

50376
1975
127

50376
1975
127

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

U.E.R. DES SCIENCES DE LA TERRE

M E M O I R E

présenté en vue de l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES

de

GEOLOGIE APPLIQUEE

(Mention Pédologie)



Michel LE GOFF

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE QUELQUES PROPRIETES DE
SOLS HYDROMORPHES EN FORET DE SAINT-AMAND/RAISMES

Soutenu le 28 novembre 1975 devant la Commission d'Examen :

MM. P. CELET Président-rapporteur
P. DEBRABANT Examineur
R. BLONDEAU Examineur



PLAN DU MEMOIRE

	Page
INTRODUCTION	1
CHOIX DES PROFILS	4
Contexte géologique	4
Situation des profils	7
Le contexte hydromorphique	8
Description des profils	20
ANALYSES PHYSIQUES	27
Analyse mécanique	27
Taux d'humidité	36
Le pH	40
Conclusions générales des propriétés physiques	41
ANALYSES CHIMIQUES	43
Rappel de quelques propriétés du fer	44
Formes du fer dans les sols	51
Analyses	58
ANALYSE MICROBIOLOGIQUE	82
Préambule	82
Bactéries aérobies	84
Bactéries anaérobies	91
Conclusions relatives aux flores totales aérobie et anaérobie	94
Sulfato-réducteurs	96
Bactéries qui réduisent le fer ferrique	99
Conclusions	103
CONCLUSIONS	106

50376
1975
127

ERRATA

Page 46; Figure 11 : lire en regard des droites B et B' :

respectivement $[\text{Fe}^{3+}] = 10^{-7}$

et $[\text{Fe}^{3+}] = 1$

Page 48; 3ème ligne, on lira :

"On obtiendra ainsi respectivement pour $[\text{Fe}^{3+}] = 1 \text{ M} \dots$ "

au lieu de $[\text{Fe}^{3+}] = 10^{-1} \text{ M}$

Page 72; dans le paragraphe "Réalisation de la solution tampon",

on lira : $\text{pH} = \text{pK} + \log \frac{[\text{sel}]}{[\text{acide}]}$ puis $\text{pH} = 4,7 + \log \left(\frac{0,7}{0,3} \right) = 5,1$

AVANT PROPOS

Avant de commencer l'exposé de mon travail, je me fais un devoir de remercier les personnes qui m'ont permis de l'entreprendre, m'ont conseillé et aider à le mener à bien.

J'assure de ma gratitude :

M. le Professeur P. CELET qui m'a permis d'entreprendre ce travail, m'a encouragé et conseillé tout au long de sa réalisation.

M. L. DURIN qui a orienté mon travail, m'a aidé tant sur le terrain qu'au laboratoire et qui a guidé mes interprétations.

M. R. BLONDEAU qui m'a initié à la microbiologie des sols, s'est intéressé à mon étude et me consacrant beaucoup de son temps m'a prodigué sans compter ses bons conseils et critiques éventuelles. Je veux en outre le remercier d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.

M. P. DEBRABANT qui a accepté d'examiner ce mémoire, m'a permis d'entreprendre les analyses du fer ferreux total dans son laboratoire et a réalisé le dosage des échantillons traité par la fusion alcaline.

MC. DUTERAGE et M^{me} J. FOULON qui m'ont conseillé et aidé à doser le fer.

M. HENRY qui m'a conseillé et aidé pour l'application des techniques analytiques et qui a bien voulu examiner la partie chimique de ce mémoire.

Mme BERTOUX et M. LEFEBVRE de l'Institut agricole qui m'ont aidé et encourager.

M. G. COURTY qui s'est intéressé à mon travail, a orienté ma bibliographie, et avec qui j'ai eu des échanges d'idées fructueux.

MM. les Professeurs BOURRIQUET et MONTUELLE qui m'ont permis d'entreprendre les analyses chimiques et microbiologiques dans leurs laboratoires respectifs.

Je veux remercier aussi toutes les personnes qui ont participé à la réalisation pratique de ce mémoire.

Enfin, je désire associer à la réalisation de ce travail, la mémoire de mon camarade B. PETIT qui, ayant lui aussi fait le certificat de pédologie, s'est intéressé à mon étude et m'a confié ses résultats concernant les sables landéniens.

ERRATA

Dans le chapitre V : ANALYSES MICROBIOLOGIQUES,
on lira : - C) BACTERIES ANAEROBIES (Page : 91)
D) CONCLUSIONS RELATIVES AUX FLORES TOTALES AEROBIE ET
ANAEROBIE (Page : 94)
E) LES SULFATO-REDUCTEURS (Page : 96)
F) BACTERIES QUI REDUISENT LE FER FERRIQUE (Page : 99)
G) CONCLUSIONS (Page : 103)
au lieu de D), E), F), G), H).

L'eau en s'installant dans le sol y occupe les vides en chassant l'air, développant ainsi un milieu asphyxiant. Se chargeant en CO_2 et ne se réoxygénant pas elle devient acide et réductrice. Ce milieu est néfaste pour la végétation et pour les autres formes de vie existantes dans le sol et qui, par leur présence, en assurent normalement l'équilibre et les propriétés agricoles.

Cet aspect fondamental justifie le fait que les premiers travaux relatifs aux sols hydromorphes soient dûs à des agronomes. A l'époque où les moyens d'étude et les connaissances générales étaient encore réduits, il s'agissait avant tout de parer au plus pressé en assainissant les sols engorgés par drainage ou par implantation d'espèces végétales dont on connaissait le fort pouvoir de pompage. L'étude des sols hydromorphes connut par la suite la même évolution que celle des autres sols avec le développement des études chimiques et microbiologiques qui permirent de mieux comprendre les phénomènes intimes de l'hydromorphie afin d'y pouvoir remédier plus efficacement.

Mais le sol n'est pas une roche ordinaire, c'est un véritable organisme vivant. Le sol hydromorphe est un sol malade doué d'une réactivité propre et d'une identité. Chaque sol hydromorphe constitue donc un cas d'espèce. Il en résulte que la littérature relative à l'hydromorphie est fort dispersée et qu'il nous a été relativement ardu de retrouver dans les publications les éléments généraux toujours dissimulés par un contexte particulier. Nous pouvons citer les thèses de Becker (1971) relative à une forêt de Lorraine, de Plaisance (1965) relative aux sols à marbrures de la forêt de Chaux ou les études de Schaeffer (1967). Dans ces diverses publications, les caractéristiques générales de l'hydromorphie sont dissimulées par un contexte local particulier.

Les sols hydromorphes comme nous l'avons dit plus haut, ont une cause simple qui est l'engorgement par une nappe temporaire ou permanente. Ils peuvent être détectés sur le terrain par des observations pratiques telles qu'une venue d'eau dans la fosse creusée pour mettre en évidence le profil, la présence d'un niveau d'eau proche de la surface constatée grâce à des piézomètres, des marbrures affectant tout ou partie du profil dans le cas des pseudogleys, une couche bleuâtre ou verdâtre dans le cas des gleys.

Hormis le caractère saturant de l'eau, celle-ci pouvant être un agent d'altération et de réduction important on peut s'attendre à ce que les sols engorgés présentent des degrés d'altération et de réduction élevés.

Duchaufour et N'Guyen Kha (1969) ont défini plusieurs types de sols hydromorphes sur ce principe en étudiant les différents états du fer qui y étaient présents. Ils y ont déterminé un indice d'altération basé sur le rapport Fer libre/Fer total et un indice de réduction égal au rapport Fer ferreux/Fer total.

Dans le travail qui suit, nous avons repris le résultat de ces travaux pour compléter la détermination du caractère hydromorphique des sols que nous avons étudiés.

Reprenant les enseignements de travaux récents, nous avons limité notre analyse à quelques propriétés physiques, chimiques et microbiologiques susceptibles de former un ensemble cohérent pour l'interprétation de nos résultats.

Dans cette optique, la base de notre travail nous a été fournie par une note de Takai et Kamura "The mechanism of reduction in waterlogged Paddy Soil" (1966). Dans cette étude, où la microbiologie tient la place prépondérante, ces auteurs ont mis en évidence deux stades, eux-mêmes divisés en plusieurs étapes successives, dans l'évolution d'un sol en conditions d'engorgement. Cette étude a été faite expérimentalement au laboratoire, il est difficile d'extrapoler les résultats aux sols en place. Les auteurs eux-mêmes se gardent bien d'en tirer des conclusions précises quant à leurs sols d'étude en l'occurrence les sols de rizière.

De plus, les auteurs ont fait appel à un modèle de sol éminemment simplifié de manière à éliminer certains facteurs comme par exemple la percolation de l'eau à travers le sol en place et dont le rôle est certainement important.

Quoiqu'il en soit, leurs résultats constituant un ensemble logique et parfaitement plausible concordant avec les données acquises dans ce domaine, il m'a semblé possible et intéressant de rechercher, dans leurs grandes lignes, à retrouver dans des sols en place, les principales étapes décrites par Takai et Kamura (1966) que nous exposerons plus en détail dans un chapitre ultérieur. Disons pour l'instant que selon eux, on passe d'une décomposition aérobie puis semi-anaérobie de la matière organique à un processus de décomposition anaérobie, c'est-à-dire d'une respiration aérobie en présence d'oxygène moléculaire, réaction la plus productrice d'énergie à une fermentation méthanique la moins productrice d'énergie.

Nous avons essayé de retrouver cette évolution en comparant plusieurs sols hydromorphes de la forêt de Saint-Amand-Raismes présentant des caractères d'hydromorphie croissants. Nous avons pris pour référence un sol non hydromorphe.

C H A P I T R E I I

CHOIX DES PROFILS

Reprendre les résultats de Takai et Kamura impliquait que l'on transpose sur un plan statique un phénomène dynamique, aussi était-il essentiel et évident de reprendre le même fil conducteur : l'hydromorphie croissante.

C'est pourquoi nous nous sommes placés dans un contexte général identique : sols formés sous forêt et sur sable landénien. En outre, nous avons voulu choisir une référence qui devait être un sol non hydromorphe pris dans le même contexte général.

Par la suite, il nous a semblé intéressant d'effectuer une comparaison avec un sol différent c'est ainsi que nous avons choisi un sol formé sur alluvions modernes.

La recherche des profils d'étude a été réalisée en divers points de la forêt grâce à des sondages à la tarière.

Le profil n°V que nous avons choisi dans un premier temps et dont nous reportons à titre indicatif certaines valeurs analytiques a été abandonné car il n'offrait pas toutes les garanties nécessaires à l'étude de par l'existence de facteurs anthropiques récents.

A) CONTEXTE GEOLOGIQUE

Du point de vue géologique, la forêt de Saint Amand-Raismes s'est développée sur un ensemble de formations d'âge tertiaire correspondant à l'étage landénien (=Thanétien), lui-même supporté par des formations d'âge Crétacé.

Le Crétacé qui n'apparaît qu'au NE de l'Escaut n'influence pas directement la pédogénèse des sols forestiers car il est coiffé par une épaisseur importante de Landénien. Nous ne nous y attarderons donc pas.

L'Eocène à la base duquel appartient le Landénien, se compose, pour l'ensemble de la région Nord de la France, d'une succession de formations argileuses et sableuses qui, de la base vers le sommet, sont le complexe argiles de Louvil-tuffeau de Valenciennes, les sables d'Ostricourt, les argiles d'Orchies, les sables de Mons en Pévèle enfin.

Nous ne nous attarderons pas sur le sommet de cette colonne stratigraphique puisque les sables de Mons ainsi que les argiles d'Orchies n'existent pas en forêt de Saint Amand.

Dans les limites de la forêt domaniale, le Landénien est recouvert sur une surface importante par une formation résiduelle à silex dénommée R_{SIII} et localement, en bordure des vallées de la Scarpe et de l'Escaut, par des langues d'alluvions modernes (Fz) et de colluvions (Clp).

Une carte géologique (au 1/25 000e) agrandie photographiquement à partir de la carte au 1/50 000e de Saint Amand-Crespin Mons résumera ce que nous venons de dire (Figure 1).

Voyons maintenant quelles sont les compositions lithologiques des formations qui nous intéressent dans les limites de la forêt.

La formation résiduelle à silex (R_{SIII})

Cette formation qui supporte la partie orientale de la forêt est constituée de sables grossiers comportant des lits de silex.

Les alluvions modernes (F_Z)

Constituées de matériaux sablo-argileux et limoneux fins, intercalées de bancs tourbeux et passant insensiblement aux sables tertiaires landéniens dans la vallée de la Scarpe, celles-ci sont plus grossières dans la vallée de l'Escaut où s'y intercalent des lits d'argile plastique.

Les sables d'Ostricourt (E_{2b})

Ces sables regroupent en vérité deux types lithologiques différents qui sont les sables marins glauconieux de Grandglise et les sables continentaux blancs du Quesnoy.

Ces derniers qui dériveraient en fait des premiers et n'existent que sporadiquement dans la forêt n'ont pas été distingués par les auteurs de la carte au 1/50 000e.

Les sables de Grandglise normalement verts et riches en glauconie apparaissent bien souvent jaunes à l'affleurement et même en profondeur. Parfois indurés, ils se débitent alors en plaquettes.

Les argiles de Louvil (e_{2a})

La formation argileuse épaisse dans la partie Ouest de la feuille St Amand-Crespin-Mons comporte des lits sableux glauconifères qui vers l'Est deviennent plus importants et remplacent même l'argile qui subsiste sous forme de petits bancs irrégulièrement répartis. Ce faciès glauconieux induré reçoit le nom de tuffeau de Valenciennes.

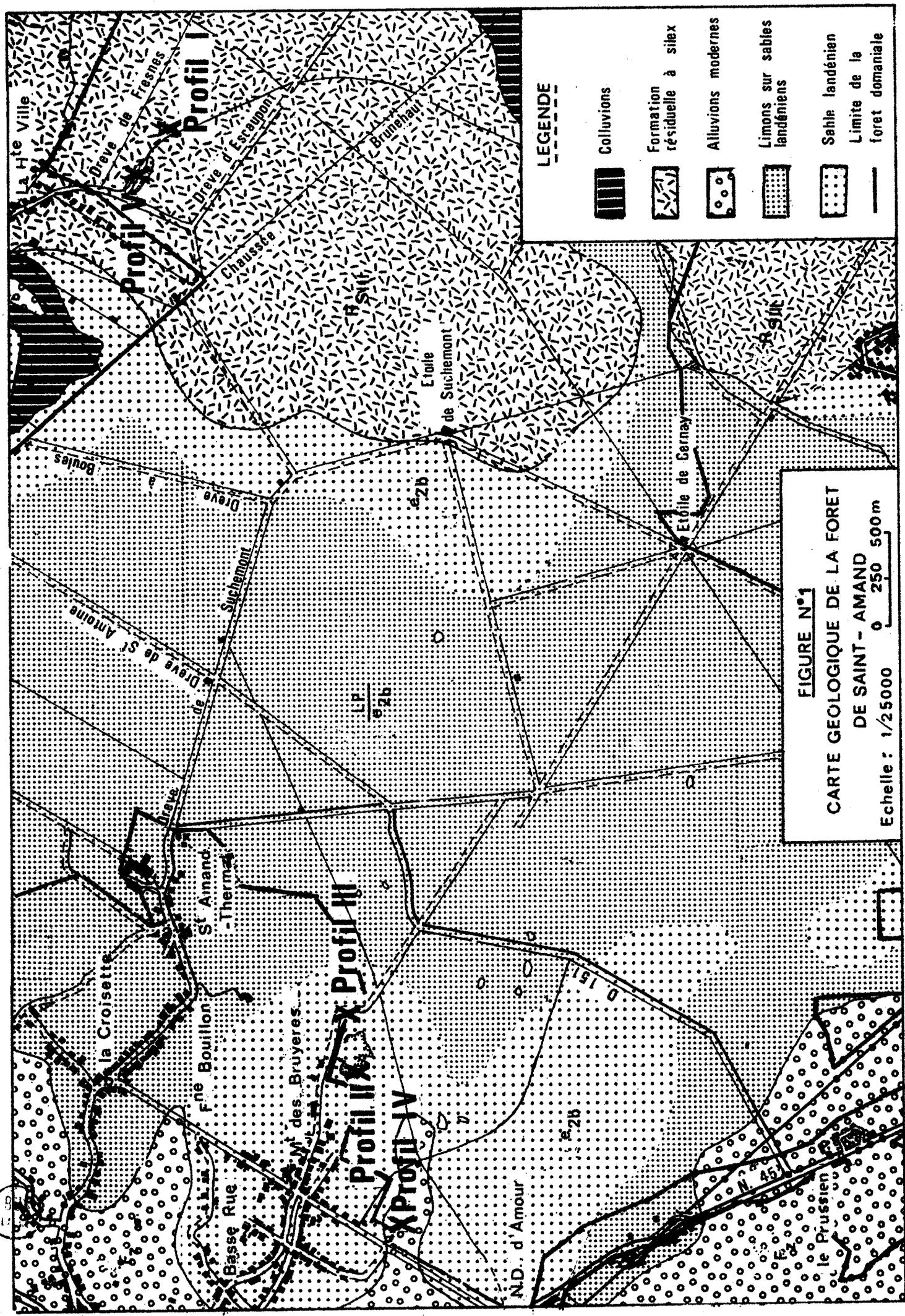


FIGURE N°1
CARTE GEOLOGIQUE DE LA FORET
DE SAINT - AMAND
 Echelle: 1/25000 0 250 500m

Nota 1 : C'est volontairement que nous ne nous sommes pas arrêtés à la description des colluvions (C_{lp}) car ceux-ci, d'étendue très restreinte sont souvent mal individualisés et surtout n'atteignent pas les zones où nous avons implanté nos profils.

