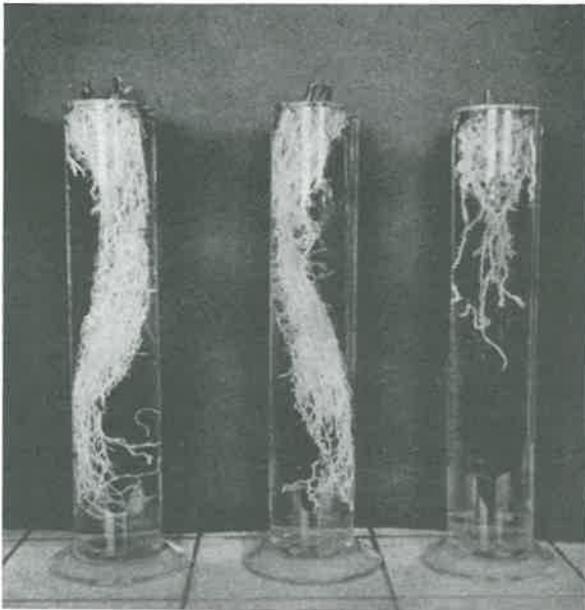


FIG. 18. — Influence de l'aluminium sur le développement de l'appareil racinaire de jeunes plantules de Maïs cultivées sur sable,

De gauche à droite :

Maïs alimenté à l'aide d'une solution nutritive dépourvue d'aluminium.
Maïs alimenté à l'aide d'une solution nutritive contenant 10 mg de Al^{+++} /litre.
Maïs alimenté à l'aide d'une solution nutritive contenant 50 mg de Al^{+++} /litre.

soient effectués séparément ou en même temps que ceux de la solution nutritive. On observe un rougissement des feuilles, qui débute par la base de la nervure centrale et s'accroît rapidement ; l'extrémité des feuilles les plus âgées se dessèche sans jaunissement préalable et, pour la dose d'aluminium la plus élevée, ce dessèchement gagne l'ensemble de la plantule qui ne tarde pas à mourir. Parallèlement, on observe que les racines des plantes les plus atteintes brunissent ; elles sont très peu ramifiées, s'enroulent sur elles-mêmes et ne descendent pas au-delà des 5 premiers centimètres de la partie supérieure de l'allonge.

TABLEAU 32

Influence de l'aluminium sur le développement de jeunes plantules de Maïs âgées de 5 semaines,

(Apports séparés dans le temps de la solution nutritive et de l'aluminium)

Traitement (¹)	Mat. fraîche (²)	Matière sèche (²)	
	Parties aériennes	Parties aériennes	Racines
0	0	0	0
10	7	12	0
50	63	60	47
200	84	80	80

(¹) mg d'aluminium par litre d'eau distillée (pH ajusté à 4).

(²) Diminution du rendement (en % par rapport au traitement témoin).

TABLEAU 33

Influence de l'aluminium sur les quantités d'éléments minéraux contenues dans les parties aériennes de jeunes plantules de Maïs âgées de cinq semaines

(Apports séparés dans le temps de l'aluminium et de la solution nutritive)

Traitement (¹)	Concentration en éléments minéraux (²)				
	Al ⁺⁺⁺	P ₂ O ₅	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
0	traces	6 290	17 900	4 500	1 730
10	23	6 890	19 280	4 900	1 920
50	50	7 190	18 850	5 080	2 080
200	255	7 610	20 810	4 370	2 330

(¹) Traitement : mg d'aluminium contenus dans 1 litre d'eau distillée (pH ajusté à 4).

(²) En mg par kg de matière végétale séchée à 105°C (moyenne de 4 répétitions).

Les pesées du matériel végétal indiquent que, pour la plus forte dose d'aluminium (200 mg/litre), la récolte est réduite à peu près à néant et cela quel que soit le mode d'apport du métal. La baisse de rendement s'observe dès la dose de 10 mg/litre et cette baisse intéresse, dans les mêmes proportions, le système racinaire et le système aérien.

TABLEAU 34

Influence de l'aluminium sur les quantités d'éléments minéraux contenues dans les parties aériennes de jeunes plantules de Maïs âgées de cinq semaines
(Apports simultanés de l'aluminium et de la solution nutritive)

Traitement ⁽¹⁾	Concentration en éléments minéraux ⁽²⁾				
	Al ⁺⁺⁺	P ₂ O ₅	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
0	traces	7 140	22 230	3 590	2 790
10	31	8 150	26 150	4 800	3 530
50	32	5 600	25 550	4 320	3 330
200	860	6 700	36 800	4 030	2 300

⁽¹⁾ Traitement : mg d'aluminium contenus dans 1 litre de solution nutritive (pH ajusté à 4).

⁽²⁾ En mg par kg de matière végétale séchée à 105°C (moyenne de 4 répétitions).

La détermination des concentrations en éléments minéraux démontre qu'il y a une influence nette du mode d'apport de l'aluminium ; l'apport simultané du métal et de la solution nutritive se traduit en effet par les phénomènes suivants :

- diminution du taux de phosphore pour les doses les plus élevées de Al⁺⁺⁺ ;
- légère augmentation du taux de calcium et diminution de ce dernier dans le cas de la dose la plus élevée d'aluminium ;
- augmentation assez nette du taux de magnésium (pour les doses 10 et 50 mg de Al⁺⁺⁺/litre) suivie d'une diminution brusque pour la dose la plus élevée (200 mg/litre) ;
- augmentation très nette du taux de potassium quand la concentration en Al⁺⁺⁺ de la solution augmente ;

Les apports séparés dans le temps de l'aluminium et de la solution nutritive se traduisent par :

- une augmentation régulière des taux de phosphore et de magnésium quand la concentration en Al⁺⁺⁺ de la solution nutritive croît ;
- une légère augmentation du taux de calcium et un accroissement régulier de celui du potassium quand s'élèvent les doses de Al⁺⁺⁺ présentes dans le milieu nutritif.

Quel que soit le mode d'apport utilisé, on ne note une augmentation sensible du taux de Al⁺⁺⁺ dans les parties aériennes que pour la dose la plus élevée d'aluminium (200 mg/litre).

E. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

La comparaison des poids de récolte obtenus pour les deux modes d'apport de l'aluminium prouve que la diminution des rendements est bien due à un effet toxique de l'aluminium et non pas à une carence en un élément minéral qui aurait pu précipiter dans la solution en présence des plus fortes concentrations en Al^{+++} . L'absence de développement du système racinaire et la modification profonde de la morphologie de ce dernier paraissent confirmer cette conclusion.

Quel que soit le mode d'apport de l'aluminium, on note une stimulation très nette de l'absorption du potassium ; cette stimulation s'observe également, en présence des faibles doses de Al^{+++} , pour Mg^{++} , Ca^{++} et P mais, par contre, pour les plus fortes concentrations en aluminium cette stimulation ne subsiste que dans le cas des apports séparés de l'aluminium et de la solution nutritive. Il est probable que la diminution de l'absorption de P résulte d'un abaissement de l'activité de l'anion phosphorique quand ce dernier est placé en présence des plus fortes doses de Al^{+++} . Le cas du magnésium et celui du calcium sont plus difficilement interprétables car il peut y avoir, en effet, soit réellement antagonisme d'absorption entre Ca^{++} et Al^{+++} ou Mg^{++} et Al^{+++} comme le pensent certains auteurs (HORTENSTINE et FISKELL, 1961 ; TAKAHASHI, 1963 ; JOHNSON et JACKSON, 1964), soit formation, au sein de la solution nutritive, de complexes particulièrement stables résultant de l'association entre l'aluminium et le magnésium ou l'aluminium et le calcium (VAJSNTEIN et LEBEDEV, 1961), complexes qui seraient peu ou pas utilisables par le végétal, soit encore copré-
cipitation dans la solution nutritive de l'anion phosphorique, de l'aluminium et des alcalino-terreux.

En résumé, les résultats obtenus montrent que, pour les plus faibles doses de Al^{+++} , il y a stimulation de l'absorption de P, de K^+ , de Mg^{++} et de Ca^{++} par les jeunes plantules de Maïs ; le phénomène s'inverse dans certains cas pour les plus fortes doses de Al^{+++} quand le métal est ajouté dans la solution nutritive mais la stimulation subsiste, même pour les plus fortes doses de Al^{+++} , quand les apports du métal et ceux de la solution nutritive sont séparés dans le temps.

Cette stimulation générale de l'absorption minérale pourrait peut-être s'expliquer par une modification de la perméabilité des parois cellulaires, cette stimulation pouvant être masquée par la précipitation ou l'inactivation de certains des éléments minéraux de la solution nutritive, dans le cas où les plus fortes doses d'aluminium sont introduites dans celle-ci.

3. Influence de l'aluminium sur l'absorption du phosphore par des racines excisées de Maïs

Il ressort des expériences décrites ci-dessus que l'aluminium paraît favoriser l'absorption de l'anion phosphorique par les jeunes plantules de Maïs ; pour essayer de préciser ce point, on a étudié l'absorption de cet anion par des racines excisées provenant de plantules de Maïs, en présence de doses croissantes d'aluminium.

A. — TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE

Les racines ont été prélevées sur de jeunes plantules de Maïs (variété *I.N.R.A. 260*) âgées de 3 semaines, qui ont été cultivées sur un milieu inerte (quartz pur) imprégné d'une solution nutritive identique à celle utilisée dans l'expérience précédente, la concentration en phosphate étant cependant dix fois plus faible.

Les racines prélevées ont été lavées plusieurs fois à l'eau distillée, séchées rapidement entre deux feuilles de papier-filtre, puis découpées en morceaux de 1 cm de longueur environ ; on a introduit 1 g des fragments de racines ainsi préparés dans une fiole d'Erlenmeyer dans laquelle on a ajouté ensuite 100 ml d'une solution aqueuse de phosphate monopotassique enrichie en aluminium. Le récipient a été placé à température constante (20°C) pendant 16 heures et, au bout de ce laps de temps, on a séparé, par filtration, la solution phosphatée des fragments de racines. L'acide phosphorique a été dosé simultanément dans la solution phosphatée qui est demeurée en contact avec les racines et dans une partie aliquote de la solution initiale : on a donc pu calculer, par différence, les quantités d'acide phosphorique effectivement absorbées par les racines en présence des différentes doses d'aluminium.

B. — TRAITEMENTS EFFECTUÉS

Quatre séries d'essais ont été effectuées :

- a) *Influence de doses croissantes de Al^{+++} sur l'absorption de P à partir d'une solution aqueuse de phosphate monopotassique de concentration donnée*

On a ajouté à une solution phosphatée de concentration donnée (20 mg PO_4H_2K /litre) des quantités croissantes de Al^{+++} : 0, 5, 10, 30, 50, 200 mg de métal/litre (chlorure d'aluminium Merck P.A.).

- b) *Influence de la concentration en phosphate sur l'effet exercé par une concentration donnée de Al^{+++} sur l'absorption de P*

On a comparé l'influence d'une dose d'aluminium (10 mg/litre) sur l'absorption de P pour différentes concentrations en phosphate de la solution (2, 20, 30, 60, 200 mg PO_4H_2K /litre). On a également comparé l'influence de deux concentrations extrêmes en phosphate monopotassique (20 et 200 mg/litre) en présence d'une dose plus élevée de Al^{+++} (100 mg/litre).

- c) *Influence de la nature du cation introduit dans la solution phosphatée sur l'absorption de P*

On a déterminé l'influence qu'exerce la nature du cation sur l'absorption de P par les racines excisées en ajoutant à une solution phosphatée de concentration donnée (20 mg PO_4H_2K /litre) des quantités équivalentes de Ca^{++} , K^+ et Al^{+++} associées à un même anion (Cl^-).