Nota 2 : Si notre profil I repose effectivement sur une formation sableuse grossière comportant des silex correspondant à la formation résiduelle à silex (R_{SIII}), le profil V, par contre, situé dans la réserve botanique du Lièvre ne repose assurément pas sur cette formation.

En effet, la sablière dont l'exploitation a été interrompue montre à l'affleurement le sable de Grandglise de couleur jaune, parfois induré et formant un front de carrière haut, dans sa partie NW, de 5 m environ. Le profil V est situé au pied de ce talus sableux. Notons que la carte au 1/80 000e englobait dans les limites de l'affleurement du sable de Grandglise, la sablière du Lièvre.

B) SITUATION DES PROFILS

La carte géologique au 1/25 000e (fig. 1) agrandie d'après la carte au 1/50 000e (Feuille de St Amand) montre deux catégories de profils dont les emplacements sont définis par un X. Les sols de la première catégorie, profils I, II, III et V sont tous situés sur le Landénien sableux, le profil IV pour sa part, est formé sur alluvions modernes (Fz).

1. Profil n° I

Il se situe à 150 m environ derrière la réserve botanique enclose du Lièvre à proximité d'un chemin dont le tracé est celui d'une ancienne voie ferrée (figurée comme telle sur la carte au 1/80 000e) qui allait rejoindre au SE de la forêt, le chemin de fer de Somain à Peruwelz.

2. Profil n° V

Il se trouve lui aussi en bordure du tracé de cette ancienne voie ferrée à l'intérieur de la réserve botanique du Lièvre cette fois. On le trouve dans une zone humide développée à la base de l'abrupt constitué par le front sabio-gréseux du Landénien qui va s'estompant vers le SE.

3. Profil n° II

Il se trouve dans la réserve botanique enclose du Mont des Bruyères, précisément dans la tourbière.

4. Profil n° III

C'est notre profil non hydromorphe de référence. Il se situe en bordure de la route qui mène du Moulin des Loups au terrain de camping du Mont des Bruyères.

5. Profil n° IV

On le trouve dans un contexte totalement différent de celui des quatre autres profils puisqu'il est formé sur une langue d'alluvions modernes notée Fz sur la carte au 1/80 000e. Il se situe à une quinzaine de mètres d'un sentier étroit dont le tracé correspond à celui d'un aqueduc souterrain figuré en tireté bleu sur la carte du parc régional naturel au 1/25 000e et qui rejoint la route de la Croisette à la N 45.

C) LE CONTEXTE HYDROMORPHIQUE

La cause la plus simple d'hydromorphie qui nous vient à l'esprit est la présence à faible profondeur d'un niveau imperméable qui fait obstacle à l'écoulement vertical des eaux.

Mais comme nous y faisons allusion dans l'introduction de ce travail, il existe d'autres causes de l'hydromorphie et l'on peut citer : la topographie, la végétation, le climat.

1 - La topographie

C'est elle qui détermine le type d'alimentation en eau du sol.

Tous les sols sont soumis aux eaux de précipitation, certains seulement peuvent être alimentés par des eaux de ruissellement ou de drainage oblique, certains par les remontées capillaires d'eaux souterraines. Il est clair que c'est la topographie qui va déterminer ce partage des eaux ; on peut se reporter pour ce chapitre au "Précis de pédologie" de Duchaufour (1970) et à la thèse de Plaisance (1965).

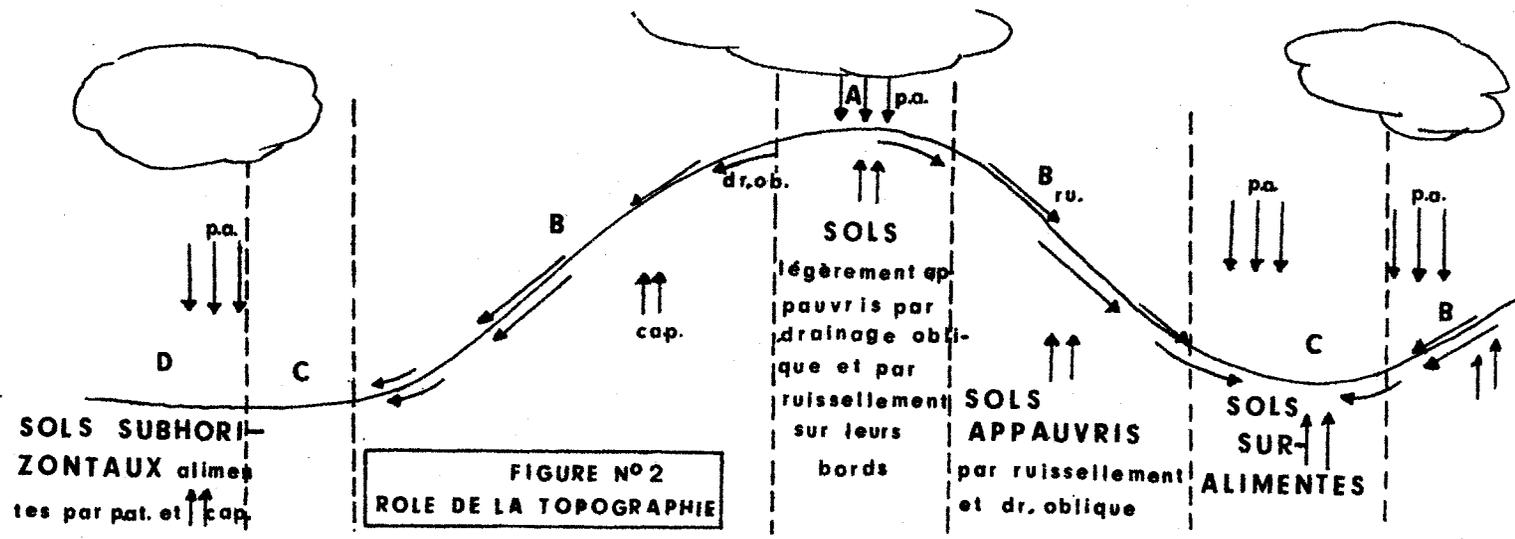


FIGURE N°2
ROLE DE LA TOPOGRAPHIE



Ceci peut être résumé par la figure 2 ; on y voit que l'on peut distinguer quatre grandes catégories de sols de par leur alimentation en eau. Les sols (A) de sommet qui sont appauvris sur leurs bords par suite du drainage oblique (dr. ob.) et du ruissellement (ru) ; les sols (B) de pente très pauvres en eau, les sols (C) de cuvettes qui sont suralimentés ; les sols (D) enfin qu'à défaut d'une appellation plus précise, on pourra appeler normaux : ce sont des sols subhorizontaux alimentés par les eaux météoriques (p.a.) et les remontées capillaires (cap.) quand elles existent.

Les sols (C) sont très susceptibles de donner des sols hydromorphes, les sols (A) et (D) s'y prêtent aisément lorsque les conditions géologiques et climatologiques sont favorables. Les sols (B) de pente quant à eux ne pourront jamais donner lieu à hydromorphie (lorsque la pente est sensible du moins).

Nos sols se rattachent au type (C) pour les profils II et V, au type (D) pour les profils I, et IV, au type CD ou BD pour le profil III.

2 - La végétation

Les effets de la végétation sont multiples et ont été fort bien résumés par Plaisance (1965). On pourra par ailleurs trouver une étude détaillée des rapports sol-végétation dans les conditions particulières de l'hydromorphie dans la thèse de Becker (1971).

Parmi les effets de la végétation on peut citer, à l'exemple de Plaisance (1965) :

- a - La fonction parapluie : Les espèces couvrantes exercent une protection du sol vis à vis des eaux météoriques. Cette fonction est particulièrement développée dans le cas d'espèces résineuses à feuillage dense qui de plus l'exercent pendant des temps plus longs que les feuillus. Cette fonction permet en outre une protection des sols limoneux, battants lors des fortes pluies.

- b - La fonction écran due aux litières : Les litières forestières comme l'indique Plaisance (1965) et comme nous avons pu le constater nous-mêmes, retiennent une forte quantité d'eau, faisant ainsi écran aux précipitations atmosphériques. Nous avons ainsi enregistré 56,3 % en poids d'eau dans la litière de notre profil I durant les mois d'hiver.

- c - L'effet pompe : Les végétaux puisent dans le sol une quantité d'eau variable en fonction des espèces. Cet effet est particulièrement connu des profanes en ce qui concerne les peupliers.
- d - Fonction parasol : Le couvert végétal et particulièrement les résineux à feuillage dense, réalisent pendant des périodes sèches une protection du sol contre l'évaporation. On doit noter cependant que les résineux ont une transpiration plus étendue dans le temps et qui compense ce freinage de l'évaporation.
- e - Les racines : exercent un effet affouillant qui tend à maintenir la structure et donc l'aération ainsi que la porosité en profondeur. Le réseau de canalicules qu'elles développent a un effet assainissant.

3 - Le climat

Sous couvert forestier ce qui est le cas des profils I, III, IV, V, les vents interviennent peu. Dans le cas du profil II situé dans une cuvette tourbeuse leur rôle est secondaire car c'est ici la topographie jointe à la faiblesse de la porosité qui joue le rôle primordial.

a - Les températures : nous reportons dans les tableaux 1,3,5, différentes mesures de températures qui nous ont été communiquées par la station météorologique de Lille-Lesquin. Dans le premier tableau, nous trouvons les températures moyennes mensuelles pour la période qui va de Novembre 1973 à Août 1974 et qui nous intéresse directement dans le cadre de ce travail.

Nous avons présenté, pour comparaison, les températures moyennes mensuelles et annuelles pour les années 1971 à 1973 et 1946 à 1970.

(Tableaux 3 et 5).

Ces trois tableaux montrent une relative uniformité des températures pour cette période de 28 années. Les températures les plus basses sont atteintes en décembre, janvier, février, les plus fortes en juin, juillet, août et septembre.

Les moyennes annuelles sont relativement basses et de l'ordre de 10°. Les écarts annuels entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid sont de : 14,7° pour la période 1971-1973 et de 14,6° pour la période 1946-1970.

On peut considérer que ce sont là des écarts importants.

b - Les précipitations (station de Lille-Lesquin) : Nous présentons les valeurs fournies par la station de Lille-Lesquin en parallèle avec les valeurs de température. Nous avons ainsi les moyennes mensuelles pour la période Novembre 1973-Août 1974 (Tableau 2) puis les moyennes mensuelles et annuelles pour la période 1971-73 (tableau 4) et pour la période 1946-1970 (tableau 6).

Pour la période de 24 années de 1946 à 1970, on voit qu'il y a deux pics légers de fortes précipitations qui correspondent aux mois de juin-juillet-août d'une part, novembre-décembre et janvier d'autre part. Les deux périodes de relative sécheresse étant les mois de Février Mars avril d'une part, septembre et octobre d'autre part. On remarque une certaine uniformité des précipitations pour l'année ; les pics et creux manquent de netteté.

Pour les années 1971-1973, on retrouve ce schéma dans ses grandes lignes, les valeurs correspondant à un nombre peu élevé d'années, les différences sont beaucoup plus nettement marquées.

La courbe de 1974 suit elle aussi ce mode.

Pour les 8 premiers mois de cette année, le mois le moins pluvieux a été avril, le plus pluvieux août. Il est probable que septembre donnera des valeurs élevées.

On peut noter que pour la période qui nous intéresse, le mois de novembre a été peu pluvieux par rapport aux autres années.

Les deux grandes saisons pluvieuses correspondent pour la période 1946-1970 au printemps et au début de l'été, où il s'agit surtout de pluies orageuses, et à l'hiver.

Pour la fin de l'année 1973, on constate un décalage important par rapport au schéma moyen des années 46-70. Le mois de novembre s'est avéré être un mois sec et le mois de septembre un mois extrêmement pluvieux. Nos sols ont connu pour la période qui nous intéresse 3 pics et 2 creux de précipitations ; les 3 pics correspondent respectivement aux mois de septembre 73, février 74, juillet-août 74, les deux creux correspondent aux mois de novembre 73 et avril 74. Les écarts entre pics et creux sont très importants.

Tableau n°1

TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE
Nov 73 à Août 74

N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
6.8	3.7	6.4	5.0	6.4	10.0	11.9	15.3	16.0	17.2

Tableau n°2

HAUTEUR MOYENNE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS

N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
34	45	61	72	44	14	44	60	69	68

Tableau n°3

TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE
Années 1971-72-73

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	année
2.8	3.93	5.6	8.03	12.66	14.66	17.3	17.5	14.9	10.03	5.93	4.3	9.76

Tableau n°4

HAUTEUR MOYENNE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
44,3	3,8	28	49	72,3	75	62,3	44,3	56	28,3	74	30,7	592,3

Tableau n°5

TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE
Années 1946-70

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	mo. années
2,4	3,1	5,9	9,0	12,4	16,2	16,9	17,0	15,1	11,0	6,2	3,2	9,8

Tableau n°6

HAUTEUR MOYENNE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
4,5	4,2	3,7	4,0	4,5	5,8	5,9	6,1	5,3	5,3	5,6	5,7	60,6

FIGURE N° 3

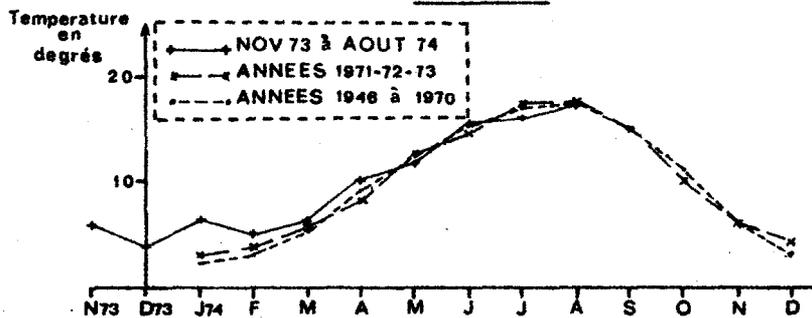
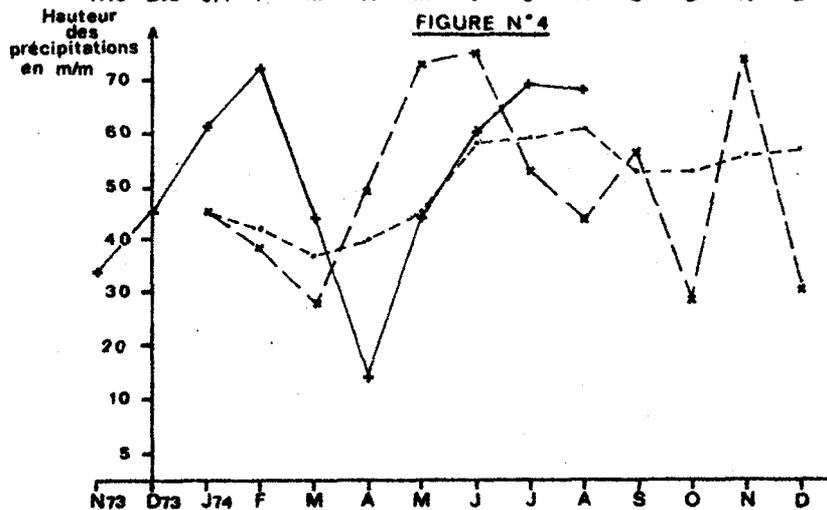


FIGURE N° 4



Les figures 3 et 4 reprennent les résultats de ces tableaux sous forme de courbes ; l'uniformité des températures apparaît ici très nettement. La saison chaude allant en gros de mai à septembre est suivie par une saison froide allant d'octobre à avril, les mois les plus froids étant décembre, janvier, février.

Par rapport au schéma des précipitations pour la période 1946-1970, on note que la saison chaude correspond aux fortes précipitations.

L'année se compartimente comme suit :

novembre, décembre, janvier : précipitations moyennes, températures basses ;
février, mars, avril : précipitations faibles, températures relativement basses ;
mai, juin, juillet, août : précipitations moyennes à fortes, températures moyennes à hautes ;
septembre, octobre : précipitations moyennes, températures moyennes à relativement basses.

Pour la période qui nous intéresse, les températures comme les précipitations ont suivi le schéma moyen des années 1946-70, avec une saison hivernale froide et humide, une saison de transition à cheval sur l'hiver et le printemps douce et sèche, une saison chaude et humide. La transition entre la saison chaude et humide et la saison froide et humide est assez courte et la chute de température assez brutale.

4 - Application des propriétés générales ci-dessus énoncées aux profils d'étude

Nous envisagerons dans ce paragraphe successivement chacun des profils en reprenant les divers aspects que nous avons développés précédemment dans une optique plus générale.

a. Le profil n° I

/Le substratum géologique/ peut ici correspondre à ce que les auteurs de la carte au 1/50 000e ont regroupé sous le terme e2 à savoir une /zone de transition diffuse existant localement entre le sable landénien et le complexe argile de Louvil, tuffeau de Valenciennes/ ou bien encore au RsIII c'est-à-dire la formation résiduelle à silex. Nous avons à partir de 1 m à 1,20 m un sable jaune avec de petits lits argileux intercalés, le tout renfermant des silex.

C'est la présence de ces niveaux argileux qui justifie l'imperméabilité et qui forme le plancher de la nappe perchée.

Le niveau de celle-ci atteignait la profondeur de 1,20 m au mois de janvier ; après de fortes pluies le niveau remonte jusque 0,70 m. La texture sableuse fine et compacte autorise une imbibition capillaire qui semble intervenir principalement jusque 25 cm.

De 25 à 90 cm nous avons un faciès marmorisé de pseudogley. Il est curieux de remarquer que le niveau supérieur de la marmorisation correspond à la limite de deux horizons pédologiques nettement distincts. Nous envisagerons ce détail dans la description des profils.

Ce profil se trouve dans une forêt mixte de résineux (15 à 20 m de haut) et feuillus (jeunes chênes) la végétation basse étant surtout représentée par des Ericaceae et des espèces herbacées.

Le couvert forestier limite l'action des vents et l'évaporation ce qui est bénéfique en saison sèche mais contribue à favoriser l'engorgement en saison humide.

La pente est quasiment nulle, le ruissellement et le drainage latéral inexistant.

L'alimentation en eau se fait par les précipitations et les remontées capillaires justifiées par une porosité fine due à la texture.

Notons au passage, avec Plaisance (1965), que le pseudogley est toujours lié à une nappe perchée, les nappes phréatiques relativement plus profondes et permanentes ne jouent aucun rôle.

b. Le profil n° II

Niché au fond de la cuvette tourbeuse du Mont des Bruyères, ce sol est fortement gleyifié.

La présence de sable landénien, de couleur jaune et apparemment inaffecté par l'hydromorphie, dès 60 cm laisse supposer que l'engorgement n'est que superficiel et qu'il est sans liaison avec la présence de l'argile de Louvil à relativement faible profondeur sous le sable.

Le sol lui-même a une texture sableuse fine mais dans laquelle s'intercalent plusieurs lits tourbeux.

Il est vraisemblable que l'engorgement est lié ici à la porosité plus faible, à la présence de ces lits tourbeux (effet éponge) et surtout à la suralimentation en eau ; aux eaux de précipitation viennent s'ajouter les eaux de ruissellement et de drainage oblique, de sorte que le sol faiblement perméable à cause de la porosité faible ne parvient pas

à absorber ce surplus d'eau qui devient saturante et forme des mares en surface.

Il nous semble probable que si les périodes de sécheresse étaient plus longues, elles permettraient, jointes à l'évaporation non freinée par le couvert végétal peu dense, une élimination d'une grande partie de cette eau.

On voit donc, illustré ici, le rôle primordial de la topographie en ce qui concerne ce profil sachant que les caractéristiques physiques de l'ensemble des profils sont assez voisines.

→ La végétation est caractéristique des tourbières ; absence d'arbres à enracinement profond qui contribue à l'asphyxie totale des parties profondes du sol, présence d'espèces arbustives de faible envergure, herbes hautes, Ericaceae, polytrics et sphaignes abondants ; une végétation à caractère hydrophile acide.

c. Le profil n° III

Il s'agit d'un sol brun forestier lessivé sur sable situé sur un replat à mi-pente du mont des Bruyères. Le ruissellement existe ici en cas de fortes pluies ou de pluies prolongées car là encore la porosité est relativement faible surtout à partir de 30 cm. Il est probable que le drainage oblique ait un rôle non négligeable.

Quoiqu'il en soit, ce sol ne constitue pas à priori un sol hydromorphe. L'argile de Louvil présente à 1,30 m constitue un frein à l'écoulement des eaux, qui lors de fortes pluies arrivent à former des mares au fond des dépressions. Cependant, ce sol se "ressuie" facilement et rapidement, de sorte que l'engorgement ne concerne que la base du profil et ne dure pas.

La végétation est représentée par des chênes, des hêtres, des herbes basses et du muguet, ce dernier témoignant du caractère acide du sol.

d. Le profil n° IV

Le contexte topographique plat peut justifier une possible stagnation des eaux mais en tous cas il justifie également l'inexistence totale de ruissellement et drainage oblique.

✓ Bien que l'on trouve sous le sol limoneux le sable landénien de couleur jaune à faible profondeur (0,80 m), ce sol est hydromorphe en surface.

Cette hydromorphie qui n'existe d'ailleurs que pendant les saisons humides/mais peut atteindre des proportions marécageuses, est une hydromorphie de texture, si l'on peut dire, car elle est entièrement liée à la constitution limono-argileuse fine du sol. Ce sol est capable d'absorber en période humide une très grande quantité d'eau qu'il libère très lentement en direction du sable sous-jacent. L'allure marécageuse qui se développe rapidement lors de fortes pluies ou de pluies prolongées est justifiée par la lenteur de l'absorption et de la restitution. En période sèche prolongée, l'évaporation se joint à l'écoulement vers le bas et le sol devient très sec.

Le sol du profil IV s'apparente aux Pélosols que Duchaufour définit comme des sols sans nappe où l'hydromorphie est liée à une imbibition de type capillaire du fait de la finesse de la porosité. (Duchaufour et N°Guyen Kha 1969). Les formations arbustives qu'il supporte sont surtout représentées par des aulnes qui ont un fort pouvoir de pompage.

Ce sol, faiblement protégé par une mince couverture organique est relativement battant en cas de fortes pluies.

La végétation est clairière, peu de grands arbres, mais des arbustes, des herbes hautes, Carex, lys jaunes, ronces.

L'évaporation en période sèche n'est pas du tout freinée par le couvert végétal. L'enracinement des espèces présentes est superficiel, l'effet pompe est néanmoins relativement important dû aux aulnes.

e. Le profil n° V

Ce profil présente des caractéristiques très proches de celles du profil n° II. Il est formé dans une dépression à la base du front de carrière landénien. Il reçoit en plus des eaux météoriques, des eaux de ruissellement et de drainage oblique. L'imperméable est ici l'argile de Louvil qu'à faible distance de là, nous avons rencontré, derrière la clôture de la réserve et dans le prolongement de la dépression qui longe le front landénien, à une profondeur de 0,75 m.

La nappe perchée est permanente ici aussi à cause principalement du facteur topographique joint à la finesse de la porosité qui justifie une suralimentation en eaux et bien que la strate arbustive soit composée d'aulnes dont on connaît les effets de pompage, l'eau demeure surabondante.

L'évaporation en période sèche ne parvient pas à éliminer le surplus d'eau qui tend à former des mares à la surface du sol presque de manière permanente.

→ La végétation est constituée par des espèces arbustives, des aulnes, des Ericaceae, polytrics et sphaignes.

5 - Résumé du contexte hydromorphique

Il est à noter que dans tous les cas, l'hydromorphie est en liaison avec une nappe perchée permanente ou temporaire ou avec une imprégnation diffuse superficielle (caractère éponge des limons) dans le cas du profil n° IV.

Nous n'avons relevé nulle part l'action de la nappe phréatique. Plaisance (1965) signale que la nappe phréatique relativement profonde par rapport aux nappes perchées, revêt toujours un caractère de permanence et ne donne jamais lieu à un phénomène de marmorisation qui, rappelons-le, naît de la succession de phases d'engorgement et de dessiccation. Ceci confirme l'origine de la marmorisation dans le profil n° I, que l'on doit attribuer là encore à une nappe perchée.

Les sols des profils II et V s'apparentent plus à des stagnogleys qu'à des gleys. En effet, dans les gleys, la nappe est généralement plus profonde et moins acide. Les pseudogleys et stagnogleys sont sous la dépendance de nappes superficielles d'origine pluviale alors que les gleys sont en général liés à des nappes phréatiques permanentes plus profondes et peu acides. (Dachaufour et N'Guyen Kha : note sur l'état du fer dans les sols hydromorphes 1969).

Le facteur climatologique variant uniquement sous l'influence de la situation géographique dont le rôle est négligeable en ce qui concerne les sols (faibles distances séparant les divers profils, différences d'altitudes insuffisantes pour revêtir un aspect notable), on peut considérer que ses effets seront les mêmes pour tous les profils.

Le type d'hydromorphie est donc régi par les facteurs : topographique, pédogéologique, (profil IV) et biotique.

Si les facteurs géologique et pédologique, topographique et climatologique jouent un rôle déterminant, le facteur biotique qui en dépend jouera un rôle plus passif mais dont l'effet sera limitatif ou au contraire renforçant.

Pour des conditions géopédologiques données, la saison humide et froide sera la plus favorable à l'hydromorphie car à des précipitations importantes (favorisant le cas échéant le drainage oblique et le ruissellement) se joignent des températures basses faisant obstacle à l'évaporation. De plus, pendant cette saison le facteur biotique est inexistant et l'eau n'est pas utilisée.

Pendant la saison douce et sèche, l'évaporation se fait sentir plus nettement (notamment pour les profils n° IV et n° II et V) et le facteur biotique connaissant un essor important, l'eau du sol est fortement utilisée et éliminée par transpiration. Dans le cas du profil IV, on arrive à un assèchement, néfaste pour la végétation. Ajoutons que dans le profil IV, se joint à ces facteurs d'épuisement de l'eau, la percolation lente vers le bas qui va dans le même sens puisque l'enracinement superficiel ne peut réutiliser cette eau perdue dans le sable sous-jacent.

✓ La pauvreté du couvert végétal, le défaut de porosité et la situation topographique permettent d'expliquer la persistance de l'eau dans les profils II et V.

✓ Pendant la saison humide et chaude, les divers facteurs parviennent enfin à s'équilibrer du moins en ce qui concerne les profils I et III.

La topographie y évite une suralimentation, le couvert forestier abondant évite une évaporation trop forte, la fréquence des pluies équilibre les pertes, l'enracinement plus profond permet un approvisionnement constant des espèces végétales hautes.

✓ Dans le profil IV le caractère battant, les faiblesses d'absorption de l'eau par le sol limoneux sont contrebalancés par l'évaporation peu freinée par le couvert végétal mais par là même la transpiration est faible.

Les facteurs renforçants l'emportent encore sur les facteurs limitatifs. Dans le cas des profils II et V, la transpiration végétale et l'évaporation sont insuffisantes et la topographie, jointe à l'imperméabilité du sol contribuent à accentuer l'engorgement déjà favorisé par la présence d'eau stagnante et par la fréquence des pluies.

Notons que la présence de résineux au niveau du profil n° I est un caractère distinctif supplémentaire vis-à-vis du profil n° III. Le système racinaire, relativement superficiel de certains résineux absorbe moins d'eau et ne favorise pas un écoulement profond aussi important que celui des feuillus. En conséquence, on pourrait s'attendre à ce que la nappe d'eau perchée soit plus épaisse sous résineux. Cependant, la densité et la persistance du feuillage des résineux permettent une transpiration à priori plus importante et plus longue, même si elle est ralentie, que les feuillus. Quoiqu'il en soit Lévy (1969) a pu constater pour des sols à pseudogleys, l'existence d'une nappe toujours plus épaisse sous feuillus que sous résineux. Cependant l'hydromorphie ne peut exister dans le profil n° III à cause de la pente qui détermine un écoulement latéral de

la nappe qui ne peut donc jamais stagner dans le profil. (Et qui ne dure pas).

Nous pouvons classer nos profils en fonction de l'hydromorphie croissante de la manière suivante :

-----Hydromorphie croissante ----->
Profil III < Profil I < Profil IV < Profils II et V

Notons avec Plaisance que seuls les sols sub-horizontaux pourront donner lieu à des pseudogleys : dès que le sol acquiert une situation un tant soit peu dépressive il tend vers un gley véritable. Les sols que nous avons étudiés en sont une illustration parfaite.

D) DESCRIPTION DES PROFILS

Les figures 5 à 9 illustrent, schématiquement les profils. Les termes systématiques utilisés ont été empruntés à l'ouvrage de Jamagne (1967) et au Précis de Pédologie de Duchaufour (1970).

1 - Profil n° I

Il s'agit d'un sol lessivé à pseudogley à humus acide de type MOR qui comporte à sa partie supérieure un humus gris très foncé à noir légèrement feuilleté de 0 à 3 cm environ (la limite manque de netteté), particulaire à légèrement grumelleux entre 3 et 10 cm. La limite à 10 cm est irrégulière mais nette. Cet humus coiffe un horizon brun à concrétions ferrugineuses de petites tailles, (1 à 2 cm au plus) et à taches gris foncé d'humus. Ce niveau comporte en outre des tâches d'aspect cendreau en relation peut être avec des phénomènes de micropodzolisation au niveau des racines. Ce phénomène est relaté par nombre d'auteurs, il y a toujours accentuation des phénomènes au niveau des racines ; lorsque les conditions sont oxydantes on peut voir des concrétions s'attacher à celles-ci ; lorsqu'au contraire les conditions sont réductrices, on observe des trainées bleuâtres le long des conduits racinaires ; on observe en outre fréquemment des phénomènes de micropodzolisation en relation avec l'acidité de la rhizosphère et avec aussi l'effet drainant des racines (Clark Gôbin, Sprout 1961, Bétrémieux 1951, Righi 1969, Plaisance 1965).

A 23 cm une limite régulière et nette sépare cet horizon brun de la base du profil par l'intermédiaire d'un fin liseré noir riche en matières charbonneuses mais pauvre en fer comme l'ont révélé les analyses chimiques ce qui exclue l'hypothèse d'un B ferrique.

Dessous se trouve le faciès marmorisé dont la partie supérieure est en fait blanche. Les analyses chimiques révèlent que cette partie est de fait très appauvrie en fer. La couleur blanchâtre a pour origine cet appauvrissement en fer.

La marmorisation est par contre fort développée dans le niveau sous-jacent dont la limite supérieure n'est pas distincte.

A la base de ce niveau marmorisé on observe en outre un enrichissement en argile, la structure absente au-dessus prend une tendance polyédrique.

Ce profil apparaît très nettement coupé en deux, la coupure se faisant au niveau du liseré noir.

La présence de cette coupure nous a gêné pour l'interprétation du profil. M. Durin pense que ce liseré (que l'on retrouve ailleurs à Saint Amand : profil n° V) a une origine anthropique. Il s'agirait d'un fond de charbonnage qui se serait trouvé affleurant à une certaine époque et qui aurait ensuite été alluvionné ; la datation de ce phénomène relève de l'archéologie et de l'anthropologie. Ce niveau enfoui est très compacté et, dans la fosse que nous avons creusée pour dégager le profil, il apparaît très nettement sous forme d'une croûte indurée et très compacte.

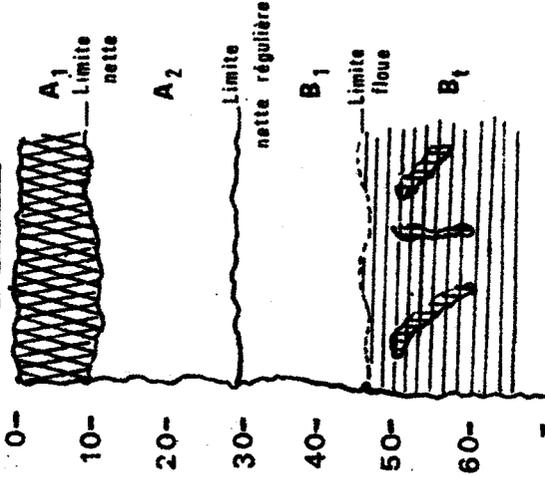
Il est vraisemblable que ce soit lui qui détermine les limites de l'hydromorphie, faisant par sa compaction obstacle aux remontées capillaires. La nappe ne remontant que rarement au-dessus de 60 cm, il est probable que la partie supérieure du faciès marmorisé soit en fait soumise à une imbibition capillaire.

La faible épaisseur de ce niveau jointe à des conditions d'ensemble (effet écran dû à la litière, meilleure structure des horizons supérieurs) non favorables à l'hydromorphie fait qu'en définitive l'hydromorphie reste limitée à la partie inférieure du profil.

Du point de vue systématique, la partie supérieure comporte donc un complexe humifère $A_0 - A_1$, reposant sur un B. Le liseré quant à lui serait le reliquat d'un $A_0 - A_1$, compacté reposant sur un A_2 puis un B. La nature charbonneuse du niveau $A_0 - A_1$ inférieur ayant une origine anthropique vraisemblable.