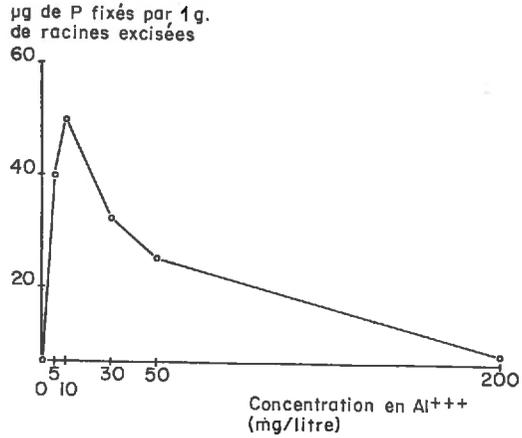


FIG. 19. — Influence de concentrations croissantes en Al^{+++} sur l'absorption de P par des racines excisées de Maïs à partir d'une solution aqueuse de phosphate monopotassique (Durée de l'absorption : 16 h)

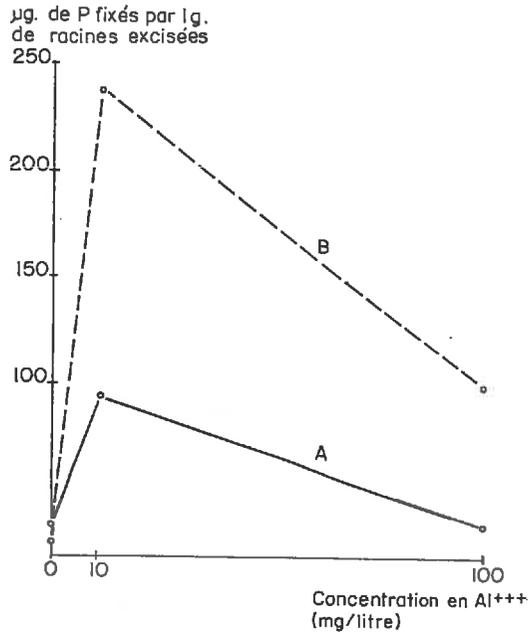


FIG. 20. — Influence de la concentration en phosphate et de la concentration en aluminium sur l'absorption de P par des racines excisées de Maïs (Durée de l'absorption : 16 h)
A : 20 mg PO_4H_2K /litre B : 200 mg PO_4H_2K /litre.

d) *Effet exercé par l'aluminium sur l'absorption de P en fonction de l'état des racines*

On a comparé l'influence de Al^{+++} sur l'absorption de P par des racines excisées vivantes et par des racines excisées que l'on a préalablement tuées en les plongeant durant 15 minutes dans un récipient d'eau portée à ébullition.

Dans ces quatre séries d'essais, tous les traitements ont comporté chacun 3 répétitions.

C. — RÉSULTATS OBTENUS

Pour une concentration donnée en phosphate, il y a stimulation par l'aluminium de l'absorption de P par les racines excisées, l'effet maximum se manifestant pour des concentrations en Al^{+++} de l'ordre de 5 à 10 mg/litre (fig. 19). Cet effet stimulant

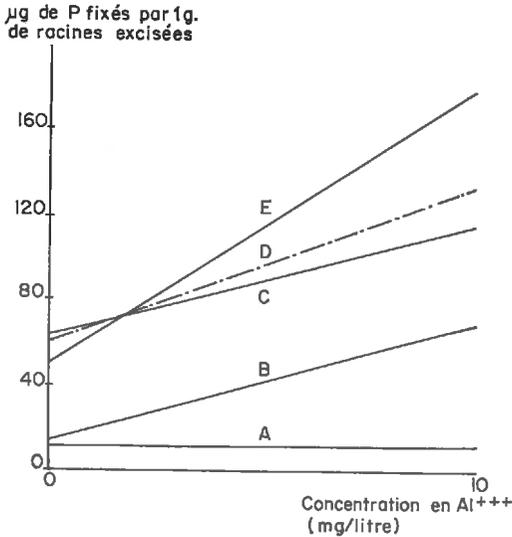


FIG. 21. — Influence de la concentration en phosphate sur l'effet exercé par une dose donnée d' Al^{+++} (10 mg de métal/litre) sur l'absorption de P par des racines excisées de Maïs

(Durée de l'absorption : 16 h)

A : 2 mg PO_4H_2K /litre. B : 20 mg PO_4H_2K /litre. C : 30 mg PO_4H_2K /litre.
D : 60 mg PO_4H_2K /litre. E : 200 mg PO_4H_2K /litre.

paraît s'estomper pour les concentrations en Al^{+++} les plus élevées : en fait, la figure 20 montre que, pour des concentrations en aluminium importantes (100 mg/litre), il y a encore stimulation très nette de l'absorption si la concentration en phosphate est suffisamment élevée : l'influence stimulante d'une dose donnée de Al^{+++} prend en effet de plus en plus d'importance quand la teneur en phosphate augmente (fig. 21).

Pour des concentrations équivalentes de métal, l'aluminium stimule fortement l'absorption de P par les racines, le calcium légèrement, tandis que le potassium n'exerce pratiquement aucune influence (fig. 22).

L'accroissement de l'absorption de P dû à la présence de Al^{+++} se manifeste même pour les racines tuées par l'eau portée à ébullition (fig. 23).

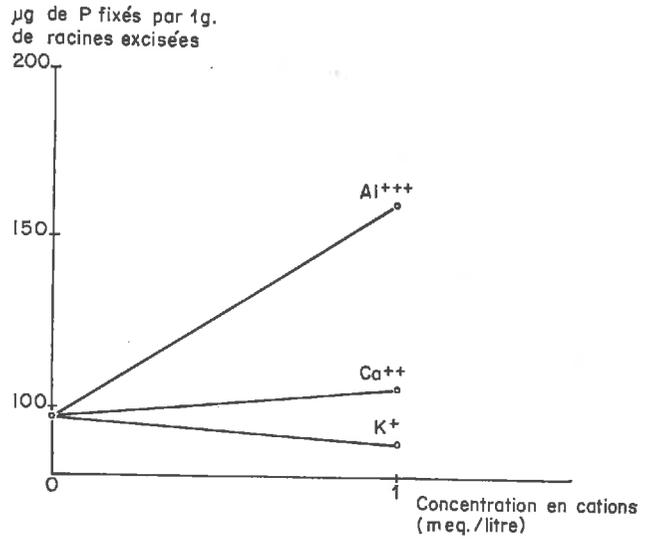


FIG. 22. — Influence de la nature du cation associé au phosphate sur l'absorption de P par des racines excisées de *Maïs* (Durée de l'absorption : 16 h)

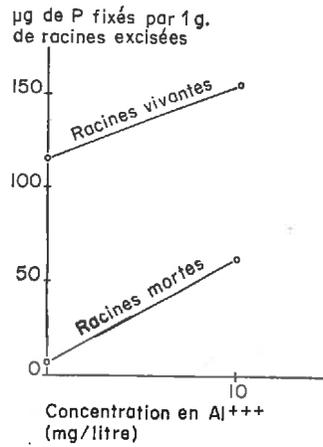


FIG. 23. — Effet exercé par l'aluminium sur l'absorption de P en fonction de l'état des racines. (Durée de l'absorption : 16 h)

D. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

De nombreuses hypothèses ont été avancées pour expliquer l'influence perturbatrice de l'aluminium sur la nutrition phosphatée des plantes ; beaucoup d'auteurs pensent notamment que cette influence résulte essentiellement d'une carence en acide phosphorique provoquée par la précipitation de phosphate d'aluminium dans le milieu nutritif, à la surface des racines ou à l'intérieur même du végétal (MAGISTAD 1925 ; WALLIHAN, 1948 ; WRIGHT et DONAHUE, 1953 ; FOY et BROWN, 1964). Pourtant, RAGLAND et COLEMAN (1962) ont montré que le problème était plus complexe, de faibles concentrations en Al^{+++} pouvant stimuler l'absorption de P par des racines excisées de Haricot ; RANDALL et VOSE (1963) ont confirmé et précisé ces observations : d'après eux, l'influence favorable exercée par Al^{+++} sur l'absorption de P serait due, soit à l'action stimulante qu'exerce ce métal sur la réduction du cytochrome c (HORECKER, STOTZ et HOGNESS, 1939), soit à une manifestation de l'effet VIETS (1944). RAGLAND et COLEMAN émettent cependant des doutes quant à une influence du type effet VIETS, le prétraitement des racines par le calcium ne modifiant pas dans ce cas-là l'absorption des autres ions, alors que le prétraitement des racines par Al^{+++} modifie cette absorption.

Les résultats exposés ci-dessus tendent à prouver que l'on doit sans doute attribuer l'influence stimulante de Al^{+++} sur l'absorption de P à une modification de la perméabilité cellulaire : la meilleure preuve en est fournie par le fait que cette influence stimulante subsiste même pour les racines préalablement tuées. Cette influence subsiste également pour les fortes doses de Al^{+++} , à condition que la concentration en phosphate du milieu soit suffisamment élevée pour compenser la diminution de l'activité de l'anion résultant de la présence d'une importante quantité de Al^{+++} .

Il semble donc que les mécanismes qui jouent un rôle dans la stimulation de l'absorption de P soient de même nature que ceux qui favorisent l'absorption de K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} lorsque l'on sépare dans le temps les apports de Al^{+++} de ceux de la solution nutritive. Dans ces conditions, il paraît difficile d'assimiler l'effet toxique de l'aluminium à une simple carence induite en acide phosphorique : les mécanismes qui interviennent au cours de ces phénomènes d'intoxication restent encore à découvrir.

4. Influence de l'aluminium sur la croissance de jeunes plantules de Pin maritime

A. — TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE

Les semences de pins préalablement traitées par le froid ont été mises à germer dans de la sciure maintenue humide ; 15 jours après la germination, les jeunes plantules ont été repiquées dans des pots (9 plants par pot) contenant chacun 17 kg de sable dunaire provenant de la forêt domaniale de Biscarosse (Landes). Ces récipients, du type « pot Riviera », reçoivent 1 litre de solution nutritive qui remonte dans le sable par capillarité ; la solution nutritive est une solution aqueuse de nitrate de potassium contenant 75 mg d'azote par litre. Cette solution est renouvelée tous les

8 jours ; toutes les 3 semaines, les pots sont abondamment rincés à l'eau déminéralisée et l'on substitue alors pendant 8 jours à la solution de nitrate de potassium une solution de phosphate monopotassique contenant 20 mg de sel/litre.

B. — TRAITEMENTS EFFECTUÉS

On ajoute, dans la solution de nitrate, des quantités de chlorure d'aluminium (Merck P.A.) correspondant à 0, 10, 50 et 200 mg de Al^{+++} par litre. Le pH des solutions nutritives est ensuite ajusté à 4 par addition d'acide chlorhydrique.

Chaque traitement comporte 4 répétitions.

C — OBSERVATIONS ET DÉTERMINATIONS

Huit mois après le repiquage des jeunes plantules dans le sable dunaire, on a mesuré leur hauteur et l'on a calculé les moyennes correspondant à chaque traitement ; compte tenu de l'hétérogénéité du matériel végétal qui provient d'un semis, on a calculé les plus petites différences significatives pour les probabilités $P = 0,01$ — $0,05$ et $0,1$.

D — RÉSULTATS OBTENUS

(fig. 24 et 25, tabl. 35)

Contrairement à ce que l'on peut observer dans le cas du maïs, les effets inhibiteurs de la plus forte dose de Al^{+++} (200 mg de métal/litre) se manifestent beaucoup plus tardivement, vers le troisième mois environ après le repiquage : les pseudophylles situés à la base des jeunes plantules rougissent intensément et se dessèchent ; les jeunes pins cessent de se développer et, au huitième mois, les différences existant

TABLEAU 35

Influence de doses croissantes d'aluminium sur le développement de plantules de Pin maritime âgées de 8 mois, cultivées sur sable

Traitement mg/de Al^{+++} par litre de solution nutritive	Hauteur des plantules (en mm)	Variation ⁽¹⁾	P.p.d.s. P = 0,01 (en mm) ⁽²⁾	P.p.d.s. P = 0,05 (en mm) ⁽²⁾	P.p.d.s. P = 0,5 (en mm) ⁽²⁾
0	164	0			
10	184	+ 12	36	25	20
50	143	— 13			
200	72	— 56			

⁽¹⁾ En p. 100 par rapport au témoin.

⁽²⁾ Plus petite différence significative.

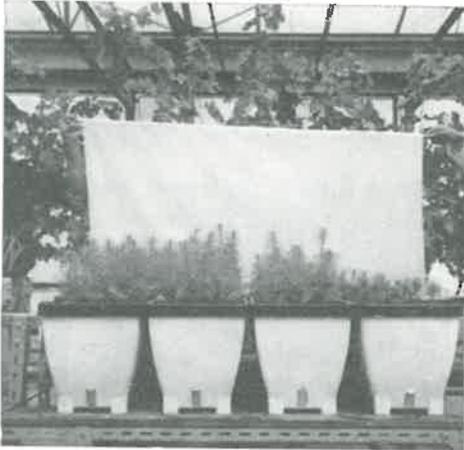


FIG. 24. — Influence de doses croissantes d'aluminium sur le développement de plantules de *Pin maritime* âgées de 8 mois.
De gauche à droite :

0-10-50-200 mg de Al^{+++} par litre de solution nutritive.



FIG. 25. — Influence d'une dose élevée d'aluminium sur la croissance de plantules de *Pin maritime* âgées de 8 mois cultivées sur sable.

A gauche : 0 mg de Al^{+++} par litre de solution nutritive.
A droite : 200 mg de Al^{+++} par litre de solution nutritive.

entre les traitements 200 mg de Al^{+++} /litre et les autres sont extrêmement accusées ; quelques jeunes plantules traitées par la plus forte dose d'aluminium se dessèchent et meurent.

En ce qui concerne les comparaisons effectuées entre les traitements 0, 10 et 50 mg de Al^{+++} /litre, on constate que les jeunes pins ayant reçu la dose 10 mg/litre sont plus développés que les pins correspondant au traitement témoin, alors que ceux qui ont reçu la dose 50 mg/litre le sont légèrement moins.

Les résultats des mensurations effectuées au bout de huit mois de traitement et l'interprétation statistique de ces résultats confirment l'ensemble de ces observations ; en effet :

a) Les différences existant entre le traitement 200 mg de Al^{+++} /litre et tous les autres traitements sont hautement significatives ;

b) il n'existe pas de différence significative entre le traitement témoin et le traitement 10 mg/litre ni entre le traitement témoin et le traitement 50 mg/litre. Par contre, la différence existant entre le traitement 10 mg/litre et le traitement 50 mg/litre est hautement significative, ce qui veut dire que le traitement 10 mg/litre est stimulant alors que le traitement 50 mg/litre est dépressif.

E. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'aluminium s'avère indiscutablement toxique à forte dose (200 mg/litre) pour les jeunes plantules de Pin ; par contre, à la dose la plus faible (10 mg/litre), il semble que ce métal exerce vis-à-vis des jeunes pins un effet stimulant très net.

5. Conclusion

Des doses d'aluminium correspondant à 10, 50 et 200 mg de métal/litre introduites dans une solution nutritive dépriment la croissance de jeunes plantules de Maïs ; les mêmes doses s'avèrent beaucoup moins dépressives vis-à-vis de jeunes plantules de Pin maritime, la dose la plus faible utilisée (10 mg/litre) exerçant même dans ce cas-là un effet indiscutablement bénéfique.

L'aluminium apparaît donc comme moins toxique vis-à-vis du Pin qu'il ne l'est vis-à-vis du Maïs ; cette résistance relative du Pin maritime à un excès d'aluminium contribue, au moins partiellement, à expliquer la réussite de l'implantation de cette espèce dans les sols sableux acides des Landes de Gascogne ; la plus grande sensibilité du Maïs explique également les échecs souvent enregistrés quand on a tenté d'implanter ce type de culture sur d'anciens sols forestiers insuffisamment amendés.

CHAPITRE II

INFLUENCE DU CHAULAGE SUR LA PHYTOTOXICITÉ DE L'ALUMINIUM ÉCHANGEABLE DES SOLS ACIDES DU SUD-OUEST ATLANTIQUE

1. L'aluminium échangeable dans les différents types de sols acides du Sud-Ouest atlantique

Dans la première partie de ce travail, on a montré qu'une des principales caractéristiques des sols acides du Sud-Ouest atlantique était la présence d'aluminium échangeable.

Les taux les plus importants se rencontrent dans les sols du flysch mais aussi dans les sols formés sur les terrasses moyennes et supérieures du Quaternaire ancien des Basses-Pyrénées. Dans le cas de la zone sableuse des Landes de Gascogne, c'est surtout dans les horizons de surface des profils développés en lande humide qu'existent les teneurs les plus élevées ; à diverses reprises, on a insisté sur l'importance de ce fait car ce sont essentiellement les zones correspondant à la lande humide qui font précisément l'objet d'une remise en valeur agricole prioritaire, d'une part parce que la croissance du Pin maritime est généralement défectueuse sur ce type de sol et, d'autre part, parce que ces secteurs ont été fréquemment ravagés par l'incendie, la Molinie desséchée assurant, à certaines époques de l'année, une dissémination rapide du feu. En lande sèche, par contre, les taux de Al^{+++} échangeable sont faibles en surface et élevés au niveau des horizons illuviaux (alios) ; dans ce cas, les risques de toxicité n'existent que lorsque certaines pratiques culturales ont provoqué la remontée à la surface de ces horizons d'accumulation ou encore lorsque ces derniers sont originellement proches de la surface et qu'ils peuvent, de ce fait, être rapidement atteints par les systèmes racinaires.

En résumé, les sols qui sont susceptibles de poser le plus de problèmes liés à la présence de l'aluminium échangeable sont, d'une part, ceux du flysch créacé des Basses-Pyrénées et, d'autre part, ceux formés en lande humide (zone sableuse des Landes de Gascogne) ; c'est donc sur ces sols-là que nous avons procédé à l'étude, conduite en vases de végétation et en plein champ, de l'influence du chaulage sur la diminution du taux d'aluminium échangeable et sur l'accroissement des récoltes qui peut en résulter.

**2. Influence du chaulage sur la croissance de jeunes plantules d'Orge
cultivées dans un sol de défriche de touyas
(horizon de surface d'un profil développé sur le flysch crétacé)**

A. — TECHNIQUE UTILISÉE

Les essais ont été réalisés dans de petits vases de végétation en polystyrène, à drainage naturel, contenant chacun 250 g de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm, provenant d'une défriche récente de touyas de la région d'Hasparren (Basses-Pyrénées). Le pH initial de ce sol est de 4,8 et son taux de Al^{+++} échangeable de 0,590 p. 1 000. Chaque pot a reçu 25 graines d'Orge et une fumure standard comprenant, à l'hectare : 80 unités N, 80 unités P_2O_5 , 80 unités K_2O , appliquée sous forme d'ammonitrate, de superphosphate et de sulfate de potasse.

Un mois après la levée, les jeunes plantules ont été récoltées et l'on a déterminé le poids des parties aériennes (matière fraîche et matière séchée à 105°C) et celui de l'appareil racinaire (après séchage à 105°C). On a également déterminé les pH-eau et les taux d'aluminium échangeable des sols ayant subi les divers traitements.

B. — TRAITEMENTS EFFECTUÉS

On a comparé l'influence de 4 doses de chaux : 0, 3, 6, 9, tonnes de CaO/hectare, appliquées sous forme de carbonate de calcium, chaque traitement comportant 4 répétitions.

TABLEAU 36

*Influence du chaulage sur la croissance de jeunes plantules d'Orge
cultivées sur sol de défriche de touyas
(Sol formé sur le flysch crétacé)*

Traitement (¹)	Matière fraîche parties aériennes (²)	Matière sèche parties aériennes (³)	Augmentation matière sèche parties aériennes (³)	Matière sèche racines (³)	Augmentation matière sèche racines (⁴)	pH-eau	Al^{+++} échangeable (⁵)
0	3 840	830	0	230	0	5,0	0,526
3	7 490	1 790	116	850	228	5,5	0,265
6	7 820	1 730	109	870	283	6,0	0,080
9	8 450	1 960	135	880	285	6,9	0,000

(¹) tonnes de CaO/hectare ;

(²) en mg par vase de végétation ;

(³) en mg par vase de végétation (matière végétale séchée à 105°C) } moyennes de 4 répétitions.

(⁴) p. 100 d'augmentation par rapport au témoin non chaulé

(⁵) en p. 1 000 de terre fine séchée à l'air.

C. — RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSION

Au moment de la germination, les graines correspondant au traitement sans chaux tendent à se soulever hors du sol. Dix jours environ après la levée, l'extrémité des plantules correspondant au traitement témoin se décolore et cette chlorose gagne rapidement l'ensemble de l'appareil aérien, qui ne tarde pas à se dessécher. Les différences de développement de l'appareil racinaire sont encore plus spectaculaires (fig. 26) : les racines des plantules qui se sont développées dans le sol non chaulé sont épaisses, de couleur brune et très peu ramifiées, elles restent localisées à la partie supérieure des vases de végétation.

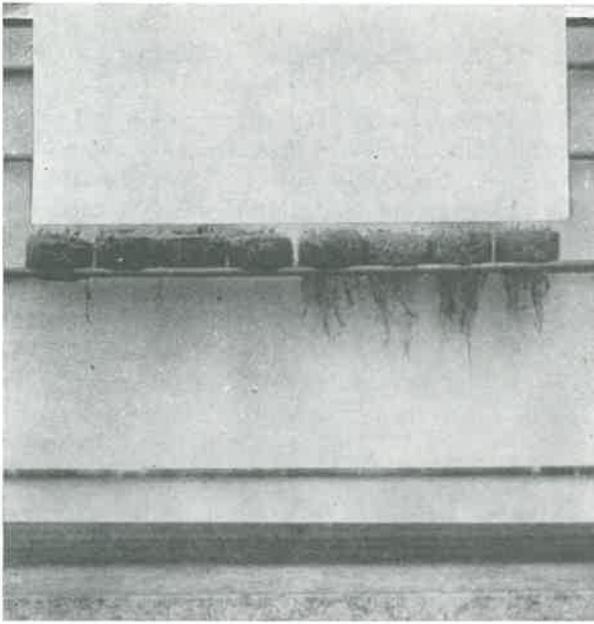


FIG. 26. — Influence du chaulage sur le développement de l'appareil racinaire de plantules d'Orge cultivées sur un sol de touyas

A gauche : 4 pots non chaulés.

A droite : 4 pots chaulés (9 t/ha de CaO).

Les résultats numériques (tabl. 36) confirment ces observations : bien que le maximum de rendement soit atteint pour la dose de chaux la plus élevée (9 t/ha CaO), les augmentations atteignent déjà 100 p. 100 pour la dose 3 t/ha de CaO. Le pourcentage d'augmentation du poids de l'appareil racinaire est deux fois plus important que celui des parties aériennes. On note également que la dose de chaux nécessaire pour neutraliser totalement l'acidité correspond à la plus forte dose utilisée, ce qui témoigne du pouvoir tampon très élevé de ce sol.

3. Influence du chaulage sur la croissance de jeunes plantules de Blé cultivées dans un sol de défriche de lande humide (zone sableuse des Landes de Gascogne)

A. — TECHNIQUE UTILISÉE

Elle est la même que celle décrite dans l'expérience précédente. Le sol provient d'une défriche récente d'un secteur de lande humide, antérieurement recouverte par de la Molinie. Chaque pot a reçu 16 graines de blé et l'on a procédé, un mois après la levée, aux mêmes déterminations que celles effectuées dans le cas de l'essai sur sol de touyas.