FIG.: N° 7

PROFIL N° III



LEGENDES

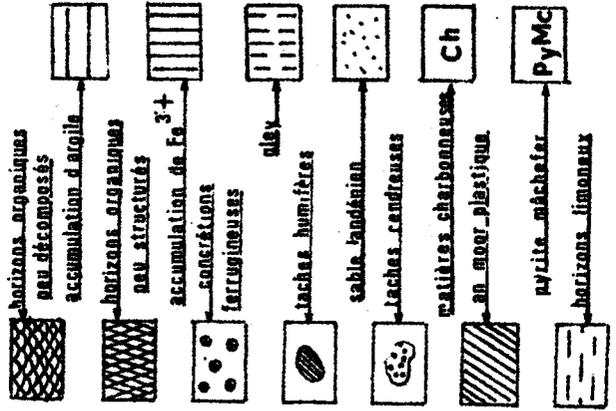


FIG.: N° 6

PROFIL N° II

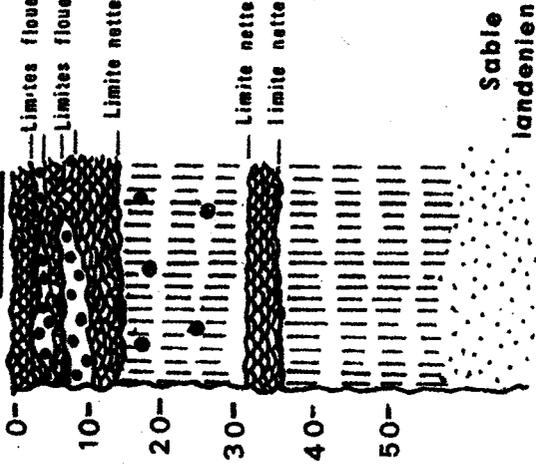


FIG.: N° 8

PROFIL N° V

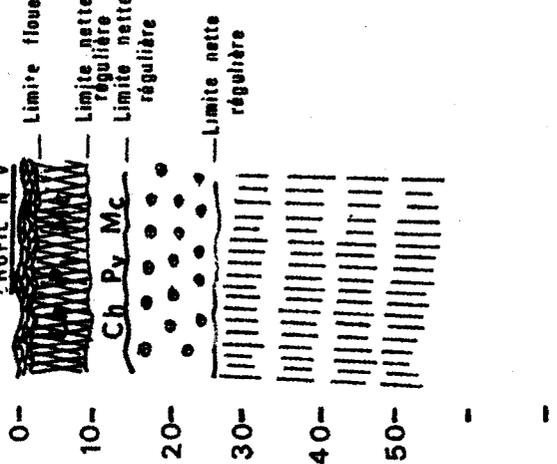


FIG.: N° 5

PROFIL N° I

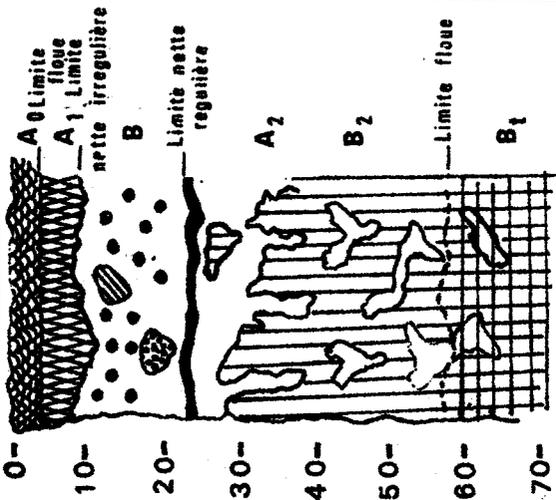
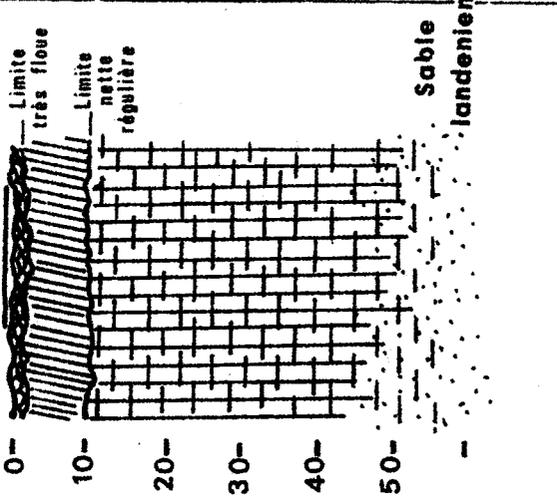


FIG.: N° 8

PROFIL N° IV



BUS LILLE

Notons également que le liseré compacté charbonneux fait obstacle à la pénétration des racines et à celle de la microfaune.

2 - Le profil n° II

Il comporte une succession de lits tourbeux et de lits sableux.

De 0 à 3 cm un premier lit tourbeux à structure fibreuse, de 3 à 6 cm, un lit sableux verdâtre à roux riche en concrétions ferrugineuses qui s'estompe fréquemment et les deux premiers lits de tourbe se mêlent alors. Des concrétions s'attachent aux fibres végétales.

De 6 à 9 cm un lit tourbeux à structure fibreuse.

De 9 ou 10 à 12 cm un lit sableux à dominante verdâtre avec quelques concrétions. Comme le premier niveau sableux il n'existe pas toujours et à sa place on a une continuité des trois lits tourbeux mêlés de sable.

De 12 à 15 cm, un lit tourbeux.

De 15 à 32 cm, un lit sableux de teinte verdâtre pauvre en concrétions.

De 32 à 36 cm un lit tourbeux.

A partir de 36 cm un lit sableux vert (gley) sans concrétions et qui passe progressivement au sable landénien de couleur fauve.

Cette observation s'inscrit en faux contre l'hypothèse fréquemment émise d'un âge très jeune de la tourbière.

Il semble qu'en fait cette tourbière fonctionne depuis très longtemps mais qu'elle ait connu plusieurs phases successives de comblement par un alluvionnement sableux.

Le gley s'étend du 2ème niveau sableux au quatrième.

3 - Le profil n° III

L'horizon A_0 a été décapé.

Le profil débute donc par un A_1 noir légèrement grummeleux de 0 à 10 cm et dont la limite inférieure est nette.

De 10 à 28 cm on observe un horizon brun à structure grummeleuse parcouru de nombreuses racines. Sa limite inférieure est régulière et relativement nette.

De 28 à 45 cm, un horizon brun gris clair sableux apparemment sans structure, plus pauvre en racines. La limite inférieure n'en est pas nette.

A partir de 45 cm, un horizon B₁ brun gris clair zébré d'ocre, très argileux, à structure polyédrique et pauvre en racines.

4 - Le profil n° IV

Il comprend :

De 0 à 10 cm un humus plastique noir, peu décomposé entre 0 et 3 cm et de type An moor ;

à partir de 10 cm, on a un aspect limoneux plastique et gras richement concrétionné voire marbré, vers la base du profil surtout.

5 - Le profil n° V

Il comporte :

De 0 à 3 cm un horizon fibreux organique peu décomposé et d'apparence tourbeuse ;

de 3 à 5 cm, un horizon organo-sableux noir ;

de 5 à 12 cm, un niveau minéral pyriteux à mâchefer et charbon d'origine anthropique;

de 12 à 26 cm un horizon sableux roux, riche en concrétions et sans racines.

A partir de 26 cm, un sable bleu verdâtre gleyifié qui passe progressivement vers le bas au sable landénien fauve.

Il est remarquable de constater qu'ici encore c'est le niveau anthropique qui constitue la limite inférieure des racines.

6 - Le problème des alluvionnements

Bien que sortant du cadre de ce travail, il me semble bon de faire le point sur cette question.

Voyons tout d'abord quels sont les faits :

1°) Le sol du profil I et celui du profil V renferment à un certain niveau un lit organogène d'origine anthropique incontestable.

Ce niveau n'est pas limité à ces profils, nous avons pu le trouver par des sondages à la tarière, autour du profil I ainsi que dans une zone assez vaste autour du profil V.

Dans la zone du profil V, il présente un aspect un peu différent puisqu'il renferme en plus des produits charbonneux, du mâchefer.

La présence d'une ancienne voie ferrée à cet emplacement (voie qui n'existe plus d'ailleurs) nous a fait voir là l'origine de ce niveau. Par suite nous avons d'ailleurs rapidement abandonné l'étude de ce profil qui de ce fait ne constituait pas un bon profil d'étude, pour choisir en remplacement le profil n° II, sis au Mont des Bruyères.

En outre, la végétation au niveau de ce profil n° V est vraisemblablement jeune. Cette hypothèse ne semble pas devoir être appliquée au profil I dont la végétation est plus ancienne et où le niveau anthropique peu épais et régulier est très compact ce qui n'est pas le cas dans le profil V.

2°) Le profil n° II comporte une succession de lits tourbeux enfouis sous des lits sableux plus ou moins épais. Ceci témoigne incontestablement de plusieurs alluvionnements successifs.

3°) Monsieur Durin nous a signalé que l'on peut observer sur des sols sis à l'emplacement actuel du théâtre de verdure et du camping du Mont des Bruyères, des horizons B superposés et témoignant par là de l'existence de paléosols.

4°) Le podzol du Mont des Bruyères est extrêmement localisé ce qui laisse supposer qu'il n'est pas très ancien ou que là aussi, il y a eu modification de l'évolution pédogénétique.

Les taches cendreuseuses de notre profil I que nous attribuons en première approximation à des phénomènes de micropodzolisation autour des racines peuvent avoir des dimensions importantes de l'ordre de 6 à 8 cm ; en outre des sondages à la tarière à proximité de ce profil (1 à 3 m de distance) montrent la généralisation du phénomène, on a véritablement un horizon décoloré à la profondeur de l'horizon brun concrétionné. On peut donc penser à la suite de ces deux types d'observation que le profil I subit actuellement une évolution de type podzologique.

Cette observation est à rapprocher de celles faites par Capochichi (1969) pour les mêmes sols sableux.

En outre, la superposition directe de l'humus sur un horizon de tendance B est une autre preuve de la jeunesse du sol.

De l'avis de Monsieur Durin et du nôtre, la forêt a, en bien des points, connu un alluvionnement très récent ou même plusieurs alluvionnements successifs que l'on pourrait essayer de dater par palynologie à la tourbière du Mont des Bruyères.

L'exiguité du podzol quant à elle, pourrait peut-être s'expliquer par une modification brutale de la végétation à la suite d'incendies, par exemple.

sions, masse et volume sont connus. Sachant que la sédimentation est un phénomène régi par le temps, on aura à chaque instant une image différente de la colonne eau + sédiment, dont la densité ira croissant vers la base de celle-ci pour des temps de sédimentation croissants. Cela se traduira par un enfoncement donné du densimètre pour un temps donné. Cette méthode employée avec succès au laboratoire central des Ponts et Chaussées donne des résultats reproductibles et cohérents mais qui exigent des corrections nombreuses avant utilisation par suite du grand nombre de paramètres intervenant.

La méthode de Robinson que nous avons utilisée est d'un emploi plus facile et nous évitait l'achat d'un densimètre.

Elle consiste dans le prélèvement à une profondeur constante (10 cm) après des temps de sédimentation plus ou moins longs (et fonctions de la température) de fractions différentes. Ainsi, pour un température de 20°, on prélèvera les limons grossiers au bout de 26", les limons fins au bout de 4^h48" et les argiles au bout de 8 heures.

2. Technique

Avant analyse, l'échantillon doit subir un traitement qui consiste dans :

- le séchage à l'air
- le tamisage à 2 mm (on travaillera sur une fraction fine)
- la prise d'échantillon et son pesage
- la destruction des matières organiques par l'eau oxygénée
- la destruction des agrégats
- la dispersion des colloïdes

Il est nécessaire de rappeler que la collecte de la terre sur le terrain se fait par des prélèvements en divers points de l'horizon considéré (5 à 10) de manière à obtenir un échantillon global le plus homogène possible. Le poids total de terre collectée oscille entre 1 et 2 kg.

Voyons maintenant l'exécution pratique des diverses opérations précédant la sédimentométrie proprement dite.

a - le séchage

La terre conservée dans des sachets hermétiques de plastique est disposée dans des boîtes ouvertes le plus large possible, de manière à homogénéiser au mieux le séchage. Ces boîtes sont placées sur une paille, exposées à l'air ambiant du laboratoire.

Notons que l'analyse complète portera toujours sur au moins trois prises d'essai d'un même échantillon et que les résultats tels que nous les présentons dans les tableaux sont en fait des moyennes entre les 3 ou plus valeurs ainsi obtenues.

Lorsque les échantillons sont bien secs (la durée de séchage varie en fonction de la teneur en eau de l'échantillon et de sa nature ; les terres limoneuses et argileuses perdent plus difficilement leur eau) ils sont homogénéisés par brassages successifs et pilés si nécessaire au mortier.

b - Tamissage

Ils sont ensuite tamisés à 2 mm. La fraction inférieure à 2 mm est conservée pour analyse et brassée de nouveau. Les terres fines sont en effet plus homogènes.

c - Prise d'essai

On prélève ensuite 10 grammes de l'échantillon en plusieurs prises faites en divers endroits afin d'obtenir le maximum d'homogénéité.

La précision de la pesée n'a pas à être trop grande car nous verrons ensuite que, dans la pratique, les erreurs dont nous envisagerons les causes peuvent être notables. Le centième de gramme nous est apparu raisonnable.

La prise d'essai était placée dans un bécher de 300 ml. Ici intervient une première source d'erreur ; le poids du bécher étant trop élevé (et aussi ses dimensions dans le cas où on utilise une balance de précision monoplateau de type Mettler) pour permettre une pesée directe de l'échantillon dans celui-ci ; l'échantillon doit être placé sur un fragment de papier de préférence glacé, pour être ensuite transporté dans le bécher. Les terres argileuses ou limoneuses ont tendance à coller sur le papier et sont difficiles à récupérer totalement. On risque donc déjà de perdre une partie des fines à ce stade (3 à 6 mg).

On limite ces pertes en raclant le papier au moyen d'une spatule ou en lavant à la pissette.

d - Destruction de la matière organique

Ensuite intervient la destruction des matières organiques. Cette opération est très longue et requiert en fait une concentration optimale de l'eau oxygénée utilisée.

Nous avons fait appel, dans nos premiers essais, à de l'eau oxygénée fortement active pensant que la concentration à utiliser était fonction des teneurs en matière organique. Nous l'avons donc utilisée pour les horizons superficiels riches en matière organique et l'avons conservée ensuite pour les échantillons moins riches imaginant ainsi que l'opération en serait plus rapide. De fait, il s'est avéré que la destruction de la matière organique n'était pas accélérée (nous l'avons constaté par la suite en utilisant de l'eau oxygénée moins active), que d'autre part, le bouillonnement intense produit lors de la réaction causait des pertes importantes en éléments argileux et limoneux, pouvant atteindre 4 à 5 % par rapport à la prise totale pour les échantillons riches en fines, soit parfois 40 à 50 % des fines.

D'autre part, l'excès d'eau oxygénée n'était jamais éliminé complètement ce qui avait pour effet de gêner la sédimentation à cause du dégazage.

Par la suite, nous avons donc eu recours à de l'eau oxygénée moins active (27 volumes). Cette nécessité nous a été confirmée par la lecture dans une documentation du résumé d'une note ancienne relative à ce problème et qui faisait état d'une concentration optimale de l'eau oxygénée. G. Aubert recommande pour sa part une attaque par de l'eau oxygénée à 30 volumes complétée par une attaque avec de l'eau oxygénée à 110 volumes.

Une autre face de ce problème est le chauffage. Il nous est apparu qu'il était préférable d'avoir recours à un chauffage modéré et prolongé plutôt qu'à un chauffage fort et court qui de fait n'avait pas d'effet accélérateur notable mais présentait le gros inconvénient de causer un bouillonnement important et difficilement contrôlable. Ce pétilllement entraînait des pertes en fines.

Ajoutons enfin que l'utilisation d'eau oxygénée à 110 volumes s'avère coûteux et d'emploi relativement dangereux.

Nous avons donc utilisé dans la suite de notre travail de l'eau oxygénée à 27 volumes en chauffant modérément sur un bain de sable. Les temps d'action variaient entre 24 et 36 heures.

La fin de la réaction est constatée par la cessation de l'effervescence. Un chauffage prolongé de deux heures permettait une élimination complète de l'eau oxygénée dont nous avons dit que le dégazage était un inconvénient de poids lors de la sédimentation.

Remarquons que l'élimination de l'excès d'eau oxygénée peut être accélérée par utilisation d'un catalyseur comme le bioxyde de manganèse qui sera broyé à une dimension supérieure à 2 mm. Il pourra ainsi être récupéré ensuite par tamisage.

e - Dispersion

L'échantillon peut maintenant subir l'opération suivante qui est la dispersion des agrégats.

Celle-ci se faisait classiquement au moyen de l'acide chlorhydrique dilué (Duchaufour, 1970) qui était éliminé ensuite par filtration et lavage. Cette technique s'appliquait surtout aux sols non calcaires. Pour les sols riches en calcaire fin, on lui préférait le déplacement du calcium par échange avec l'ion K^+ ou Na^+ , les argiles alcalines ayant tendance à se disperser.

Demolon recommande également l'emploi du citrate de soude comme agent dispersant.

Pour notre part, nous avons préféré l'emploi d'une méthode plus rapide, qui s'applique à tous les types de sols et qui tend à se généraliser maintenant, consistant dans une dispersion mécanique suivie d'une dispersion chimique.

L'agitation mécanique est réalisée au laboratoire des Ponts et Chaussées au moyen d'un appareil rotatif du type mixeur tel qu'en utilisent les maîtresses de maison. Cet appareil est couplé à un rhéostat qui permet d'en régler la vitesse de rotation.