B. — TRAITEMENTS EFFECTUÉS

Bon nombre d'accidents de végétation qui se produisent dans les sols sableux des Landes de Gascogne étant attribués à des carences en oligo-éléments, notamment à des carences en cuivre, on a essayé de comparer dans cet essai l'influence respective du chaulage et d'un apport de cuivre sur la croissance des jeunes plantules ; à cet effet, les traitements appliqués ont été les suivants :

0 kg/ha de CaO	{	0 kg/ha de sulfate de cuivre 50 kg/ha de sulfate de cuivre 100 kg/ha de sulfate de cuivre
500 kg/ha de CaO	{	0 kg/ha de sulfate de cuivre 50 kg/ha de sulfate de cuivre 100 kg/ha de sulfate de cuivre
1 000 kg/ha de CaO	{	0 kg/ha de sulfate de cuivre 50 kg/ha de sulfate de cuivre 100 kg/ha de sulfate de cuivre

Chacun de ces traitements comporte 4 répétitions.

C. — RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSION (tabl. 37)

En l'absence de tout apport de cuivre, la dose la plus forte de chaux augmente de 39 p. 100 la récolte de matière sèche des parties aériennes ; cette augmentation est plus faible que celle enregistrée dans le cas de l'Orge sur sol de touyas, d'une part parce que le Blé est moins sensible à l'excès de Al^{+++} que l'Orge, d'autre part parce que ce sol est originellement moins riche en aluminium échangeable et, enfin, parce que la dose de chaux la plus élevée que l'on a utilisée n'est pas suffisante pour faire disparaître totalement l'aluminium échangeable. L'augmentation du poids de l'appareil racinaire demeure cependant du même ordre de grandeur que celle enregistrée pour l'Orge cultivée dans un sol de touyas (+ 282 p. 100).

En l'absence de tout apport de chaux, le sulfate de cuivre n'exerce aucune influence sur l'accroissement de la récolte, un léger effet dépressif se manifeste même pour la dose la plus forte (100 kg/ha de SO_4Cu) : ce résultat est extrêmement important car il confirme bien que, dans ces sols, la correction de certaines carences en oligo-éléments et notamment la correction de carences en cuivre apparaît comme beaucoup

TABLEAU 37

Influence comparée du chaulage et de l'apport de sulfate de cuivre sur la croissance de jeunes plantules de Blé cultivées sur un sol de lande humide
(Zone sableuse des landes de Gascogne)

CaO ⁽¹⁾	Traitements								
	0			500			1 000		
	0	50	100	0	50	100	0	50	100
SO_4Cu ⁽²⁾									
Parties aériennes mat. fraîche ⁽³⁾	0	- 9	- 10	18	23	24	53	83	58
Parties aériennes mat. sèche ⁽³⁾	0	- 15	- 6	13	24	18	39	51	24
Racines mat. sèche ⁽³⁾	0	17	3	217	260	243	282	296	233
pH-eau	4,8			5,3			5,6		
Al ⁺⁺⁺ échangeable en mg/kg de terre	136	136		69			21		

⁽¹⁾ Doses de chaux apportées : en kg de CaO à l'hectare ;

⁽²⁾ Doses de sulfate de cuivre apportées : en kg de sulfate de cuivre à l'hectare ;

⁽³⁾ Augmentation de la récolte : en p. 100 par rapport au témoin qui n'a reçu ni chaux ni sulfate de cuivre.

moins prioritaire que le relèvement du pH ; l'influence du cuivre ne se manifeste en effet que si cette condition est d'abord réalisée, l'optimum de récolte (+ 51 %) étant obtenu pour la dose de 50 kg/ha de sulfate de cuivre en présence de 1 000 kg/ha de CaO.

4. Influence du chaulage sur la croissance du Maïs cultivé en plein champ (sol de touyas des Basses-Pyrénées)

A. — PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Cet essai a été mis en place, en collaboration avec l'Association générale des Producteurs de Maïs, dans des touyas récemment défrichés de la région de Pau (Basses-Pyrénées) ; le sol, formé à partir d'alluvions anciennes, possède les caractéristiques initiales suivantes : éléments < 2 μ = 17 p. 100 ; pH-eau = 4,7 ; pH-KClN = 4,0 ; Al⁺⁺⁺ échangeable = 0,370 p. 1 000 ; Ca⁺⁺ échangeable = 0,050 p. 1 000.

L'essai a été mis en place au printemps 1963 et la fumure annuelle standard appliquée a été la suivante :

- azote : 140 unités/ha (sous forme d'urée) ;
- acide phosphorique : 180 unités/ha (sous forme de superphosphate de chaux) ;

- potasse : 150 unités/ha (sous forme de chlorure de potassium) ;
- magnésie : 200 unités/ha (sous forme de sulfate de magnésium).

Une localisation de phosphate d'ammonium a été également réalisée au moment du semis.

B. TRAITEMENTS EFFECTUÉS

Ils sont au nombre de cinq :

Traitement 1 : 0 kg/ha de CaO

Traitement 2 : 1 600 kg/ha de CaO apportés en 3 ans $\left\{ \begin{array}{l} 500 \text{ kg année I} \\ 500 \text{ kg année II} \\ 600 \text{ kg année III} \end{array} \right.$

Traitement 3 : 2 500 kg/ha de CaO apportés en 3 ans $\left\{ \begin{array}{l} 1\ 000 \text{ kg année I} \\ 500 \text{ kg année II} \\ 1\ 000 \text{ kg année III} \end{array} \right.$

Traitement 4 : 4 000 kg/ha de CaO apportés en 3 ans $\left\{ \begin{array}{l} 2\ 000 \text{ kg année I} \\ 500 \text{ kg année II} \\ 1\ 500 \text{ kg année III} \end{array} \right.$

Traitement 5 : 4 000 kg/ha de CaO apportés en 1 an : 4 000 kg année I

Chacun de ces traitements (dispositif expérimental type carré latin) comporte 5 répétitions, les dimensions des parcelles étant de 10 m \times 10 m.

C. — RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSION

Les hauteurs moyennes des pieds, déterminées au mois d'Août 1965, c'est-à-dire lors de la troisième année de culture du champ d'essai, figurent dans le tableau 33. On a également fait figurer dans ce tableau les caractéristiques des sols correspondant aux traitements extrêmes, soit 0 kg/ha de CaO et 4 000 kg/ha de CaO.

L'influence du chaulage est extrêmement spectaculaire puisque la dose de 4t/ha de CaO, apportée en une seule fois, entraîne, par rapport au témoin non chaulé, une augmentation de la hauteur moyenne des pieds de l'ordre de près de 400 p. 100 ; encore faut-il préciser que, dans les parcelles témoin, un nombre limité de pieds ont survécu (environ 10 à 15 p. 100), les survivants extériorisant un grand nombre de symptômes de carences (carences en magnésie, en acide phosphorique, en cuivre, en calcium et en azote notamment).

En ce qui concerne les caractéristiques du sol, l'apport le plus important de chaux n'a élevé le pH que de 8/10 d'unité et n'a pas fait totalement disparaître l'aluminium échangeable ; cette dose n'est donc pas suffisante pour neutraliser totalement l'acidité de ce sol et il est permis de penser qu'une dose plus forte d'amendement aurait pu améliorer encore la croissance du Maïs. L'application de la dose de chaux la plus importante n'a pas entraîné, trois ans après son incorporation au sol, une variation décelable du taux de carbone total des parcelles correspondant à ce traitement.

Cet essai confirme donc, dans les conditions mêmes de la pratique agricole courante, l'aspect absolument prioritaire d'un chaulage relevant suffisamment le pH pour la mise en valeur de ces types de sols.

TABLEAU 38

Influence du chaulage sur la croissance du Maïs cultivé en plein champ
(sol de touyas des Basses-Pyrénées)

Traitement	Hauteur moyenne des pieds de maïs (en cm)	Variation en % par rapport au témoin	pH-eau	pH-KCl N	en mg/kg de terre		en ‰ de terre
					Al+++ échangeable	Ca++ échangeable	
0 kg/CaO/ha	70	0	4,5	3,9	380	85	49
1 600 kg CaO/ha (apportés en 3 années)	180	+ 257					
2 500 kg CaO/ha (apportés en 3 années)	233	+ 333					
4 000 kg CaO/ha (apportés en 3 années)	262	+ 374					
4 000 kg CaO/ha (apportés en une année).....	280	+ 398	5,3	4,3	134	686	50

5. Conclusion

Les résultats fournis par les quelques essais qui viennent d'être décrits soulignent le rôle fondamental joué par le chaulage sur l'augmentation spectaculaire du développement végétatif de l'Orge, du Blé et du Maïs dans divers types de sols acides du Sud-Ouest atlantique riches en aluminium échangeable.

Ces résultats démontrent aussi que les doses de chaux les plus élevées qui ont été employées au cours de ces essais (doses qui sont largement supérieures à celles utilisées dans la pratique agricole locale) ne permettent pas de neutraliser entièrement l'acidité de ces sols ou tout au moins de faire disparaître totalement l'aluminium échangeable ; on peut donc penser que des doses un peu plus importantes que celles qui ont été utilisées auraient pu s'avérer encore plus bénéfiques.

QUATRIÈME PARTIE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'acidité très marquée et la présence de taux d'aluminium échangeable souvent très élevés constituent le caractère commun à un grand nombre de sols du Sud-Ouest atlantique.

Si les conditions climatiques de la région et la pauvreté originelle de la roche-mère en alcalins et alcalino-terreux paraissent avoir joué un rôle déterminant dans l'apparition de ce caractère, la végétation naturelle a joué un rôle non moins fondamental en favorisant plus particulièrement la mobilisation et la redistribution de l'aluminium.

C'est essentiellement à l'existence de ce caractère commun (acidité et présence d'aluminium échangeable) que les sols acides du Sud-Ouest atlantique doivent leur vocation de sols forestiers et de sols de landes. Leur reconversion en sols agricoles n'apparaît comme réalisable que dans la mesure où, en premier lieu, les taux d'aluminium échangeable qui les caractérisent (taux qui sont toxiques pour la plupart des plantes cultivées) seront suffisamment abaissés par la pratique d'un chaulage convenable.

Il ne semble malheureusement pas que l'on ait toujours obéi à cet impératif dans le Sud-Ouest atlantique où l'on n'a pas généralement accordé à la pratique, pourtant traditionnelle et élémentaire du chaulage, l'importance qui lui revient ; il faut surtout voir là la conséquence de la vulgarisation hâtive de résultats, très généraux et très rarement appuyés sur une expérimentation locale, se rapportant plus particulièrement au blocage des oligo-éléments et à la destruction du stock humique à la suite de chaulages trop abondants : en fait, on a pu observer, dans divers essais mis en place dans des sols de toudyas, que des chaulages de l'ordre de 4 t/ha de CaO effectués en une ou plusieurs fois n'entraînaient pas, au bout de quatre années, une variation décelable du taux de carbone total. Cette observation rejoint les résultats de WIKLANDER (1964) démontrant qu'un apport de calcaire équivalant à 12 t/ha de CaO n'a pas modifié, au bout de trente ans, le taux de matière organique d'un sol acide ; d'après cet auteur, l'augmentation de la masse des résidus végétaux, provoquée par l'accroissement des récoltes résultant lui-même d'un chaulage convenable, compenserait largement une éventuelle baisse du stock humique initial.

Il semble bien que l'on ne doive pas chercher ailleurs que dans la pratique insuffisante du chaulage et dans la persistance de taux trop importants d'aluminium échangeable qui en résulte l'une des causes principales des échecs enregistrés lors des tentatives de remise en valeur de certains sols acides du Sud-Ouest atlantique.