Nous avons nous-mêmes employé cette technique dans nos premiers essais mais l'avons rapidement abandonnée car l'appareil avait un tube creux dans lequel remontaient les particules fines occasionnant des pertes notables, car certains endroits étaient d'accès difficile pour leur récupération. En remplacement nous avons envisagé l'emploi d'une cuve à ultrasons mais celle dont nous pouvions nous servir ne convenait pas à cause de sa faible contenance.

En définitive, nous avons eu recours à un agitateur magnétique. L'agitation se faisait pendant 30' à vitesse moyenne. Au delà de 30' il n'y a pas d'amélioration notable des résultats.

Pour une meilleure efficacité la dispersion était complétée par l'action d'un dispersant chimique, en l'occurrence l'hexamétaphosphate de soude.

La terre, après destruction des matières organiques est donc agitée mécaniquement durant 30' à l'aide d'un agitateur magnétique.

Après cela on transvase dans une éprouvette jaugée d'un litre à large goulot (6 cm) afin d'éliminer les effets des parois sur la sédimentation. On y ajoute 10 cc d'hexamétaphosphate de soude en solution et l'on complète à un litre avec de l'eau déminéralisée.

f - Sédimentométrie

Après cela on peut procéder à la sédimentométrie proprement dite.

- tout d'abord il faut contrôler la température de l'eau ;
- ensuite, la terre est remise en suspension par des retournements successifs de l'éprouvette. Après quoi, l'éprouvette est mise au repos sous la pipette Robinson et le chronomètre déclenché.

Quelques secondes avant le prélèvement, la pipette est introduite délicatement dans la suspension jusqu'à la profondeur de 10 cm. Au temps écoulé on prélève 20 cc de suspension.

On procède comme pour le prélèvement de n'importe quel liquide du moins pour la première phase de l'opération ; on aspire la suspension jusqu'au-dessus de la jauge supérieure de la pipette (le niveau de jauge inférieur correspond à l'extrémité de la pipette), qui est ici le robinet puis on ferme celui-ci. L'excès de solution n'est pas laissé redescendre jusqu'au trait de jauge, ce qui peut demander un certain temps et occasionner de la sorte une sédimentation à l'intérieur de la pipette. On l'élimine en commutant à l'aide du robinet, la partie située au-dessus de la jauge avec le trop plein. Le contenu de la pipette quant à lui est recueilli dans une coupelle de porcelaine qui ira à l'étuve à 105° jusqu'à séchage complet de la fraction prélevée (une nuit).

Ensuite, la coupelle est exposée à l'air libre pour sa réhydratation (puisqu'au départ, la prise d'échantillon se fait sur une terre séchée à l'air simplement), après quoi, elle sera pesée (on aura bien sûr taré la coupelle avant son utilisation).

Les opérations décrites ci-dessus sont schématisées par la figure 10.

3. Résultats

Pour une température de 20°, les prélèvements faits à la profondeur de 10 cm, aux temps 26", 4'48" , 8h portent de fait respectivement sur les limons grossiers + limons fins + argiles, limons fins + argiles, argiles.

Notons que dans chaque cas intervient également une surcharge d'hexaméthaphosphate de soude que dans la suite nous désignerons par HMP.

L'HMP doit donc faire lui aussi l'objet d'une pesée. Pour ce faire, on utilise 10 cc de la solution qui a servi dans la phase de dispersion des colloïdes (solution à 102 g/l). Ces 10 cc sont placés dans une éprouvette jaugée d'un litre, puis on complète à 1000 cc avec de l'eau déminéralisée.

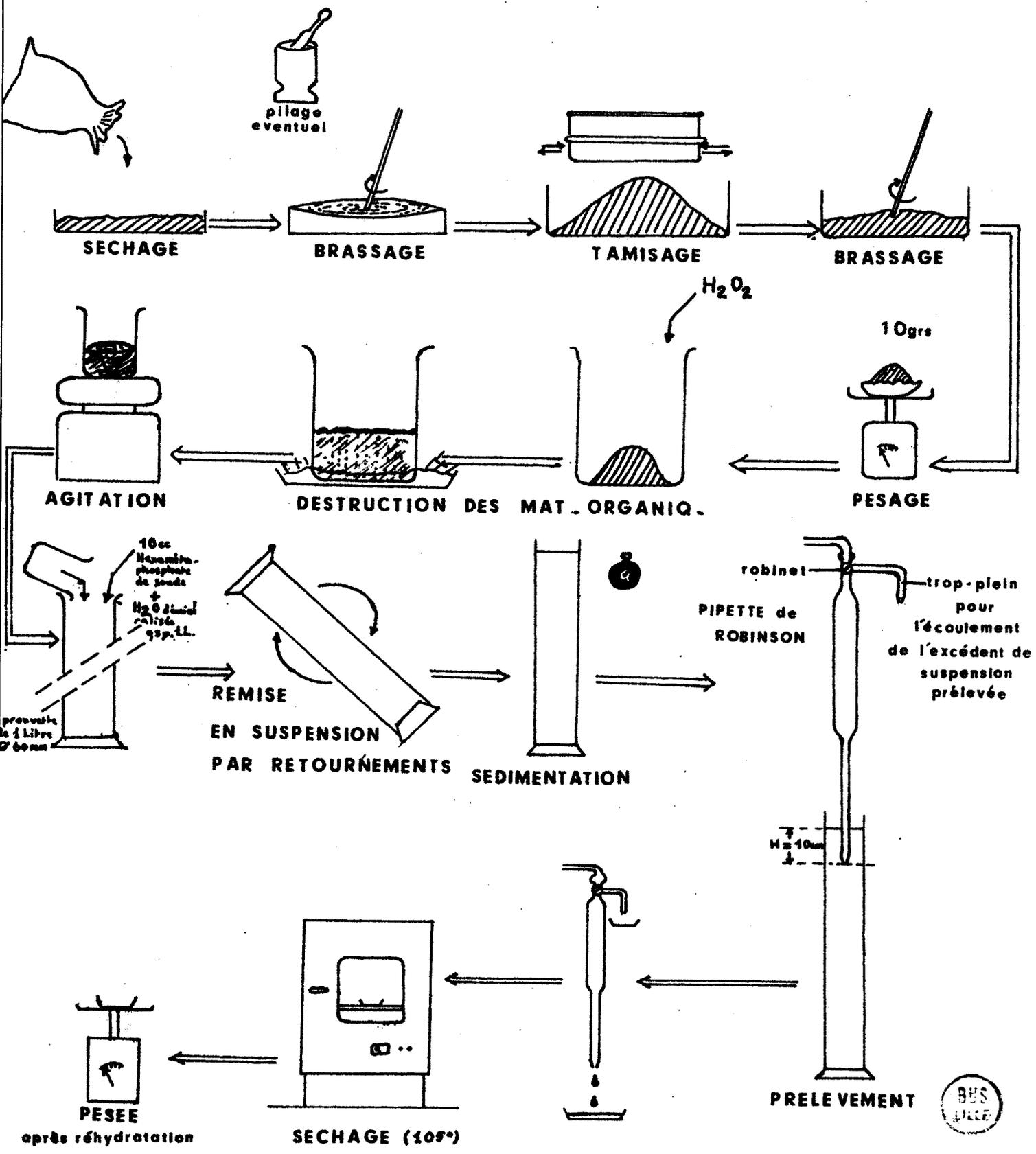


FIGURE N°10

Après homogénéisation, on prélèvera 20 cc de solution à 10 cm de profondeur, qui seront recueillis dans une coupelle. La coupelle est ensuite mise en étuve à 105° pour séchage puis réhydratée à l'air libre. Enfin on réalise la pesée.

Nota : dans la suite de cet exposé, nous utiliserons les abréviations suivantes :

LG = limons grossiers , LF = limons fins , A = Argiles , HMP = Hexamétophosphate de soude.

Si P_1 est le poids de la fraction prélevée à 26", P_2 le poids de la fraction prélevée à 4'48", P_3 le poids prélevé à 8h00 et P_4 le poids de la surcharge d'hexamétophosphate, on obtiendra :

$LG = P_1 - P_2$; $LF = P_2 - P_3$; $A = P_3 - P_4$. Ces valeurs correspondant à 20 cc, une multiplication par 50 donnera les valeurs pour 1000cc donc pour 10 grammes de terre.

Une nouvelle multiplication par 10 donnera les valeurs en pourcentages telles que nous les présentons dans le tableau 7.

Les fractions sableuses quant à elles sont déterminées par tamisage. On réalise tout d'abord sur l'ensemble des fractions déposées au fond de la colonne, un tamisage à 50 microns qui permet d'éliminer l'ensemble des fractions limoneuses.

Le résidu qui correspond aux fractions sableuses est recueilli dans une coupelle, séché à 105°, réhydraté, puis enfin pesé.

La part des sables fins par rapport aux sables grossiers est déterminée par un tamisage à sec à 200 microns soit 0,2 m/m.

Rappelons enfin que les limites des diverses fractions sont définies d'après Atterberg à savoir :

0,2 m/m < d < 2m/m = Sables grossiers (SG)
0,05 m/m < d < 0,2 m/m = Sables fins (SF)
0,02 m/m < d < 0,05 m/m = Limons grossiers (LG)
0,002 m/m < d < 0,005 m/m = Limons fins (LF)
d < 0,002 m/m = Argiles (A)

(d = diamètre des particules)

Tableau N° 7

Résultats des analyses mécaniques

Profond.	Profil	N° Echan.	LG°/°	LF°/°	A °/°	SF °/°	SG °/°	S °/°	L°/°	A °/°	MO °/°	Total
17/23	I	1	4,62	18,22	5,05	54,50	13,89	68,39	22,84	5,05	2,33	98,61
23/24	I	3	6,40	6,40	5,60	50,30	27,50	77,80	12,80	5,60	2,58	98,78
49/53	I	5	5,90	27,60	traces	49,00	14,01	63,01	33,50	traces	2,20	98,71
6,5	II	6	2,50	traces	4,70	85,30	8,40	93,70	2,50	4,70	1,56	100,86
10	II	7	0,60	traces	5,00	83,80	7,14	90,94	0,60	5,00	3,46	100,00
27/30	II	8	0,25	0,65	8,47	86,60	3,00	89,60	0,90	8,47	1,20	100,17
47	II	9	2,42	2,52	12,10	78,50	2,22	80,72	4,94	12,10	2,38	100,14
2/10	III	14	5,30	6,00	14,60	/	/	64,30	11,30	14,60	10,32	100,52
10/20	III	15	0,10	0,20	25,00	67,02	3,45	70,47	0,30	25,00	non dosé	/
50	III	16	0,60	2,10	24,80	65,30	2,10	67,40	2,70	24,80	3,64	98,54
95	III	10	n o n a n a l y s é									
2/10	IV	11	21,65	22,65	26,85	14,46	3,55	19,01	44,30	26,85	10,62	99,78
20	IV	12	20,70	24,90	33,44	8,64	2,80	11,50	45,60	33,44	non dosé	/
35	IV	13	20,50	15,62	45,10	10,95	2,12	13,07	36,12	45,10	7,30	101,59



Résultats

Nous reportons les résultats dans le tableau 7. Nous voyons que la texture est toujours fine, essentiellement sableuse dans les profils I, II et III, limono argileuse dans le profil IV.

Notons que les teneurs en argiles peuvent être notables dans le profil III dont les fractions limoneuses sont parfois réduites à néant.

Remarquons que l'argile fait défaut dans l'échantillon 5 (profil I) situé à une cinquantaine de cm de profondeur. Sachant d'une part - comme nous l'avons vu plus haut (II, D, 6) - que le profil I consiste dans la superposition de deux sols et d'autre part que l'argile est à la fois présente dans le sol supérieur et dans la roche, on peut penser qu'une partie, dans la roche, en soit héritée du paléosol.

Nota : Les matières organiques ont été évaluées par différence pondérale après calcination au four.

B) TAUX D'HUMIDITE

1. Principe

Nous avons déterminé le taux d'humidité de nos sols au laboratoire, par différence entre le poids de terre fraîche humide et le poids de la même terre après séchage à l'étuve à 105°.

La prise d'essai de terre étant de 10 grammes de sol frais, nous avons : $(10 - \text{poids de terre sèche}) \times 10 = \text{humidité } \%$.

Notons que la mesure du taux d'humidité était réalisée le plus rapidement possible après la collecte de la terre afin d'éviter une évaporation au contact de l'air du laboratoire. Là encore, chaque résultat est en réalité une moyenne obtenue entre plusieurs prises d'essai d'un même échantillon. Et si nous n'en faisons pas état à chaque chapitre on se souviendra que cette méthode a été utilisée pour chaque dosage qu'il soit du domaine physique, chimique ou microbiologique.

2. Résultats et discussion (tableau 8)

Les mesures du taux d'humidité ont été faites en juin 1974 pour l'ensemble des profils. Nous voyons qu'à la même date les échantillons du profil I présentent des taux d'humidité voisins : seul l'échantillon 3 a une

humidité légèrement supérieure. La porosité est relativement uniforme le long du profil. La pénétration des eaux vers la base est légèrement freinée par le niveau 3 qui, quoique sa granulométrie soit assez grossière est en fait très compacté. Sa porosité est vraisemblablement plus faible. Cette observation confirme les suppositions que nous avons faites plus tôt.

Dans le profil II, la granulométrie est finement sableuse pour l'ensemble du profil. L'échantillon 8 est le plus aquifère car les échantillons 8 et 9 sont plus argileux et font obstacle à l'écoulement de l'eau vers le bas. Le sable landénien sous-jacent est d'ailleurs nettement moins humide et inaffecté par l'hydromorphie comme nous l'avons déjà dit plus tôt.

L'échantillon 8 est prélevé dans le troisième lit sableux ; il repose sur une tourbe compactée qui fait obstacle à l'écoulement de l'eau. Sur le terrain, nous avons parfois observé une limite nette dans la teinte du quatrième niveau sableux légèrement en-dessous de ce lit tourbeux ; les 5 à 10 cm supérieurs avaient une teinte plus foncée due à une humidité plus importante.

Il parvient relativement peu d'eau à cette profondeur et la texture elle-même plus argileuse contribue à affaiblir l'humidité de la base du profil en s'imprégnant de l'eau qui arrive à filtrer et en la retenant énergiquement.

Le profil n° III quant à lui, retient plus d'eau dans sa partie supérieure du fait de la richesse en matière organique vraisemblablement liée à l'argile.

La base du profil plus argileuse constitue un frein à l'écoulement vertical de l'eau. Celle-ci n'est pas retenue par les niveaux intermédiaires plus poreux.

Autres mesures

Au mois de décembre 1973 furent faites des mesures d'humidité sur le profil I : les résultats sont les suivants : de 0,0 à 3 cm : 56,3 %, de 3 à 7 cm : 25,25 %, de 10 à 20 cm : 15 %, de 23 à 33 cm : 15 %, de 35 à 45 cm : 14,15 %, de 55 à 65 cm : 13 %, de 75 à 85 cm : 14,5 %. A cette époque le niveau supérieur de la nappe était à 1,20 m de profondeur.

De ces résultats on retiendra le très fort pouvoir de rétention de la litière dont nous avons déjà parlé.

Tableau 8
Taux d'Humidité %

<u>Profil</u>	<u>Echantillon</u>	<u>Profondeur</u>	<u>Humidité %</u>	<u>Date</u>
I	1	17/23cm	10,7	Jun 74
I	2	10/15	12,3	" "
I	3	23/24	13,4	" "
I	4	40/45	12,0	" "
I	5	49/53	11,5	" "
II	6	6,5	17,7	" "
II	7	10	20,0	" "
II	8	27/30	25,4	" "
II	9	47	23,1	" "
IV	11	2/10	32,5	" "
IV	12	20	22,7	" "
IV	13	35	23,9	" "
III	14	2/10	25,6	" "
III	15	10/20	11,2	" "
III	16	50	12,6	" "
III	10	95	19,2	" "

Mesures complémentaires

I	2	10/15	15,0	Dec. 73
I	4	40/45	14,15	" "
V	5/12cm	5/12	21,01	" "
V	12/26cm	12/26	19,6	" "
V	> 26cm	> 26	18,3	" "
I	4	40/45	13,5	Sep. 74
II	9	47	23,0	" "
IV	13	35	23,0	" "
III	16	50	14,3	" "



Pour le reste du profil, les valeurs sont dans l'ensemble plus élevées qu'en juin 1974. Une mesure faite sur l'échantillon n° 4 en septembre 1974 a donné : 18,5 %.

Si on se reporte au diagramme de pluviométrie, on voit que les précipitations ont été de 45 mm en décembre 1973, 60 mm en juin 1974, 68 mm en août 1974.

Bien que les précipitations soient plus faibles en hiver, l'humidité est plus importante, ceci tient à l'absence d'activité de la part de la végétation et de la microflore mais également à un ensoleillement plus faible.

En ce qui concerne l'échantillon n° 4, il présente une hausse du taux d'humidité en septembre par rapport à juin. Ceci peut s'expliquer encore par l'activité de la végétation en déclin par rapport à la période printanière, mais également par la hausse des précipitations.

Des mesures ont été faites en septembre 1974 sur le niveau 9 du profil II, sur le niveau 16 du profil III et sur le niveau 13 du profil IV.