CINQUIÈME PARTIE

TECHNIQUES ANALYTIQUES

Nous ne décrivons en détail que les techniques particulières dont la mise en œuvre a été imposée par le sujet même de ce travail.

1. Dosage colorimétrique de l'aluminium

La méthode utilisée est, à quelques détails près, celle décrite par JONES et THURMAN (1957), méthode qui s'inspire elle-même de celle mise au point par HILL (1956) pour le dosage de Al^{+++} dans les minerais de fer.

A. — RÉACTIFS UTILISÉS

Ériochromecyanine

Sept cent cinquante milligrammes de l'indicateur coloré sont dissous dans 200 ml d'eau distillée ; on y ajoute 25 g de $ClNa$, 25 g de NO_3NH_4 , 2 ml de NO_3H concentré et l'on complète à 1 litre avec de l'eau distillée.

Tampon acéto-acétique, pH 6

Trois cent vingt grammes d'acétate d'ammonium sont dissous dans de l'eau distillée, on ajoute 5 ml d'acide acétique glacial et l'on complète à 1 litre avec de l'eau distillée.

Solution étalon d'aluminium

On obtient la solution mère en faisant dissoudre à chaud un certain poids d'aluminium métal en lames (500 mg pesés avec le maximum de précision) dans de l'acide chlorhydrique. A partir de cette solution initiale concentrée, on prépare une solution fille à 10 μg de Al^{+++} par ml.

Solution d'acide ascorbique

On prépare une solution aqueuse à 2 p. 100.

B. — TECHNIQUE OPÉRATOIRE

La colorimétrie s'effectue dans des fioles de 50 ml ; la gamme comprend les points suivants : 0, 2, 4, 6, 8 μg de Al^{+++} par fiole de 50 ml.

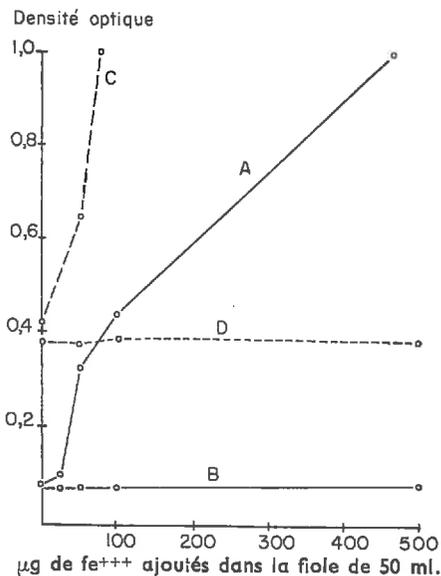
Dans chacune des fioles on introduit, dans l'ordre :

- la prise d'essai,
- 7 à 10 ml d'eau distillée,
- 5 ml de la solution d'ériochrome cyanine,
- 10 ml de tampon acéto-acétique,
- on complète à 45 ml environ avec de l'eau distillée, on ajoute 1 ml d'acide ascorbique et l'on complète à 50 ml avec de l'eau distillée. On agite énergiquement et l'on colorimètre à 5350 Å dans des cuves de 1 cm de largeur, 20 minutes après l'homogénéisation du liquide des fioles.

Compte tenu des modifications de pH qui peuvent se produire, malgré l'utilisation d'un volume important de tampon, à la suite de l'introduction de prises d'essai provenant de réactifs d'extraction ou de minéralisation très différents, on ajoute toujours dans les points de la gamme un volume de blanc d'extraction ou de minéralisation identique à celui de la prise d'essai. On élimine ainsi les risques d'erreurs qui pourraient résulter d'un déplacement du maximum d'absorption du complexe coloré à la suite d'une modification, même légère, du pH.

C. — ACTION DE L'ACIDE ASCORBIQUE SUR L'INTERFÉRENCE DE Fe^{+++}

Pour éliminer l'interférence de Fe^{+++} , JONES et THURMAN, ainsi que HILL, utilisent une solution compensatrice de fer et du thioglycolate de sodium. Nous avons substitué à l'utilisation de ces réactifs celle de l'acide ascorbique à 2 p. 100 ; il est à noter qu'une solution comparable est utilisée par BUCK (1965) dans le cas du dosage de l'aluminium par le chromazurol S dans les minerais de fer.



- A : Densité optique mesurée pour une concentration en Al^{+++} de 2 µg/50 ml et des concentrations croissantes en Fe^{+++} (0, 20, 50, 100, 500 µg de Fe^{+++} /50 ml) ;
- B : Densité optique mesurée pour une concentration en Al^{+++} de 8 µg/50 ml et des concentrations croissantes en Fe^{+++} en présence de 1 ml d'acide ascorbique à 2 % ;
- C : Densité optique mesurée pour une concentration en Al^{+++} de 8 µg/50 ml et des concentrations croissantes en Fe^{+++} (0, 20, 50, 100, 500 µg de Fe^{+++} /50 ml) ;
- D : Densité optique mesurée pour une concentration en Al^{+++} de 8 µg/50 ml et des concentrations croissantes en Fe^{+++} en présence de 1 ml d'acide ascorbique à 2 %.

FIG. 27. — Élimination, par introduction d'acide ascorbique, de l'interférence due à la présence de Fe^{+++} au cours du dosage colorimétrique de Al^{+++} par l'ériochrome cyanine

La figure 27 et la comparaison de deux gammes effectuées, l'une en l'absence de fer et l'autre en présence de fer et d'acide ascorbique à 2 p. 100 (tabl. 39), indiquent bien que la présence d'un réducteur puissant comme l'acide ascorbique suffit à supprimer à peu près totalement l'interférence du fer.

TABLEAU 39

Élimination par l'addition d'acide ascorbique de l'interférence due à la présence de Fe^{+++} au cours du dosage colorimétrique de Al^{+++}

Concentrations en Al^{+++} (μg par fiole de 50 ml)	Densités optiques	
	Mesurées en l'absence de Fe^{+++}	Mesurées en présence de 100 μg de Fe^{+++} et de 1 ml d'acide ascorbique à 2 % par fiole de 50 ml
2	0,055	0,057
4	0,147	0,142
6	0,241	0,243
8	0,342	0,334

2. Déterminations se rapportant aux sols

A. — ALUMINIUM ÉCHANGEABLE

Dix grammes de sol sont agités pendant 1 heure en présence de 100 ml d'une solution normale de chlorure de potassium. On laisse reposer pendant 2 heures et l'on recueille le surnageant par filtration ; l'aluminium est dosé dans une partie aliquote de ce dernier (prise d'essai variant de 0,5 à 2 ml selon la richesse présumée de l'échantillon en aluminium échangeable), par colorimétrie du complexe ériochrome-cyanine- Al^{+++} .

B. — ALUMINIUM ET FER SOLUBLES DANS LES ACIDES FORTS

Deux grammes de sol sont incinérés au four électrique à 480°C pendant 1 heure ; cette incinération libère l'aluminium et le fer liés aux composés humiques ou encore intégrés dans la matière végétale du sol en voie de décomposition. Le résidu de la calcination est transvasé dans un bécber, dans lequel on ajoute un mélange comprenant 50 ml d'acide chlorhydrique pur pour 10 ml d'eau distillée ; on porte à ébullition au bain de sable pendant 1 heure et l'on récupère le surnageant, après filtration, dans une fiole de 200 ml que l'on complète avec de l'eau distillée. L'aluminium et le fer sont dosés dans des parties aliquotes par colorimétrie du complexe ériochrome-cyanine- Al^{+++} et du complexe orthophénantroline- Fe^{++} (SANDELL, 1959).

Les sesquioxydes de fer et d'aluminium déterminés selon cette technique sont conventionnellement désignés par Fe_2O_3 S.A. et Al_2O_3 S.A. (S.A. = soluble dans les acides forts). Il est en effet bien évident que l'on n'extrait pas par cette opération la totalité du fer ni surtout de l'aluminium du sol et, en conséquence, il serait erroné de qualifier de fer total et d'aluminium total les quantités de ces métaux déterminées selon cette technique. Cependant, cette méthode d'extraction donne des valeurs qui sont certainement plus proches de celles représentant le fer total et l'aluminium total que celles qui sont fournies : soit par une attaque nitroperchlorique, soit *a fortiori* par l'attaque à l'aide d'un réactif plus doux comme celui de TAMM.

C. — COMPOSÉS HUMIQUES

a) *Extraction et dosage des acides humiques et fulviques*

Cinq grammes de sol sont agités pendant 1 heure en présence de 100 ml d'une solution de pyrophosphate de sodium 0,1 M. Après centrifugation (5 minutes à 4 000 tours/minute) le surnageant est acidifié par de l'acide sulfurique pur jusqu'à pH 1. Après une nuit de précipitation, les acides humiques sont séparés de la fraction fulvique par centrifugation ; ils sont redissous dans de la soude en solution normale, la solution alcaline obtenue étant ensuite neutralisée par addition d'un volume identique d'acide sulfurique normal. Les deux extraits ainsi obtenus (extrait fulvique et extrait humique) sont évaporés à 105°C et l'on dose le carbone contenu dans le résidu de l'évaporation par la méthode ANNE (1945).

b) *Fractionnement chimique*

La technique utilisée est celle décrite par DUCHAUFOR et JACQUIN (1963).

Cinq grammes de sol sont agités pendant 1 heure en présence de 100 ml d'une solution de pyrophosphate de sodium à 1 p. 100 additionnée de 5 p. 100 de chlorure de sodium. Après agitation, la suspension est centrifugée pendant 5 minutes à 4 000 tours/minute. Le surnageant est recueilli dans un bécher A et l'on agite à nouveau le culot pendant 1 heure au contact de la même solution d'extraction ; le surnageant est récupéré, après centrifugation, dans le même bécher A.

Le culot est une nouvelle fois agité pendant 1 heure en présence d'une solution de pyrophosphate de sodium à 1 p. 100 dépourvue de chlorure de sodium. Après centrifugation, le surnageant est recueilli dans un bécher B ; le culot est à nouveau agité pendant 1 heure avec la même solution d'extraction et le surnageant centrifugé est également recueilli dans B.

Une prise d'essai de 75 ml de l'extrait organique de chacun des deux béchers est amené à pH 1 par addition d'acide sulfurique pur. On laisse la précipitation des acides humiques se poursuivre durant toute une nuit et on les sépare ensuite de la fraction fulvique par centrifugation ; on les rince deux fois de suite par de l'acide sulfurique N/10 et on les redissout par 10 ml de soude normale ; on complète à 100 ml. Dans une partie aliquote de cette solution alcaline, on ajoute 20 ml de permanganate de potassium N/10, on fait bouillir pendant 10 minutes et l'on titre en

retour, après addition de 25 ml d'acide sulfurique au 1/5, par de l'acide oxalique N/10. La correspondance entre nombre de ml de permanganate de potassium N/10 et nombre de mg de carbone est établie en tenant compte de la teneur en carbone des acides humiques totaux, déterminée selon la méthode ANNE (voir § a).

Les acides humiques précipités à partir du bécher A correspondent aux acides humiques bruns et ceux précipités à partir du bécher B correspondent aux acides humiques gris.

Les acides fulviques sont dosés de la même manière, leur pH étant préalablement ajusté à 7 par addition de soude 5 N.

c) *Fractionnement par électrophorèse et dosage de Al^{+++} et de Fe^{+++} contenus dans les électrophorégrammes*

Cinq grammes de sol sont agités pendant 1 heure en présence de 100 ml d'une solution de pyrophosphate de sodium 0,1 M. Après centrifugation, le surnageant est acidifié par de l'acide chlorhydrique pur jusqu'à pH 1. Après une nuit de précipitation, les acides humiques sont séparés par centrifugation et redissous, après rinçage à l'eau distillée, dans 1 ml de soude en solution normale.