Par rapport aux valeurs obtenues en Juin 1974, on constate une stagnation pour le n° 9, une hausse pour le n° 16, une hausse enfin pour le n° 13.

Le n° 9, nous l'avons dit plus haut, est peu concerné par les modifications de la pluviosité du fait de la faible quantité d'eau qui y parvient. Les variations à ce niveau doivent s'étaler sur une période de temps très longue.

Le n° 16 ne fait pas frein à l'écoulement de l'eau qui est arrêtée plus bas.

Le n° 15, sus-jacent, est lui aussi poreux. L'augmentation de la teneur en eau doit s'expliquer de la même manière que pour le profil n° 1.

Le n° 13 marque une baisse légère mais a une tendance nette à la stagnation. Le sol du profil IV, nous l'avons dit, a un fort pouvoir éponge dû à sa porosité mauvaise. Lorsque les précipitations deviennent très importantes, il ne peut plus absorber l'eau qui stagne à la surface du sol, pouvant former des petites flaques.

Il est vraisemblable que la mesure faite en septembre est imputable à ce phénomène. Le sol reçoit plus d'eau qu'il ne peut en absorber en surface, l'écoulement vers le bas ne se fait plus ou se fait plus mal, car n'oublions pas que le niveau 13 se trouve à la base du profil.

C) pH

1. Principe de la mesure

Nous avons mesuré le pH des sols expérimentalement au laboratoire sur des échantillons de terre en suspension dans l'eau.

Nous avons réalisé les mélanges à raison de un volume de sol pour deux volumes d'eau distillée.

La mesure a été faite après remise en suspension de la terre, par agitation. Nous avons utilisé un pH mètre à électrode de verre calomel.

2. Les résultats : TABLEAU N° 9

---:---:---:---:---:---

le pH

Profil	Echantillon	Profondeur	pH
I	1	17/23	4,10
I	2	10/15	4,20
I	3	23/24	4,12
I	4	40/45	4,26
I	5	49/53	4,12
II	6	65	5,25
II	7	10	5,00
II	8	27/30	4,55
II	9	47	5,70
IV	11	2/10	4,70
IV	12	20	6,10
IV	13	35	5,50
III	14	2/10	4,28
III	15	10/20	4,27
III	16	50	4,39
III	10	95	4,35
V	2	5/12	5,20
V	3	12/26	4,90
V	4	26 +	4,50

Nous voyons que les quatre sols sont des sols acides.

Le pH est uniforme sur l'ensemble du profil I et oscille

autour de 4,1-4,2, qui sont des valeurs basses pour un sol.

Le pH de la litière de ce même sol était de 4,3.

Le profil n° III est aussi celui d'un sol très acide, le pH oscille autour de 4,3 pour l'ensemble du profil.

Le profil n° II a un pH également acide mais moins fortement acide que les profils I et III. Le niveau 9 a le pH le plus faiblement acide, qui le rapproche sous cet angle des gleys. La partie supérieure plus fortement acide s'apparente davantage à des pseudogleys.

Le profil n° IV a un pH moins acide. Les variations notables le long du profil correspondent à la présence de matière organique acide en surface et au passage au sable vers la base.

D) CONCLUSIONS GENERALES DES PROPRIETES PHYSIQUES

Le pH est dans l'ensemble assez fortement acide sauf pour le profil IV où l'acidité est moins nette et doit être imputée à la nature alluvionnaire du sol encore peu désaturé en bases malgré l'action néfaste de l'hydromorphie.

Dans le cas de l'échantillon n° 9, la hausse du pH doit pouvoir s'expliquer par une nature illuviale. Les quelques bases pouvant être présentes doivent s'accumuler à ce niveau, notamment grâce au drainage oblique des sols de pente avoisinants. L'humidité, nous l'avons souligné, est plus faible qu'il ne paraît à l'observation sur le terrain. Elle est assez homogène pour les divers horizons d'un même profil témoignant d'une porosité uniforme.

Les niveaux comportant un complexe argillo-humique (N° 14) sont plus humides mais l'existence du complexe y maintient une structure assez bonne qui permet un écoulement normal de l'eau.

La fraction de sables grossiers dans laquelle entrent de nombreuses particules charbonneuses, est plus développée dans l'échantillon n° 3 (profil I).

Sa compaction entraîne un colmatage des vides par les particules fines heureusement peu nombreuses et perturbe quelque peu l'écoulement de l'eau vers la base du profil.

Le profil IV présente une granulométrie plus fine qui est un frein important à l'écoulement vertical des eaux. Il présente un caractère

spongieux vis-à-vis de l'eau et la lenteur de l'écoulement justifie la stagnation de celle-ci en surface et la formation de flaques et mares après de longues pluies ou des pluies fortes de courte durée. Cette texture lui confère un caractère de battance en surface.

La structure est massive et asphyxiante en phase humide, polyédrique en phase de dessiccation.

Notons que la carence en limons dans le profil III lui confère une hétérogénéité texturale très grande. Les argiles atteignant 25 % ne forment pas avec le sable un ensemble aussi bien structuré qu'elles le feraient en présence de limons qui possèdent déjà certaines propriétés colloïdales. Il s'agit vraisemblablement ici d'argiles assez dispersées. Elles sont sans doute liées aux humates dans la partie supérieure du profil où, là, elles jouent un rôle important dans l'édification de la structure et possèdent un pouvoir de rétention certain.

Dans ce but, nous envisagerons dans un premier paragraphe - que nous intitulerons : "Rappel de quelques propriétés du fer" - la définition du domaine naturel, puis le rôle du Eh et du pH en nous aidant de données bibliographiques expérimentales. Puis, dans un second paragraphe - intitulé : "Formes du fer dans le sol" - nous parlerons des espèces minérales contenant du fer que l'on est susceptible de rencontrer dans les sols et en particulier dans les sols hydromorphes et nous définirons les "formes du fer" qui ont fait l'objet de notre étude.

A) RAPPEL DE QUELQUES PROPRIETES DU FER

Nous nous aiderons de diagrammes Eh/pH établis par Garrels et Christ (1965) à partir des lois de la thermodynamique appliquées à des réactions à l'équilibre. Il s'agit des diagrammes de stabilité des hydroxydes puis des oxydes, carbonates et sulfures de fer en fonction du Eh et du pH. Sur chacun de ces diagrammes, sont figurées les limites du "domaine naturel".

Nous donnerons sommairement à titre d'exemple le mode de construction du diagramme des hydroxydes. Le diagramme des oxydes, carbonates et sulfures résulte de la superposition du diagramme des carbonates et du diagramme des sulfures construits séparément de la même façon que le diagramme des hydroxydes.

1. Le domaine naturel

Le domaine naturel reflète statistiquement les limites du Eh et du pH que l'on est amené à rencontrer dans les milieux de sédimentation et de formation des sols.

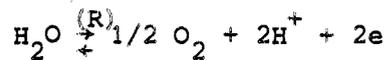
a - Le pH

On peut admettre à l'exemple de Garrels et Christ (1965) que le pH des milieux naturels ne descend pas au-dessous de 4 et ne monte pas au-dessus de 10. (Droites verticales (a) et (b) des diagrammes).

b - le Eh

Garrels et Christ admettent que les réactions dans les milieux naturels de sédimentation se font dans le domaine de stabilité de l'eau.

La limite supérieure du Eh correspondra donc à la limite de stabilité de l'eau devant l'oxygène définie par la réaction :



dont le potentiel d'oxydo - réduction Eh est égal à :

$$\text{Eh} = \text{E}_0 + 2,303 \frac{\text{RT}}{\text{nf}} \log \frac{(\text{Ox})}{(\text{Réd})} \quad (\text{Loi de Nernst})$$

où E_0 = potentiel normal de la réaction

R = constante des gaz parfaits = $1,987 \cdot 10^{-3}$ kcal/degé/Mole

T = Température absolue soit à 25°C, T = 273 + 25 = 298°C

f = constante de Faraday = 2,306 kcal/volt équivalent

n = nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction.

Le potentiel normal de la réaction peut être calculé à partir de l'énergie libre totale de la réaction d'après la loi de Hess :

$$\Delta F = \text{Ehnf} \quad \text{et donc} \quad \Delta F^\circ = \text{E}_0 \text{nf} \quad (\text{f} = \text{constante de Faraday})$$

(n = nombre d'électrons mis en jeu)

L'énergie libre totale de la réaction est calculée à partir des énergies libres de formation des différents corps mis en jeu :

$$\Delta F^\circ (\text{R}) = \frac{1}{2} \Delta F^\circ (\text{C}_2) + 2 \Delta F^\circ (\text{H}^+) - \Delta F^\circ (\text{H}_2\text{O})$$

Les énergies libres de formation des corps chimiques peuvent être trouvées dans des tables.

De cette manière, on obtient $\text{E}_0 = 1,23$ Volt.

$$\text{D'où} \quad \text{Eh} = 1,23 + \frac{0,059}{2} \log \left[\frac{1}{\text{O}_2} \right]^{1/2} \times (\text{H}^+)^2 \quad (1)$$

La pression partielle de l'oxygène étant les 1/5° de la pression atmosphérique normale que l'on prendra égale à 1 atmosphère, on aura $p(\text{O}_2) = 0,2$ atmosphère.

En insérant cette valeur dans l'équation (1) il vient après calcul :

Eh = 1,22 - 0,059 pH. (Droite (c') des diagrammes)

La limite inférieure de Eh correspond à la limite de stabilité de l'eau devant l'hydrogène, régie par l'équation :

$H_2 \rightleftharpoons H^+ + 2e$ dont le potentiel normal $E_0 = 0,0$ (par convention).
 Le potentiel d'oxydo-réduction de cette réaction est :
 $Eh = \frac{0,059}{2} \log (H^+)^2 = -0,059 \text{ pH}$ (droite (d) des diagrammes).

2. Diagramme Eh/pH des hydroxydes de fer
 (D'après Garrels et Christ, 1965)

On distingue plusieurs cas en fonction du pH.

a - Solutions très acides de pH < 3

Dans ce domaine, le comportement du fer qui se trouve à l'état ionique est indépendant du pH et est défini par la réaction d'oxydo-réduction :

$Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+} + e$ dont le potentiel normal E_0 calculé à partir des énergies libres de formation de Fe^{3+} et Fe^{2+} est : $E_0 = + 0,77$ volt.

$Eh = 0,77 + 0,059 \log \frac{(Fe^{3+})}{(Fe^{2+})}$ dont la limite est :

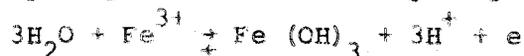
$$(Fe^{3+}) = (Fe^{2+}) \Rightarrow \log \frac{(Fe^{3+})}{(Fe^{2+})} = 0$$

Il vient alors :

$Eh = E_0 = + 0,77$ Volt. (Droite (A) de la figure 11).

b - Cas des solutions faiblement acides (3 < pH < 7)

Le fer trivalent n'est plus stable sous la forme ionique simple et précipite sous forme d'hydroxyde ferrique :



réaction dont le potentiel normal est : $E_0 = 1,06$ Volt.

Le potentiel d'oxydo-réduction est :

$$Eh = 1,06 - 0,177 \text{ pH} - 0,059 \log (Fe^{3+})$$

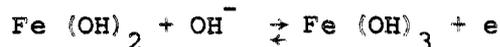
Cette épuration sera celle d'une droite si l'on fixe la valeur de l'activité de l'ion Fe^{3+} .

On obtiendra ainsi respectivement pour $(Fe^{3+}) = 10^{-1} M$ \checkmark
et $(Fe^{3+}) = 10^{-7} M$

$E = 1,06 - 0,177 \text{ pH}$ et $E = 1,47 - 0,177 \text{ pH}$. (Droites (B) et (B')) de la figure 11).

c - Le domaine alcalin (vers pH 7,5 à 8)

Le fer divalent n'est plus stable en solution et l'hydroxyde ferreux passe à l'état ferrique :



dont le potentiel normal est : $E_0 = -0,56 \text{ Volt}$.

Le potentiel d'oxvdo-réduction de la réaction est :

$E_h = 0,266 - 0,059 \text{ pH}$. (Droite (C) de la figure 11).

d - Le fer natif (Fe^0)

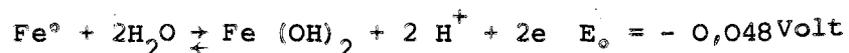


Le potentiel d'oxydo-réduction de cette réaction est :

$E_h = -0,42 + \frac{0,059}{2} \log (Fe^{2+})$ qui sera l'équation d'une droite en fixant (Fe^{2+}) . Si l'on choisit pour activité maximale de l'ion Fe^{2+} en solution, $(Fe^{2+}) = 1 M$, on aura :

$E_h = E_0 = -0,42 \text{ Volt}$. (Droite (D) de la figure 11).

On voit ici encore que pour des solutions acides, le pH n'intervient pas. Mais pour des solutions moins acides, neutres ou alcalines, le comportement du fer devient dépendant du pH (vers pH 5,5 à 6,5).



Le potentiel redox de cette réaction est :

$E_h = -0,048 - 0,059 \text{ pH}$ (Droite (E) de la figure 11)

Au vu du diagramme Eh/pH des hydroxydes de fer, en tenant compte du domaine naturel, on s'aperçoit que dans les sols, on devrait rencontrer le fer surtout sous forme d'hydroxydes ferriques pour des valeurs positives du Eh ou ferreux pour les valeurs négatives.

Les solutions ioniques qui requièrent des pH très bas ont peu de chances d'exister. Cependant lorsqu'elles existent, elles sont surtout ferreuses pour des valeurs de $E_h < +0,77 \text{ volt}$ et ferriques pour des valeurs supérieures.

Ces observations rejoignent celles faites par Hem et Cropper (1959). Ceux-ci remarquaient que l'ion Fe^{2+} était plus stable dans le domaine naturel que l'ion Fe^{3+} qui apparaît néanmoins en solution suffisamment acide et oxygénée mais précipite rapidement sous forme d'hydroxyde insoluble.

Les hydroxydes se forment facilement puisque la réaction $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$ débute à pH 6 et la précipitation serait complète à pH 7,8 et puisque la réaction:

$Fe^{3+} + 3OH^- \rightarrow Fe(OH)_3$ débute à pH 2,3 et la précipitation serait complète à pH 3,4 (Segalen, 1964). Ils sont très stables puisque leurs produits de solubilité varient entre $7, 10 \cdot 10^{-13}$ et $2,5 \cdot 10^{-21}$ (Selon les auteurs) pour $Fe(OH)_2$ et entre 10^{-35} et 10^{-38} pour $Fe(OH)_3$.

solutions contenant des proportions variables de Fe^{2+} et Fe^{3+} verraient la formation de l'hydroxyde ferrosique selon la réaction :

$3Fe(OH)_3 + Fe^{2+} + 20H^- \rightarrow Fe_3(OH)_8$ dont le produit de solubilité est $K_s = 6,4 \cdot 10^{-18}$ (Arden 1950).

3. Diagramme Eh/pH des oxydes, carbonates et sulfures

(d'après Garrels et Christ, 1965)

Ce diagramme rend compte des conditions de stabilité entre les oxydes, sulfures et carbonates de fer à 25°C à une pression totale de 1 atmosphère. La quantité totale de soufre dissous est égale à 10^{-6} M et celle du carbonate à 1 M.

Ce diagramme montre que dans le domaine naturel on trouvera surtout l'hématite qui correspond à une gamme de pH étendue et d'Eh moyennement oxydants à oxydants.

La sidérose se forme en milieu réducteur pour des pH encadrant la neutralité. La pyrite se formera préférentiellement à la sidérose dans les milieux réducteurs à Eh négatifs contenant à la fois du soufre et des carbonates dissouts. Si son domaine de stabilité correspond à une gamme de pH étendue, elle requiert par contre une étroite bande d'Eh. Lorsque celui-ci devient très réducteur, c'est la sidérose qui se formera préférentiellement.