Cinquante microlitres de l'extrait sodique ainsi obtenu sont soumis à l'électrophorèse pendant 3 heures ; le tampon utilisé pour cette opération est le tampon boraté de COULSON et EVANS (1958) (solution de tétraborate de sodium : 9,54 g/litre, pH = 9). La tension appliquée est de 7 volts/cm et la dépose est effectuée sur une zone de 5 cm de largeur, la bande de papier (Whatman n° 1) ayant été préalablement imprégnée du tampon et équilibrée pendant 1/4 d'heure avec le liquide des cuves (JACQUIN, 1963).

Après séchage, les électrophorégrammes sont découpés selon deux bandes perpendiculaires au sens de la migration, la largeur de ces bandes étant choisie de telle manière qu'elles englobent totalement : l'une, les acides humiques bruns et l'autre, les acides humiques gris. Ces bandes sont incinérées au four pendant 1 heure à 480°C ; le résidu est repris par 5 ml d'acide chlorhydrique pur que l'on porte à ébullition ; l'extrait acide est ajusté à pH 3 par addition d'ammoniaque puis transvasé dans une fiole de 50 ml que l'on complète par de l'eau distillée. Le fer et l'aluminium sont dosés dans des parties aliquotes de cet extrait par colorimétrie du complexe orthophénantroline- Fe^{++} et du complexe ériochrome-cyanine- Al^{+++} .

d) *Étude par spectroscopie infrarouge*

Cinq grammes de sol sont agités pendant 1 heure au contact de 100 ml de pyrophosphate de sodium 0,1 M. Après centrifugation, le surnageant est précipité par de l'acide chlorhydrique pur et après une nuit de précipitation les acides humiques sont séparés par une nouvelle centrifugation. On les rince deux fois avec 50 ml d'eau distillée, puis on les place pendant 48 heures à l'étuve à 60°C ; ils sont ensuite broyés finement puis mélangés, au vibreur, avec du bromure de potassium (1 mg d'acides humiques pour 100 mg de KBr) ; le mélange est pressé à 20 t/cm² pendant 2 minutes et la pastille obtenue est examinée à l'aide d'un appareil à optique de chlorure de sodium (Unicam S.P. 200).

3. Déterminations se rapportant aux végétaux

A. — PRÉPARATION ET MINÉRALISATION DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX

Les échantillons végétaux sont rapidement rincés dans un bécher contenant de l'eau distillée pour éliminer le maximum d'impuretés minérales qui peuvent les souiller ; ils sont ensuite séchés à l'étuve à 105°C puis broyés au mixer. La poudre végétale obtenue est placée à l'étuve jusqu'à poids constant ; la minéralisation d'une partie aliquote (500 mg) s'effectue au four électrique (1 heure à 480°C). Le résidu de la calcination est repris par 5 ml d'acide chlorhydrique pur que l'on porte à ébullition pendant quelques minutes ; après refroidissement, on filtre et l'on transvase dans une fiole de 100 ml que l'on complète aux 3/4 environ avec de l'eau distillée ; le pH de cette solution est ajusté à 3 par addition d'ammoniaque puis l'on complète à 100 ml avec de l'eau distillée. Les dosages des différents éléments sont effectués dans des parties aliquotes de ce liquide de minéralisation. Toutes les minéralisations ont comporté deux répétitions.

B. — DOSAGE DE L'ALUMINIUM

Colorimétrie du complexe ériochrome-cyanine- Al^{+++} (prise d'essai variant de 5 à 10 ml).

C. — DOSAGE DU FER

Colorimétrie du complexe orthophénantroline- Fe^{++} (prise d'essai de 5 ml).

D. — DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE

Colorimétrie à 8 500 Å du phosphomolybdate réduit par l'acide ascorbique (DUVAL, 1962).

E. — DOSAGE DU CALCIUM, DU MAGNÉSIUM ET DU POTASSIUM

Dosage par photométrie de flamme en milieu oxine (DELAS, 1964) ; dans une fiole de 50 ml, on introduit :

- 25 ml du liquide de minéralisation ;
- 12,5 ml d'oxine à 20 p. 100 en solution acétique (solution aqueuse contenant 400 ml d'acide acétique glacial par litre) ;
- 10 ml d'acide chlorhydrique à 50 p. 100 ;
- on complète à 50 ml avec de l'eau distillée.

La solution est pulvérisée dans une flamme oxygène-hydrogène (photomètre de

flamme Beckman DU), les longueurs d'onde utilisées pour le dosage des différents éléments étant les suivantes :

Ca ⁺⁺	4 227 Å
Mg ⁺⁺	2 852 Å
K ⁺	7 765 Å.

L'utilisation de l'oxine qui permet, entre autres, de supprimer l'effet dépressif qu'exerce l'aluminium sur l'émission des alcalino-terreux est particulièrement nécessaire dans ce travail car certains liquides de minéralisation de végétaux (notamment ceux correspondant aux parties aériennes de plantules de maïs qui ont été alimentées par une solution nutritive riche en Al⁺⁺⁺) peuvent effectivement contenir des quantités notables d'aluminium qui pourraient gêner le dosage de Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE ALUMINIUM DYNAMIC IN THE ACID SOILS OF THE ATLANTIC SOUTH-WEST : APPLICATION TO THEIR RECLAMATION

In the first part of this paper, the present distribution of the exchangeable aluminium as well as that of the aluminium and iron soluble in strong acids is studied in a certain number of type-profiles belonging to two characteristic pedological groups of the atlantic South-West : soils of the sandy area of Gascogne Landes on one hand and loamy-clay soils formed on cretaceous flysch or on the older terrasses of the Quaternary (Basses-Pyrénées) on the other.

In the sandy area of Gascogne Landes, the exchangeable aluminium and the aluminium soluble in strong acids are accumulated in the upper horizons of the profiles which were formed in strongly hydromorphic conditions (damp wastes) ; in the case of profiles formed on dry wastes, there is an accumulation of the exchangeable aluminium and of the aluminium and iron soluble in strong acids, in the illuvial horizons, the outwash index of Al⁺⁺⁺ always being superior to that of Fe⁺⁺⁺.

In the loamy-clay soils of the flysch and of the older quaternary terrasses, the differences in the Al⁺⁺⁺ and Fe⁺⁺⁺ distribution are not so clear ; one notices, however, an accumulation of the exchangeable aluminium at the surface of the profiles developed on old quaternary terrasses where the hydromorphic character is stronger and the organic-matter content higher.

In the second part of the paper, some of the factors which are susceptible of taking part in the mobilization and the redistribution of Al⁺⁺⁺ and Fe⁺⁺⁺ in these soils are studied. The action of a certain number of organic acids identified in the leaf litter has been tested (citric, oxalic, acetic, ascorbic acids) : these acids would mobilize proportionally more iron than aluminium, and the most effective in this respect seems to be the oxalic acid. The comparison between the Al⁺⁺⁺/Fe⁺⁺⁺ ratios in the vegetation and the Al⁺⁺⁺/Fe⁺⁺⁺ ratios in the soil shows that the plants adapted to these soils behave for the greater part, as preferential extraction reagents towards aluminium in comparison with iron. It is difficult to ascribe to the humic acid a definitive part in the transport of Al⁺⁺⁺ and Fe⁺⁺⁺ along the profile, for one cannot prove with certainty, that these metals are not part of the mineral impurities which are simply juxtaposed to the humic colloids.

On the other hand, however, it is shown that the Al⁺⁺⁺ in the vegetable remains of the litter possesses a greater water solubility than the iron contained in those same vegetable remains ; this solubilization would take place in the form of organo-metallic complexes in which the organic fraction is represented by the phenolic acids (particularly *ortho*- and *para*-coumaric acids).

From this, one concludes that, in the acid soils of the atlantic South-West, the vegetation appears to have played a determinant part in the different dynamics of Al⁺⁺⁺ and Fe⁺⁺⁺, by mobilizing more Al⁺⁺⁺ than Fe⁺⁺⁺ on one hand, and by giving to the mobilized Al⁺⁺⁺ a greater mobility than to iron ; the dynamic of Fe⁺⁺⁺ appears, for this reason, to be of an essentially chemical order, whereas the Al dynamic would much more depend on biological processes.

The third part of the work is dedicated to the study of the agronomical problems arising by the existence of often important rates of mobile Al⁺⁺⁺ in the upper horizons of these soils ; by the

means of cultural techniques on synthetical media, one can confirm that Al^{+++} has a specific toxic action on young plantlets of *Zea mays* and *Pinus pinaster*; the influence of this metal on the absorption of P by excised Maize roots has been studied : there is almost always a stimulating effect of Al^{+++} on the anion absorption — Liming trials carried out in glass-houses or in the field put into evidence the fundamental character of this practice for the systematic reclamation of the acid soils in the area of the atlantic South-West.

SIXIÈME PARTIE

BIBLIOGRAPHIE

- AGAFONOFF V., 1936. *Les sols de France au point de vue pédologique*. Dunod, Paris.
- AHMAD M., 1960. Aluminium toxicity of certain soils on the coast of British Guiana and problems of their agricultural utilization. *7^e Congr. Intern. Sci. Sol*, **2**, 161-170.
- ALEXANDROVA L. N., 1960. On the composition of humus substances and the nature of organo-minerals colloids in soils. *7^e Congr. Intern. Sci. Sol*, **2**, 74-31.
- ANNE P., 1945. Dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, 161-172.
- ANTIPOV-KARATAYEV L. N., TSUYURUPA V. V., 1963. Problems concerning the zonality of rock weathering and the formation of secondary finely dispersed minerals. *Soviet Soil Sci.*, 924-930.
- ARISTOVSKAYA T. V., 1963. Decomposition of organo-mineral compounds in podzolic soils. *Soviet Soil Sci.*, 20-29.
- ARVIEU J. C., CHAUSSIDON J., 1964. Étude de la solubilisation acide d'une illite : extraction du potassium et évolution des résidus. *Ann. agron.*, **15**, 207-229.
- BAERT de BIÈVRE M., VAN DEN HENDE A., LOX F., 1961. Étude de la fixation de l'ammonium dans deux sols argileux à l'aide de ¹⁵N. *Pédologie Symp. Intern. 2. Appl. Sci. Nucl. Pédologie*.
- BERTRAND G., LÉVY G., 1931. La teneur des plantes, notamment des plantes alimentaires, en aluminium. *C. R. Acad. Sci.*, **192**, 525-529.
- BÉTRÉMIEUX R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. agron.* 193-295.
- BLOOMFIELD C., 1954. A study of podzolisation. *J. Soil Sci.*, **5**, 39-56.
- BLOOMFIELD C., 1956. The solution reduction of ferric oxide by aqueous leaf extracts. The role of certain constituents of the extracts. *6^e Congr. Intern. Sci. du Sol*, **B**, 427-432.
- BROADBENT F. E., NAKASHIMA T., 1963. Nitrogen immobilization. *Agron. Abstracts*, **5**.
- BROMFIELD S. M., 1954. The reduction of iron oxide by bacteria. *J. Soil Sci.*, **5**, 129-139.
- BUCK L., 1965. Dosage photométrique rapide de l'aluminium à l'aide du chromazurol S dans les aciers non alliés et les minerais de fer. *Chim. Anal.*, **47**, 10-16.
- BURROWS G. J., WARK I. W., 1928. The coordination valency of aluminium in its salicylate derivatives. *J. Chem. Soc.*, **130**, 222-229.
- CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1951. Étude des alios des Landes. *Ann. agron.* 296-316.
- CATE R. B., SUKHAJ A. P., 1964. A study of aluminium in rice soils. *Soil Sci.*, **98**, 902-904.
- CHAMINADE R., 1962. Désorption par la chaleur de l'ion ammonium fixé par les argiles. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 902-904.
- CHAMURA S., HOSKI A., 1962. The relationship between the acid tolerance of crops and low pH : uptake of K⁺ ions in passive and active process. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, **31**, 108-111.
- CHAUDRI I. I., SHAH B. H., NAQUI N., MALLICK I. A., 1964. Investigation on the role of *Suzeda fructicosa* in the reclamation of saline and alkaline soils West Pakistan plains. *Plant and Soil*, **31**, 1-7.
- CHAUSSIDON J., VILAIN M., 1962. Étude cinétique de la dissolution acide d'une vermiculite. *Ann. agron.*, **13**, 5-19.
- CHENERY E. M., 1948. Aluminium in the plant world. *Kew Bull.* 173-183.
- CHENERY E. M., 1955. A preliminary study of aluminium and the tea bush. *Plant and Soil*, **4**, 174-220.
- CHOUBERT B., HÉNIN S., BÉTRÉMIEUX R., 1952. Essai de purification de bauxites riches en constituants ferrugineux. *C. R. Acad. Sci.*, **234**, 2463-2465.
- CLYMO R. S., 1962. An experimental approach to part of the calcicole problem. *J. Ecol.*, **5**, 707-731.
- COLEMAN N. T., CRAIG D., 1961. The spontaneous alteration of hydrogen clay. *Soil Sci.*, **91**, 14-18.
- COOK M. G., RICH C. L., 1963. Negative charge of diocathedral micas as related to weathering. *Proc. 11th Nation. Conf. Clays*, 47-64.
- COULSON C. E., EVANS W. C., 1958. Paper chromatography and paper electrophoresis of phenols and glycosides. *J. Chromatogr.*, **1**, 374-379.
- DARTIGUES A., DELMAS J., DUTIL P., 1963. Les sols de toudous des Basses-Pyrénées. *Rev. gén. Sci.*, **71**, 267-284.
- DELAS J., 1964. Spectrophotométrie de flamme en milieu oxine. Application aux dosages du calcium et du magnésium dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **15**, 633-649.
- DELMAS J., 1955. Landes de Gascogne, terres de sables. *Agriculture*, 164, 1-4.
- DELMAS J., DUTIL P., 1964. A propos d'une unité pédologique dans la région des Basses-Pyrénées. *Sci. du Sol*, **2**, 54-52.