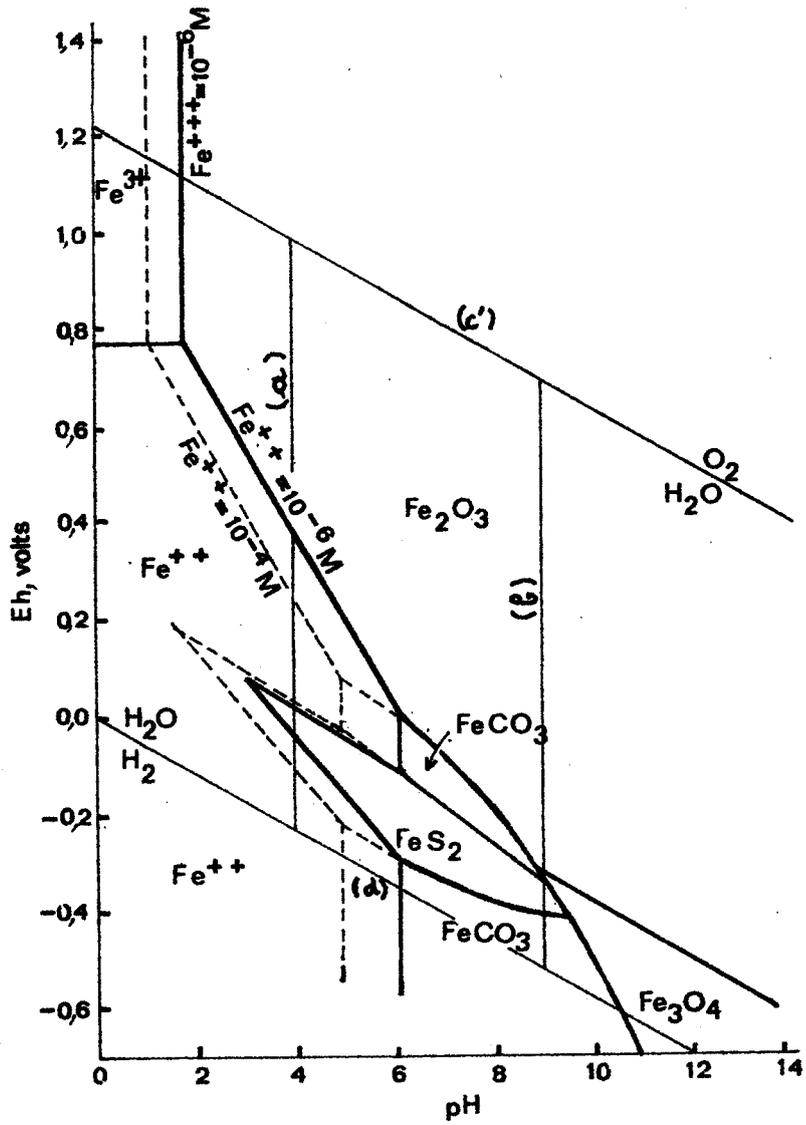


FIGURE 11bis



La magnétite enfin, n'existe pas dans les milieux naturels de sédimentation, puisque sa formation requiert des pH très élevés (pH > 10) et des valeurs très négatives du Eh (Eh < - 0,3 Volt).

Sa présence dans les sédiments ou les sols doit s'expliquer par une origine allochtone.

B) FORMES DU FER DANS LES SOLS

Les sols hydromorphes de Saint-Amand ont des pH compris entre les limites du domaine naturel. On est en droit de penser que leurs potentiels d'oxydo-réduction sont compris entre les valeurs limites du Eh naturel.

On pourrait donc penser à priori, que leurs composés ferrugineux sont ceux qui figurent dans les diagrammes Eh/pH de Garrels et Christ.

En vérité, ce serait faire une approximation assez éloignée de la réalité et ceci pour diverses raisons. Tout d'abord, les diagrammes Eh/pH supposent que les réactions se font à l'équilibre, ce qui se produit rarement dans la nature.

Ensuite les diagrammes tels que nous les présentons sont des modèles simplifiés d'abord parce que l'on a fixé arbitrairement un paramètre (la concentration en carbonate ou en sulfure) sans quoi l'on aurait eu des diagrammes tridimensionnels et ensuite parce que dans la nature, les paramètres qui par ailleurs interviennent simultanément, sont plus nombreux que ceux envisagés par les diagrammes.

En dépit de cette complexité naturelle, il est possible d'envisager une classification des composés ferrugineux telluriques qui permet de refléter le critère pédologique. On y distinguera deux grandes classes, qui seront les composés allochtones d'une part et les composés autochtones d'autre part.

1. Les composés ferrugineux allochtones :

Il s'agit de minéraux contenant du fer et qui sont hérités par le sol à partir de la roche mère qui est à Saint-Amand le sable landénien.

a - Les silicates

La glauconite bien représentée dans les sables landéniens marins est un silicate hydraté de potassium et fer où ce dernier faisant partie intégrante de la structure cristalline, peut exister à la valence II et à la valence III.

Dans certains sols du Nord de la France, on peut trouver des proportions importantes d'argiles de décalcification des craies et en particulier de la montmorillonite qui comporte elle aussi du fer. Il est vraisemblable que dans les sols hydromorphes étudiés, elle n'intervient pas du fait de l'éloignement par rapport à la craie.

b - Les minéraux lourds

Outre les glauconites que nous avons envisagés en tant que silicate, B. Petit (1975) a trouvé dans les sables landéniens, de la magnétite, et de l'hématite. Dans l'ensemble les minéraux lourds dont le principal représentant est la glauconite, représentent une très faible proportion dans les sables.

On peut conclure que la principale source allochtone de fer est la glauconite.

2. Les composés ferrugineux autochtones

a - Les oxydes et hydroxydes

Les oxydes et hydroxydes présents dans le sol peuvent soit dériver de formes liées aux argiles et aux colloïdes humiques, soit résulter d'une cristallisation sur place.

De nombreux auteurs, parmi lesquels Duchaufour (1970), pensent que le fer se liant aux argiles et à l'humus migre en leur compagnie, puis rencontrant des conditions différentes d'Eh et de pH précipite sous forme de gels hydratés amorphes liés cette fois à la silice colloïdale et aux acides fulviques (1).

Cette forme serait toujours, selon Duchaufour (1970), caractéristique des taches rouilles des pseudogleys. Les hydrates amorphes sont "protégés" par la matière organique, mais si en raison par exemple, d'un nouvel apport de fer, la proportion d'hydrate augmente, il s'en suit une cristallisation sous forme d'oxydes.

(1) Voir fer et matière organique.

Segalen (1964) et Carroll (1958) soulignent l'existence d'une limite du pouvoir de fixation des argiles vis à vis des oxydes et hydroxydes. L'excédent serait cristallisé sur place sous forme de concrétions. C'est peut être de cette manière que l'on peut expliquer la présence des nombreuses concrétions ferrugineuses rouilles observées dans les horizons superficiels des profils I et V notamment.

Selon Blumel (1962), les oxydes et hydroxydes formeraient des paillettes (microscopiques) dans les gleys et des concrétions dans les pseudo-gleys.

Les minéraux formés seraient de la goethite ou de la lépidocrocite et le passage de l'une à l'autre serait régi par l'aération et le drainage (Brown, 1954 ; Duchaufour, 1970).

b - Fer et argiles

Les argiles du sol recèlent des quantités importantes de fer, car celui-ci peut avoir avec elles trois types de liaisons différentes : il peut être inclus dans la structure cristalline, ou encore entre les feuillets de certaines argiles, enfin il peut être fixé (adsorbé) à la surface de particules argileuses.

Premier cas : le fer dans la structure cristalline

Les argiles sont constituées de couches alternantes et superposées d'octaèdres et de tétraèdres. Dans les premières, le coeur des octaèdres est en général occupé par des ions Al^{3+} entourés par des oxygène O^{\ominus} ou hydroxyl OH^{\ominus} . Dans les secondes, le coeur des tétraèdres est occupé par des ions Si^{4+} entourés par des oxygène O^{\ominus} formant les sommets des tétraèdres.

Dans les couches tétraédriques les substitutions isomorphiques se limitent généralement au remplacement du Silicium par l'Aluminium.

Dans les couches octaédriques, par contre, l'aluminium peut être remplacé par l'ion Fe^{2+} ou l'ion Fe^{3+} .

Les substitutions isomorphiques tiennent compte du rayon ionique qui doit être voisin entre l'ion substitué et l'ion remplaçant et d'autre part de la neutralité électrique de l'ensemble.

Le fer en tant que constituant du réseau cristallin existe dans les nontronites et les vermiculites en particulier.

Deuxième cas : le fer inclus entre les feuillets des argiles

Ce type d'association fer argile peut exister dans les Montmorillonites. Carroll (1958) et Duchaufour (1970) envisagent ce type de fixation du fer qui serait fréquent dans les pélosols selon Duchaufour.

Troisième cas : le fer adsorbé

Barbier (1938) a observé expérimentalement le processus de fixation de l'hydrate ferrique par l'argile : celui-ci comporte trois étapes successives. Tout d'abord tout l'hydrate ajouté à la suspension d'argile est fixé par cette dernière qui floccule. Ensuite, lorsque toute l'argile a flocculé, elle continue de fixer l'hydrate jusqu'à un certain seuil au-delà duquel tout l'hydrate ajouté passe en solution tandis que l'argile se redisperse.

Barbier interprète ce comportement en invoquant la nature colloïdale de l'argile et de l'hydrate ferrique. L'argile, colloïde électro-négatif attire l'hydrate ferrique qui est un colloïde électro-positif et floccule avec lui. Une fois flocculée, elle est encore capable de fixer une certaine quantité d'hydrate mais en acquiert alors le signe + de sorte qu'en présence d'un excès de ce dernier elle se redisperse par suite de l'antagonisme des colloïdes de même signe.

Les argiles sont douées de propriétés électriques qui leur permettent de fixer des ions. Ceux-ci sont retenus par des forces faibles de type Van der Waals ou électrostatiques plus fortes (Krauskopf, 1967).

Le fer adsorbé l'est généralement sous forme de cations complexes, $Fe(OH)^{++}$, $Fe(OH)_2^+$ ou encore $Fe(OH)^+$, qui lorsqu'ils sont libérés précipitent sous forme des gels hydratés amorphes dont nous avons parlé plus haut.

Ce sont les pellicules d'oxydes ferriques adsorbés qui confèrent à certaines argiles leur teinte rousse (Duchaufour, 1970 ; Carroll, 1958 ; Krauskopf, 1967).

Notons que la silice colloïdale finement divisée peut former avec le fer des associations (Bass Becking et Moore, 1959). Celle-ci peut protéger le fer contre la flocculation par l'argile (Barbier, 1938).

c - fer et matière organique

En 1944, Bézier constatait expérimentalement que certains composés organiques pouvaient modifier considérablement le comportement du fer. Ainsi l'anion oxalate forme avec l'ion Fe^{3+} un complexe très stable puisqu'il faut atteindre un pH de 7,7 pour voir précipiter le fer. Or, on se souvient d'après les diagrammes Eh/pH que l'ion Fe^{3+} n'était stable que dans les solutions de pH < 3. Cette propriété de l'oxalate est utilisée par Tamm (1922) pour extraire le fer libre du sol.

Duchaufour (1963) observe des associations fer matière organique dans lesquelles le fer acquiert le comportement de cette dernière, précipitant en milieu acide et se dispersant en milieu basique à l'inverse de ses propriétés habituelles.

Les matières organiques formeraient avec le fer des complexes mais également des chélates (Ségalen, 1964 ; Dommergues et Manganot, 1970 ; Bass Becking et Moore, 1959) qui sont des formes plus stables où les donneurs d'électrons sont liés entre eux.

Les substances organiques complexantes sont les acides fulviques qui sont des acides à courte chaîne peu polymérisés et solubles susceptibles d'entraîner le fer dans leur migration, les acides humiques gris et les acides humiques bruns enfin.

Selon Duchaufour (1963) les acides humiques gris sont fortement polymérisés et plus riches en fer que les acides humiques bruns. Les uns comme les autres sont insolubles.

Du point de vue chimique les acides fulviques sont solubles dans les acides et les alcalis, les acides humiques par contre sont solubles dans les alcalis mais insolubles dans les acides minéraux et les alcools.

Les substances organiques complexantes peuvent avoir une origine végétale ou bien encore microbienne.

Les substances végétales proviennent de la décomposition aérobie mais surtout anaérobie des débris végétaux retournant au sol. Turc (1958), Lossaint (1959), Bétrémieux (1951) ont étudié en particulier le rôle des litières dans la dynamique du fer. Il semble que leur fermentation a le triple effet de dissocier le fer de l'argile par acidification (voir aussi Carroll, 1958, Bloomfield, 1950) de le réduire à l'état divalent plus soluble et de produire des substances complexantes vis à vis de lui.

Ces substances pourraient en outre avoir pour origine des exudations foliaires et racinaires. Il s'agit d'acides aminés, acides dicarboxyliques, acides phénols, polyphénols enfin. Ces derniers sont d'ailleurs utilisés par les foreurs lors de la traversée de couches salifères pour lutter contre les cations flocculants vis à vis des boues de forage. Il s'agit là de tannins.

Dans la pratique, les tannins sont les représentants les plus fréquents des polyphénols en pédologie.

Les tannins agissent de deux manières différentes sur la dynamique du fer : ils ont un pouvoir de dissolution vis à vis du fer et contribuent à la libération de celui-ci en dispersant les argiles auxquelles il est fixé (Lossaint, 1959 ; Bloomfield, 1957).

Selon Plaisance (1965), les tannins seraient responsables d'un freinage de l'activité biologique et de l'oxydation. Ils sont connus pour avoir un fort pouvoir marmorisant (1).

Les substances d'origine microbienne

Les acides citrique, oxalique, fumarique, formique, lactique, glycolique qui sont produits par la microflore du sol ont un fort pouvoir complexant vis à vis du fer (Dommergues et Mangenot, 1970).

Les sols hydromorphes sont favorables à l'accumulation de ces substances par suite de l'acidification du milieu et à Saint-Amand de la pauvreté en bases.

Le complexe argilo-humique

Dans le complexe argilo-humique, le fer sous la forme $\text{Fe}(\text{OH})_3$ plus ou moins cristallisé ou bien $\text{Fe}(\text{OH})^{++}$ ou encore $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ sert de cation de liaison entre l'argile et l'humus. Il peut exister en outre inclus dans les grosses molécules humiques (forme complexée insoluble) ou bien entre les feuillets des argiles (Duchaufour, 1963, 1970).

Du fait de leurs propriétés colloïdales, les humates peuvent former avec le fer des associations comparables à certaines associations fer-argile (Aarnio cité par Barbier, 1938 ; Mattson 1930).

Segalen (1964) résume les modes de liaison intervenant entre le fer, l'argile et la matière organique de la manière suivante :

- complexation ou même chélation du fer par la matière organique ;
- adsorption des hydroxydes sur les surfaces des argiles ;

(1) Les tannins seraient responsables pour une forte part de l'apparition des marbrures dans les pseudogleys. C'est ce que traduit la notion de pouvoir marmorisant (de l'Anglais Marmor = marbre).

- adsorption des humates sur les surfaces des micelles et réaction avec complexation du fer au niveau des positions d'échange.

Nota : signalons enfin que le fer peut entrer dans des combinaisons insolubles avec les carbonates (Bétrémieux, 1951 ; Duchaufour, 1970 ; Schaeffer, 1967 ; Segalen, 1964) et avec la silice dont nous avons déjà parlé, avec les phosphates enfin (Swenson, Cole et Sieling, 1948)

3. Fer et analyse

Les composés ferrugineux que nous avons envisagés sont évidemment plus ou moins fortement liés et donc plus ou moins faciles à extraire. Les formes les plus facilement extractibles sont en général ferreuses.

On peut résumer les formes dosées par les pédologues de la manière suivante :

Fer total = Fer libre + Fer combiné (Duchaufour et N^oGuyen Kha 1969)

Fer ferreux total = Fer ferreux échangeable + Fer ferreux combiné.

Le Fer total représente la totalité du Fer présent à l'état ferreux et ferrique.

Le Fer libre représente les oxydes des concrétions et les oxydes et hydroxydes adsorbés. Le Fer y est surtout trivalent.

Le Fer combiné correspond à l'ensemble des autres formes présentes dans le sol.

Le Fer ferreux total ; représente le fer à l'état divalent.

Le Fer ferreux échangeable correspond essentiellement au fer divalent inclus entre les feuillets des argiles et au fer ionique de la solution du sol.

Nous avons, pour notre part, analysé le fer total, le fer ferreux total et le fer échangeable.

C) ANALYSES

1. Le Fer total

a - Définition

Le fer total représente la totalité du fer présent dans le sol sous toutes les formes possibles. Il doit être extrait par une attaque puissante car certaines formes (notamment les formes silicatées ou incluses dans les grosses molécules organiques) sont très résistantes.

b - Principe

Duchaufour et N'Guyen Kha (1969) extraient le fer total en même temps que l'aluminium et le silicium par fusion alcaline à 650° et le dosent ensuite sur l'extrait acidifié, par absorption atomique.

Pour notre part, nous avons fait appel à la technique décrite par Guy Aubert.

Les matières organiques sont détruites par calcination. Le résidu obtenu est attaqué à chaud par l'acide chlorhydrique. Le fer est solubilisé sous la forme de chlorure ferrique. Le dosage se fait sur la forme réduite. Pour cela, on procède à une réduction du fer par le chlorure stanneux. L'agent titrant est le bichromate de potassium.

c - Technique

Un échantillon de 5 grs de terre fine séchée à l'air est placé dans une capsule de porcelaine. La capsule est mise au four à moufle à 600° durant 30 minutes. L'auteur préconise une température de 800°.

L'échantillon qui est de couleur rouge après son passage au four subit une attaque par l'acide chlorhydrique durant 30 minutes. Nous avons constaté qu'en respectant la température de 800°, les échantillons étaient encore roses après 30 minutes d'attaque et que du fer pouvait être extrait lors d'une seconde attaque. Avec une température de 600° nous avons pu extraire la totalité du fer des échantillons lors de la première attaque à l'issue de laquelle ils se révélaient parfaitement blancs.

Après son passage au four, l'échantillon était ensuite transvasé dans un matras à long col en présence d'acide chlorhydrique (8 N). La capsule était rincée par cet acide. Le matras était placé sur une rampe de chauffage et son contenu porté à l'ébullition durant 30 minutes. Un petit entonnoir était placé à l'extrémité du col du matras afin de limiter l'évaporation.