- DELMAS J., THEILLER G., 1955. Étude des grands types de sols du Sud-Ouest aquitain. *Ann. agron.*, 569-582.
- DE LONG W. A., SCHNITZER 1955. Investigation on the mobilization and transport of iron in forested soils. I. The capacities of leaf extracts and leachates to react with iron. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 360-368.
- DIOS VIDAL R., BROYER T. C., 1962. Efecto de niveles altos de magnesio en la absorcion del aluminio y en el crecimiento del maiz en soluciones de cultivo. *Ann. Edafol. Fisiol. veget.*, 21, 13-30.
- DUCHAUFOR Ph., 1948. Recherches écologiques sur la Chênaie atlantique française. *Ann. Éc. nation. Eaux Forêts.*
- DUCHAUFOR Ph., 1948. Note sur les sols landais et sur le problème de leur amélioration. *C.R. Acad. Agric.* 7-4-1948.
- DUCHAUFOR Ph., 1949. L'évolution pédologique des sols landais. *Cah. Ing. agron.*, 4, 41-43.
- DUCHAUFOR Ph., 1957. Tableau descriptif des sols. *Ann. Éc. nation. Eaux Forêts.*
- DUCHAUFOR Ph., 1957. Sur le rôle de la matière organique dans les phénomènes de lessivage et de podzolisation. *C. R. Acad. Sci.*, 248, 1154-1157.
- DUCHAUFOR Ph., 1957. Note sur les phases de la podzolisation sur grès vosgien. 6^e Congr. intern. Sci. Sol, E, 367-380.
- DUCHAUFOR Ph., 1957. Note sur l'influence du fauchage de la litière sur l'évolution des sols et de la végétation des forêts du Sud-Ouest. *Rev. Forest. Fr.*, 1., 750-760.
- DUCHAUFOR Ph., 1963. Note sur le rôle du fer dans les complexes argilo-humiques. *C. R. Acad. Sci.*, 256, 2657-2660.
- DUCHAUFOR Ph., JACQUIN F., 1963. Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par l'électrophorèse. *Ann. agron.*, 14, 885-918.
- DUCHAUFOR Ph., 1964. Évolution de l'aluminium et du fer complexés par la matière organique dans certains sols. *Sci. du Sol*, 2, 3-17.
- DUCHAUFOR Ph., 1964. Sur la dynamique de l'aluminium dans les sols podzoliques. *C. R. Acad. Sci.*, 250, 3307-3309.
- DUCHAUFOR Ph., 1965. *Précis de Pédologie*. Masson, Paris.
- DUTIL P., JUSTE C., 1964. Phytotoxicité de l'aluminium dans les sols des Landes en relation avec la présence d'alios à faible profondeur. *C. R. Acad. Agric.*, 5., 434-441.
- DUVAL L., 1962. Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais. *Ann. agron.*, 13, 469-482.
- DYAKANOVA K. V., 1962. Iron humus complexes and their role in plant nutrition. *Soviet Soil Sci.*, 692-698.
- EECKMAN J. P., MASSART Y., LAUDELOUT H., 1959. Stabilité chimique et propriétés catalytiques des suspensions de montmorillonite acide. *Bull. Gr. fr. Argiles* 11, 3-8.
- ENJALBERT H., 1960. *Les pays aquitains. I. Le modelé et les sols*. Imprimerie Bière, Bordeaux.
- ERHART H., 1955. Biostasie et Rhexistasie. *C. R. Acad. Sci.*, 241., 1218-1220.
- EHRHART H., 1956. *La genèse des sols en tant que phénomène géologique*. Masson, Paris.
- EVANS W. D., 1962. The organic solubilization of minerals in sediments. *Adv. Organ. Geochem.*, Milan, 263-270.
- EVANS W. D., 1965. Facets of organic geochemistry. *In Experimental Pedology*, 14-18. Hallsworth-Crawford, Londres.
- FABER F. C., 1927. Die Kraterpflanzen Javas in Physiologisch-Ökologischer Beziehung. *Arb. Trenb-Lab. Weltevreden*, 1.
- FOY C. D., BROWN J. C., 1963. Toxic factors in acids soils I. Characterization of aluminium toxicity in cotton. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27, 403-407.
- FOY C. D., BROWN J. C., 1964. Toxic factors in acids soils : II. Differential aluminium tolerance of plant species. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 27-32.
- GASTUCHE M. C., 1957. L'aluminium libre en surface de la kaolinite. *Bull. Gr. fr. Argiles*, 9, 49-59.
- GASTUCHE M. C., VIELVOYE L., 1960. Cinétique comparée de l'attaque de l'hydrargillite et d'un gel d'alumine par l'acide chlorhydrique. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 1216-1222.
- GASTUCHE M. C., 1963. Kinetics of acid dissolution of biotite. *Intern. Clay Confer.*, 67-83.
- GRADUSOV B. P., 1959. The effect of forest litters on the chemical properties of soils in the sub-zone of the southern taiga. *Pochvovedenie*, 8, 111-116.
- HACKETT C., 1962. Stimulative effects of aluminium in plant growth. *Nature*, 195, 471-472.
- HARRIS S. A., 1961. Soluble aluminium in plants and soils. *Nature*, 189, 513-514.
- HARWARD M. E., COLEMAN N. T., 1954. Some properties of H⁺ and Al⁺⁺⁺ clays and exchange resins. *Soil Sci.* 78, 181-183.
- HARTWELL B. L., PEMBER F. R., 1918. The presence of aluminium as a reason for the difference in the effect of so called acid soil on barley and rye. *Soil Sci.*, 6, 259-278.
- HÉNIN S., BÉTRÉMIEUX R., 1948. Essai de pédologie expérimentale. *C. R. Acad. Sci.*, 227, 1393-1395.
- HÉNIN S., 1956. Quelques oxydes et hydroxydes considérés du point de vue pédologique. *Bull. Gr. fr. Argiles*, 8, 1-10.

- HESSE P. R., 1963. Phosphorus relationships in a mangrove-swamp mud with particular reference to aluminium toxicity. *Plant and Soil*, **19**, 205-218.
- HIATT A. J., AMOS D. F., MASSEY H. F., 1963. Effect of aluminium on copper sorption by wheat. *Agron. J.*, **55**, 284-285.
- HILL U. T., 1956. Direct photometric determination of aluminium in iron ore. *Anal. Chem.*, **28**, 1419-1424.
- HINMAN W. C., 1964. Fixed ammonium fixation in some Saskatchewan soils. *Canad. J. Soil Sci.*, **44**, 151-157.
- HOFFMAN W., 1964. The integrated effects of pH, phosphate fixation and soluble aluminium and iron in clay soils with a high humus content on the growth of plants. *Z. Pflanzenernähr*, **107**, 223-241.
- HORECKER B. L., STOTZ E., HOGNESS R. T., 1939. The promoting effect of aluminium, chromium and the rare earth on succinic deshydrogenase cytochrome *c* system. *J. Biol. Chem.*, **128**, 251-256.
- HORTENSTINE C. C., FISKELL J. G. A., 1961. Effects of aluminium on sunflower growth and uptake of boron and calcium from nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 304-307.
- HUMPHREYS F. R., TRUMAN R., 1964. Aluminium and the phosphorus requirements of *Pinus radiata*. *Plant and Soil*, **20**, 131-134.
- HUTCHINSON G. E., 1945. Aluminium in soils, plants and animals. *Soil Sci.*, **60**, 29-40.
- JACQUIN F., 1963. *Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques*. Thèse, Nancy.
- JACQUIN F., BRUCKERT S., 1965. Identification et évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières. *C. R. Acad. Sci.*, **260**, 4556-4559.
- JACQUIN F., JUSTE C., DUREAU P., 1965. Contribution à l'étude de la matière organique des sols sableux des Landes de Gascogne. *C. R. Acad. Agric.* (en cours d'impression).
- JOHNSON R. E., JACKSON W. A., 1964. Calcium uptake and transport by wheat seedlings as affected by aluminium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 381-386.
- JONES L. H., THURMAN D. A., 1958. The determination of aluminium in soil ash and plant material using Eriochrome cyanine R. A. *Plant and Soil*, **9**, 131-142.
- JONES L. H., 1961. Aluminium uptake and toxicity in plants. — *Plant and Soil*, **13**, 297-310.
- JUSTE C., DUREAU P., 1964. Étude par spectroscopie infrarouge de différentes fractions d'acides humiques extraites d'un podzol humo-ferrugineux développé sur sable quartzueux. *C. R. Acad. Sci.*, **259**, 612-614.
- JUSTE C., DUTIL P., 1965. Importance relative du fer et de l'aluminium dans les sols sableux des Landes de Gascogne. *Sci. du Sol*, **1**, 33-42.
- JUSTE C., 1964. Influence du chaulage sur la phytotoxicité de l'aluminium mobile d'un sol de défriche riche en colloïdes minéraux. *Ann. agron.*, **15**, 5-22.
- KAC-KACAS M., MALINSKA H., 1963. The dynamic of soil acidity. *Roczn. glebozn.*, **13**, 220-222.
- KAPLYUCK L. F., 1963. Qualitative composition of humus in the soils of the Ob forest-tundra and its change under the influence of cultivation. *Soviet Soil Sci.*, 401-499.
- KARAYEVA Z. S., 1963. Ash composition of some plants in the Bet-Pak-Dala desert. *Soviet Soil Sci.*, 273-280.
- KARPACHEVSKIY L. O., 1963. Effects of various species of trees in the volcanic soils of Kamtchatka. *Soviet Soil Sci.* 1121-1130.
- KARTHASHOV YU D., 1961. Characteristics of the action on soil of leaf fall and litter of pine and Dahurian larch in the basin of the River Olekma Yakut S. S. S. R. *Dokl. s. Kh. Akad. Timiryazeva*, **72**, 247-254.
- KAURICHEV I. S., KULAKOV E. V., NOZDRUNOVA E. M., 1960. The nature of complex ferro-organic compounds in soils. *Dokl. Sovet. Pochvovedov.*, 7. *Mezhdunarod Kong Soed. Shtat Ameriki*. 137.
- KAURICHEV I. S., IVANOVA T. N., NODZDRUNOVA K. A., 1963. Low molecular organic acid content of water soluble organic matter in soils. *Soviet Soil Sci.*, 223-229.
- KONONOVA M. M., TITOVA N. A., Use of paper electrophoresis for fractionating the humic substance of soil and studying their complexe compounds with iron. *Pochvovedenie* **11**, 81-88.
- KOVDA V., Composition minérale des plantes et formation des sols. *6^e Congr. Sci. Sol.*, **E**, 201-206.
- LAUDELOUT H., 1957. Étude de la répartition des charges sur les surfaces des particules argileuses. *Bull. Gr. fr. Argiles* **9**, 61-76.
- LAUDELOUT H., ECKMAN J. P., 1960. La stabilité chimique des suspensions d'argile saturée par l'ion hydrogène. *Vech. II u. IV Komm. I. B. G.*, Hamburg, **2**, 193-199.
- LEVINA V. I., 1960. Characteristics of the exchange of mineral elements between a moss-lichen-shrub cover and the soil in two type of pine forests of the Kola peninsula. *Pochvovedenie* **5**, 30-42.
- LIEBIG G. F., VANSELOW A. P., CHAPMAN H. D., 1942. Effects of aluminium on copper toxicity as revealed by solution culture and spectrographic studies of citrus. *Soil Sci*, **53**, 341-351.
- LIVENS J., VANSTALLEN R., 1957. Water extracts of decomposing litters: their reaction and base content. *Agricultura*, Louvain, **5**, 99-119.
- LOSSAINT P., 1959. *Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières*. Thèse, Strasbourg.
- LOVERING T. S., 1958. Geological significance of accumulator plants in rock weathering. *Science*, **127**, 1061-1062.

- MAC LEAN E. O., HOURRIGAN W. R., SHOEMAKER H. E., BHUMBLA D. R., 1964. V. Form of aluminium as a cause of soil acidity and complication in its measurements. *Soil Sci.* **97**, 119-126.
- MAGISTAD O. C., 1925. The aluminium content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. *Soil Sci.* **2**, 181-213.
- MAGNIEN R., 1958. *Contribution à l'étude du cuirassement des sols en Guinée française*. Thèse, Strasbourg.
- MANAKOV K. N., 1962. Supply of nitrogen and ash elements with the leaf fall in the forest of the Kola peninsula. *Soviet Soil Sci.*, 393-399.
- MANDL I., GRAUER A., NEUBERG C., 1952. Solubilization of insoluble matter in nature. I. The part played by salts of adenosine triphosphate. *Biochim. biophys. Acta*, **8**, 654-663.
- MARCHENKO A. N., KARLOV YE M., 1962. Mineral exchange in spruce forest of the northern taiga and forest tundra in Arkhangelk Oblast. *Soviet Soil Sci.*, 722-731.
- MARTIN A. E., REEVE R., 1957. Chemical studies of podzolic illuvial horizons. The flocculation of humus by aluminium. *J. Soil Sci.*, **8**, 268-286.
- MARTIN A. E., REEVE R., 1960. Chemical studies of podzolic illuvial horizons. The flocculation of humus by aluminium. *J. Soil Sci.*, **11**, 369-381.
- MECKLENBURG R. A., TUKEY H. B. JR, 1964. Influence of foliar leaching on root uptake and translocation of calcium-45 to the stems and foliage of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiol.*, **39**, 533-536.
- MUIR J. W., MORRISON R. I., BROWN C. J., LOGAN J., 1964. The mobilization of iron by aqueous extracts of plants. I. Composition of the amino-acid and organic acid fraction of an aqueous extract of pine needles. *J. Soil Sci.*, **15**, 220-225.
- MUKHERJEE J. N., 1948. Liberation of H^+ , Al^{+++} and Fe^{+++} from pure clay minerals repeated salt treatment and desaturation. *J. Colloid Sci.*, **3**, 437-447.
- NYKVIST N., 1963. Leaching and decomposition of water soluble organic substances from different types of leaf and needle litters. *Stud. For. Succ.*, 3-31.
- OVINGTON J. D., MADGWICK H. A. I., 1959. Distribution of organic matter and plants nutrients in a plantation of Scot Pine *Forest Sci.*, **4**, 344-355.
- OVINGTON J. D., 1960. The nutrient cycle and its modification through silvicultural practice. *5^e Congr. Forest. Mondial.*
- PASTERNAK P. S., SKIBA V. V., 1962. Humus content and composition of Carpathian brown forest. *Soviet Soil Sci.*, **12**, 1379-1383.
- PEDRO G., 1964. *Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines*. Thèse, Paris.
- PLUCKNETT D. L., SHERMAN G. D., 1963. Extractable aluminium in some Hawaiian soils *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 39-41.
- PONOMAREVA V. V., 1962. Role of humus substances in the formation of brown forest soil. *Soviet Soil Sci.*, 1335-1440.
- RAGLAND J. L., COLEMAN N. T., 1962. Influence of aluminium on phosphorus uptake by snap bean roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 88-90.
- RANDALL P. J., VOSE P. B., 1963. Effect of aluminium on uptake and translocation of phosphorus by perennial rye-grass. *Plant Physiol.*, **38**, 403-409.
- RATNER E. I., SMIRNOV A. M., HUANG HUNG S., 1962. Importance of molybdenum for growth of isolated alfalfa roots in relation to the acidity and aluminium content of the medium. *Soviet Plant Physiol.*, **9**, 224-230.
- REES W. J., SIDRAK G. H., 1961. Inter-relationship of Al^{+++} and Mn^{++} toxicity towards plants. *Plant and Soil*, **14**, 101-119.
- REMEZOV N. P., 1956. The role of the biological circulation of the elements in soils formation under forest. *6^e Congr. Sci. Sol, E*, 269-274.
- REMEZOV N. P., 1961. Decomposition of forest litter and the cycle of elements in oak forests. *Pochvovedenie*, **7**, 1-12.
- REY P., 1957. Le déterminisme écologique de la répartition des plantes méditerranéennes en Aquitaine. *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, **92**, 131-156.
- RODRIGUES G., 1964. Fixed ammonia in tropical soils. *J. Soil Sci.*, **5**, 264-274.
- ROUSSEAU L. Z., 1959. *De l'influence du type d'humus sur le développement des plantules de sapins dans les Vosges*. Thèse, Nancy.
- SAMOILOVA E. M., 1961. Dynamic of decomposition of leaf fall of deciduous species. *Trudy Voronezh Gosudar Zapoved*, **13**, 89-101.
- SANDELL E. B., 1959. *Colorimetric determination of trace of metals*. Interscience Publishers Inc. New York.
- SERONIE-VIVIEN M. R., 1950. *Etude géologique et pétrographique de la Basse Vallée de la Leyre*. Diplôme d'Études supérieures, Bordeaux.
- SIFFERT B., 1962. *Quelques réactions de la silice en solution : la formation des argiles*. Thèse, Strasbourg.
- SLOVOKOVSKII V. I., 1960. The importance for plant nutrition of the mineralization and leaching of the organic leaf fall of woody and shrubby species. *Dokl. Akad. Nauk*, **132**, 223-226.
- SMIRNOV P. M., FRUKTOVO N. I., 1963. Fixation of non exchangeable ammonium by soils. *Soviet Soil Sci.*, 265-272.

- SMITH H. G., 1904. Aluminium, the chief inorganic element in a proteaceous tree and the occurrence of aluminium succinate in trees of their species. *J. r. Soc. N. S. Wales*, **37**, 107-120.
- STEPANEV'S I. T., 1963. Éléments of ash exchange on 10 years old elm and birch plantation of dark-chesnut soils. *Soviet Soil Sci.*, 153-157.
- STEVENSON F. J., DHARIWAL A. P. S., CHOUDHRI M. B., 1957. Further evidence for naturally occurring fixed ammonium in soils. *Soil Sci.*, **85**, 42-46.
- STEVENSON F. J., DHARIWAL A. P. S., 1959. Distribution of fixed ammonium in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 121-124.
- STOKLASA J., 1911. Catalytic fertilizers for sugar beets. *Bc Zuckenubenbau*, **18**, 193-197.
- SWINDALE L. D., JACKSON M. L., 1956. Genetics process in some residual podzolised soils of New Zealand. *6^e Congr. intern. Sci. du Sol, E*, 233-239.
- TAKAHASHI T., 1963. Effect of exchangeable aluminium on calcium absorption by barley in volcanic ash soil. *J. Sci. Soil Tokyo*, **34**, 88-92.
- TCHERNOV V. A., 1956. De la nature de l'acidité des sols. *6^e Congr. Sci. Sol, B*, 547-551.
- TITOVA N. A., 1962. Iron humus complexes of certain soils. *Soviet Soil Sci.*, 1351-1356.
- VAJNSTEIN E. E., LEDEBEV V. I., 1961. Recherches sur l'influence d'agents de formation des complexes de « camouflage » au cours du dosage du calcium et du strontium par la méthode de photométrie de flamme en présence d'aluminium. *Chim. Anal.*, **43**, 398-401.
- VAN DIEPEN D., 1956. Hydromorphological and morphogenetic profile characteristics of humus podzols on the Netherlands. *6^e Congr. Sci. du Sol, E*, 453-461.
- VIETS F. G., 1944. Calcium and other polyvalent cations as accelerators of ion accumulation by excised barley roots. *Plant Physiol.*, **19**, 466-480.
- VOSE P. B., RANDALL P. J., 1962. Resistance to aluminium and manganese toxicities in plants related to variety and CEC. *Nature*, **196**, 85-86.
- WALLIHAN E. F., 1948. The influence of aluminium on the phosphorus nutrition of plants. *Amer. J. Bot.*, **35**, 106-112.
- WRIGHT K. E., DONAHUE E. A., 1953. Aluminium toxicity studies with radioactive phosphorus. *Plant Physiol*, **28**, 674-680.
- WHRIGHT J. R., LEVICK E., 1956. Development of a profile in a soil column leached with chelating agent. *6^e Congr. Sci. du Sol, E*, 227-262.
- WHRIGHT J. R., SCHNITZER M., 1963. Metallo-organic interaction associated with podzolisation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 171-176.
- WIKLANDER L., 1964. On the chemical properties of soils as affected by liming. *8^e Congr. Sci. du Sol, IV*, Bucarest.
- WILDE S. A., 1959. Ameliorating effect of Jack Pine (*Pinus banksiana*) and Red Pine (*Pinus resinosa*) plantation established on depleted sandy soils of Wisconsin. *Proc. Ninth. Int. Bot. Congr.*, Montreal, 2-43.
- YOSHIDA T., SAKAI, H., 1963. Microbiological studies on the soils of Hokkaido. Effects of aluminium on the soil microflora. *Bull. Hokkaido nat. agri. exp. Station.*, **82**, 23-27.
- ZONN S. V., 1963. Evolution of soils in forest biocenoses. *Soviet Soil Sci.*, **10**, 915-923.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

La chlorose ferrique des plantes pérennes

VU ET APPROUVÉ :

Nancy, le 24 novembre 1965

*Le Doyen de la Faculté des Sciences
de Nancy,*

J. AUBRY

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Nancy, le 26 novembre 1965

*Le Recteur Président du Conseil
de l'Université,*

P. IMBS

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 5-1966.

Dépôt légal : 2^o trimestre 1966. N^o d'impression : 427.