L'emploi du matras et d'une rampe de chauffage adaptée à ce type de récipient permettait un chauffage homogène et limitait efficacement l'évaporation.

Après 30 minutes d'extraction, la quasi totalité du fer est passée en solution. Pour quelques échantillons seulement, une seconde extraction a fait passer des quantités dosables de fer, en solution (mais très faibles).

Le contenu du matras est filtré. Le matras et le filtre sont soigneusement rincés par de l'eau distillée. Le filtrat est recueilli dans un bécher qui est placé sur une plaque chauffante afin de réduire le volume par évaporation jusque 20 cc environ.

Sur le liquide encore chaud on verse une solution de chlorure stanneux à 5 % jusqu'à décoloration complète. Le fer passe ainsi sous la forme Fe^{2+} . (Au lieu de chlorure stanneux, on aurait pu utiliser du zinc métallique). Lorsque le mélange est parfaitement incolore on ajoute quelques gouttes de SnCl_2 afin d'être sûr qu'il ne reste pas trace de Fe^{3+} .

L'excès de chlorure stanneux est éliminé par oxydation à l'aide du chlorure mercurique à 5 % (10 cc).

Les ions Sn^{2+} pourraient entraîner des erreurs réagissant eux-mêmes en consommant du bichromate. Les ions Hg^+ ne sont pas gênants car le chlorure mercurique est précipité.

Il se forme généralement un précipité dense de couleur blanchâtre de (Hg_2Cl_2). Vient ensuite le dosage par une solution N/10 de bichromate de potassium qui sera ajoutée à la burette dans le mélange.

La fin de la réaction est indiquée par le virage d'un indicateur qui est ici la diphénylamine sulfonate de Baryum (4cc) (on peut trouver toutes les indications concernant le choix de l'indicateur dans les ouvrages d'analyse minérale qualitative).

On ajoute en outre au mélange avant titrage, de l'acide orthophosphorique à 85 % (10 cc) afin, selon Hardelin, de complexer le fer ferrique formé au cours du titrage.

Enfin, le bichromate est ajouté à la burette, la fin de la réaction étant marquée par le virage de la solution du vert au violet.

La solution de bichromate doit quant à elle être titrée dans les mêmes conditions au moyen d'une solution connue de sel de Mohr - $(\text{FeSO}_4, (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4, 6 (\text{H}_2\text{O}))$.

- Calculs

20,5 cc de solution de dichromate oxydaient 0,8 g de sel de Mohr. La masse atomique du fer étant de 55,85 et le poids moléculaire du sel de Mohr de 392,14, on en tire que 0,8 g de sel de Mohr contiennent :

$$\frac{55,85 \times 0,8}{392,14} = 0,11394 \text{ g de fer}$$

Pour oxyder 0,11394 g de fer il a fallu 20,5 cc de $\text{K}_2\text{CR}_2\text{O}_7$, par conséquent 1cc de $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_7$ correspondra à : $\frac{0,11394}{20,5} = 0,005558$ g de fer.

Sachant qu'il a fallu x cc de $\text{K}_2\text{CR}_2\text{O}_7$ pour oxyder le fer de l'échantillon, cela voudra dire qu'il contenait : $(x \times 0,005558)$ g de fer.

Si 5 grs de sol contiennent $(x \times 0,005558)$ g de fer, 100 g contiendront : $(x \times 0,005558) \times 20$ g de fer.

e - Calcul d'erreur

Pesée de l'échantillon : 0,01 g = erreur absolue

$$\text{erreur relative} = \frac{0,01}{5} = \frac{0,2}{100}$$

Dosage : 0,1 cc = erreur absolue (2 fois 0,05 cc) la burette donnant le 1/10e de mL.

$$\text{erreur relative} : \frac{0,1}{Ncc}$$

Etalon :

- Pesée : 0,0005 g = erreur absolue

$$\text{erreur relative} = \frac{0,0005}{0,8} \approx \frac{0,005}{10} = \frac{0,05}{100}$$

- dosage : 0,1cc = erreur absolue

$$\text{erreur relative} : \frac{0,1}{20,5} \approx \frac{0,1}{20} = \frac{0,5}{100}$$

$$\text{Erreur relative totale} = \frac{0,2}{100} + \frac{0,1}{N} + \frac{0,05}{100} + \frac{0,5}{100} = \frac{0,705}{100} + \frac{0,1}{N} + \frac{0,1}{100}$$

$$\text{Erreur absolue totale} : \left(\frac{0,7}{100} + \frac{0,1}{N} \right) \times N = \frac{0,7}{100} N + 0,1$$

En outre peuvent se glisser des erreurs non chiffrables dues au transvasage des solutions d'un récipient à un autre. On ne tient pas compte de l'approximation donnée par les fabricants du poids moléculaire des réactifs.

Les valeurs les plus basses : 0,44 % pour l'échantillon N° 10 sont à la limite inférieure de dosage par cette méthode.

f - Résultats :

Les résultats réunis dans le tableau 10 seront commentés en même temps que ceux du fer ferreux total et ceux du fer échangeable.

TABLEAU 10

(Profil :	Profondeur	N° Echant.	X cc de K ₂ CR ₂ O ₇	Fer total %)
(en cm			
(I	10 à 15 cm	2	11	1,22)
(I	23 cm	3	7,3	0,81)
(I	40 à 5	4	5	0,56)
(I	49 à 53	5	8,1	0,90)
(II	6,5	6	6,9	0,77)
(II	10	7	4	0,44)
(II	27 à 30	8	5,5	0,61)
(II	47	9	14,05	1,61)
(III	2 à 10	14	13,1	1,46)
(III	10 à 20	15	11,55	1,28)
(III	50	16	13,8	1,53)
(III	95	10	16	1,78)

TABLEAU 10 (suite)

(Profil :	Profondeur	N° Echant.	X cc de $K_2CR_2O_7$	Fer total
(en cm)
()
(IV	2 à 10 cm	11	15,35	1,71
(IV	20	12	18,10	2,01
(IV	35	13	28,30	3,14
()

2. Le Fer ferreux total

a - Définition

La définition du fer ferreux total par les pédologues est relativement floue. Celle que nous en avons donné plus haut caractérise des formes ferreuses relativement sensibles aux variations du Eh et du pH dans le milieu. Elle s'apparente au fer "déplaçable" de Callame et Dupuis (1972). Ces auteurs parlent de formes du fer susceptibles d'entrer facilement en réaction lorsqu'elles passent de conditions oxydantes à des conditions réductrices et vice-versa. Dans cette catégorie, ils font entrer le fer ferreux des monosulfures, le fer ferreux des carbonates et des silicates de formation récente. Le fer des pyrites et sidérites en serait exclus.

Notre définition diffère cependant de la leur car ils y incluent aussi le fer ferrique, cette fois, des hydroxydes. Elle se rapproche par contre, plus étroitement, de ce que Duchaufour et N'Guyen Kha (1969) qualifient de fer ferreux libre peu soluble mais susceptible de prendre une forme mobilisable en milieu plus acide et riche en matière organique complexante.

b - Technique

L'analyse du fer ferreux total et celle du fer échangeable ont été couplées avec les analyses microbiologiques car comme les bactéries, le fer ferreux doit subir l'influence des saisons. En effet, en ce qui concerne notamment le pseudogley et le pélosol, durant la saison sèche, les phénomènes d'oxydation prennent le pas sur les phénomènes de réduction.

c - Première technique

A l'époque où nous avons réalisé les analyses bactériologiques, nous disposions d'une documentation réduite concernant les analyses du fer. Nous n'avions à notre portée que la technique de Callame et Dupuis (1972) qui, s'ils donnent toutes les indications concernant la réalisation pratique de leur méthode, ne fournissent cependant aucune explication concernant le choix des réactifs, et nous disposions aussi de la technique de Duchaufour et N'Guyen Kha (1969) que l'on trouve également dans le précis de pédologie de Duchaufour (1970). C'est donc cette méthode qui fut mise en oeuvre dans un premier temps.

Principe :

Le fer ferreux total est extrait à chaud par l'acide chlorhydrique dilué à 1/2. Pour éviter les risques d'oxydation, dus à la matière organique, certains auteurs préconisent l'emploi d'un gaz inerte, (CO_2 ou N_2) sous la forme d'un courant gazeux au-dessus de l'expérience. Duchaufour et N'Guyen Kha (1969) ont obtenu des résultats valables en se contentant de réduire la température à 80° , les vapeurs d'eau à la surface du milieu réactionnel suffisant à l'isoler de l'oxygène de l'air, et l'abaissement de la température réduisant l'oxydation due à la matière organique.

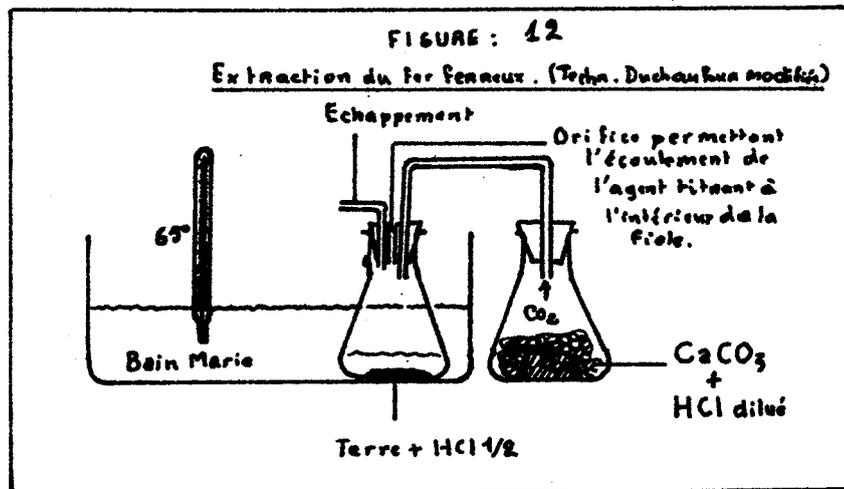
Le fer ainsi extrait est ensuite dosé colorimétriquement par le chlorhydrate d'orthophénanthroline.

Pour notre part, désirant nous placer dans les meilleures conditions possibles, nous avons réduit la température comme le préconisent les auteurs et avons en outre fait passer un courant de CO_2 sur le milieu réactionnel durant tout le temps d'extraction (2 heures).

La figure n° 12 schématise le mode opératoire.

Au lieu d'un dosage colorimétrique, nous envisageons de fait un dosage volumétrique du fer par le bichromate de potassium.

De fait, nous avons dû abandonner la méthode, car les bains Marie usuels ne permettent pas en général, d'obtenir des températures au-delà de 65 à 70° . D'autre part, malgré les précautions prises, le fer ferreux parvenait à s'oxyder. Il est vraisemblable que l'acide chlorhydrique est en grande partie responsable de cette oxydation, car



le chlore qui immanquablement se volatilise au-dessus du milieu réactionnel est un oxydant puissant. La température de 65° quant à elle est un point positif vis à vis des risques d'oxydation, mais négatif en ce qui concerne le pouvoir extracteur.

d - Deuxième technique

Nous avons, par la suite, fait appel à une technique potentiométrique adaptée par Duterage (1974) qui l'utilise couramment pour le dosage de Fe^{2+} dans les glauconites.

Les résultats que lui a donné cette technique sont reproductibles et en concordance avec ceux d'autres auteurs et obtenus par des voies différentes.

Principe de la méthode

L'extraction est faite à chaud, à température modérée sur une prise d'essai de 0,100 gramme de terre fine préalablement séchée quelques heures à 50° à l'étuve. (Ce séchage à température modérée à l'étuve est conseillé par divers auteurs, afin d'éviter une oxydation au contact de l'air). L'échantillon est attaqué à température moyenne (50°) par un mélange d'acides sulfo-fluorhydrique. On maintient l'attaque durant une heure environ. Le dosage se fait ensuite par potentiométrie en utilisant le permanganate de potassium comme oxydant. On aura auparavant réalisé l'étalonnage du potentiomètre en titrant une solution contenant une quantité connue de fer. Cette opération est nécessaire chaque fois que l'on change de solution de permanganate, car les solutions de ce réactif s'altèrent très facilement (et ne peuvent d'ailleurs être conservées plus d'une journée pour une série de dosages).

Réalisation pratique

Une prise d'essai de 0,1 g de terre fine est placée dans une coupelle en téflon dans laquelle on ajoute 20cc d'acide sulfurique 3,6 N et 5cc d'acide fluorhydrique environ 6 N. En fin d'attaque on ajoute 4 g d'acide borique qui servira à protéger l'électrode de verre du potentiomètre contre une attaque éventuelle par l'acide fluorhydrique.

Le dosage est effectué par potentiométrie directement sur le milieu d'attaque. Nous avons utilisé pour cela l'appareillage du laboratoire de Géochimie sédimentaire. Il s'agit d'un pH mètre/potentiomètre à électrode de verre/calomel, auquel est couplée une électrode de platine.

L'oxydant utilisé est le permanganate de potassium. On réalise au préalable une courbe étalon au moyen d'une solution de sulfate ferreux connue. Soit à déterminer la quantité de permanganate nécessaire pour oxyder une solution de fer ferreux à 10 %.

Ensuite est réalisé le dosage de la solution inconnue.

Calculs:

La courbe obtenue permet de déterminer la quantité de permanganate nécessaire pour oxyder le fer II de l'échantillon.

Si ncc de KMnO_4 oxydent 10 % de fer, N'cc de KMnO_4 oxyderont :

$$\frac{N' \times 10}{n} = x \% \text{ de fer dans l'échantillon}$$

Principe du dosage potentiométrique :

Nous avons au départ dans le milieu réactionnel du fer ferreux en équilibre avec du fer ferrique (dans la solution).

Lorsque l'on ajoute le permanganate, le fer II s'oxyde en fer III, le potentiel d'oxydo-réduction s'accroît. Lorsque tout le fer II est oxydé en fer III, le permanganate reprend une coloration rose dans la solution et l'on atteint l'équilibre du couple $\text{Mn}^{++}/\text{Mn}^{4+}$. C'est ce qui permet d'expliquer l'allure asymptotique des courbes de potentiométrie.

(Figures 13, 14, 15).

Le pH intervenant dans le dosage, aucune conclusion ne peut être tirée de la valeur du potentiel de départ de l'expérience quant au rapport $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ dans le sol.

Calcul d'erreur :

erreur absolue sur la pesée de l'étalon : 0,0002 g

$$\text{erreur relative} : \frac{0,0002}{0,0516} = \frac{2}{516} = \frac{4}{1000}$$

0,0516 g de sulfate ferreux correspondent à 10 % de fer II.

erreur absolue sur le titrage de l'étalon : 0,2cc (2 X 0,1cc)

$$\text{erreur relative} : \frac{0,2}{100} = \frac{2}{1000} \quad (\text{on détermine une quantité de } \text{KMnO}_4 \text{ telle que } 100 \text{ cc oxydent } 10 \% \text{ de fer II})$$

erreur relative totale sur l'échelon : $\frac{2 + 4}{1000} = \frac{6}{1000}$

erreur absolue sur la pesée de l'échantillon : 0,0002 g

erreur relative : $\frac{0,0002}{0,1} = \frac{2}{1000}$

erreur absolue sur le dosage de l'échantillon : 0,2 cc

100cc de KMnO4 correspondent à 10 % de fer II

0,2cc correspondent à : 0,02 % de fer II

d'où erreur relative : $\frac{0,02}{x}$ où x est la quantité de fer en % de l'échantillon.

erreur relative totale = $\frac{6}{1000} + \frac{2}{1000} + \frac{0,02}{x}$

erreur absolue : $\left(\frac{6 + 2}{1000} + \frac{0,02}{x} \right) x = \frac{8x}{1000} + 0,02 \frac{10x}{1000} + 0,02$

= $\frac{x}{100} + 0,02$

Pour un échantillon contenant 0,1 % de fer II l'erreur absolue sera : $\frac{0,1}{100} + 0,02 = 0,001 + 0,02 = 0,021$ soit 1/5 de la teneur de l'échantillon ce qui fait une erreur de 20 %.

Cette teneur de 0,1 % correspond à la limite inférieure extrême de dosage.

Les valeurs obtenues pour les échantillons 5, 8, 10, 14, 15 et 16 sont donc fortement sujettes à caution. (Tab. 11). Ainsi, pour l'échantillon n° 5, l'erreur absolue est de : $\frac{0,026}{100} + 0,02 = 0,00026 + 0,02 \neq 0,020$, c'est-à-dire presque 80 %.

Il serait plus exact de noter pour les échantillons 5, 8, 10, 15, 14, 16 : < 0,1 %.

Les figures 13, 14 et 15 donnent respectivement pour exemple la courbe étalon du profil II, la courbe de dosage de l'échantillon 9 et la courbe de dosage de l'échantillon n°6 dont l'allure particulière sera commentée ultérieurement en même temps que les résultats présentés dans le tableau 11.

FIG: 43 PROFIL N°II Echantillon n°2

Courbe de dosage potentiométrique
du fer ferreux total.

$$A = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{0,70 + 1,505}{2} = 1,102 \text{ cc de UMN } 0_4$$

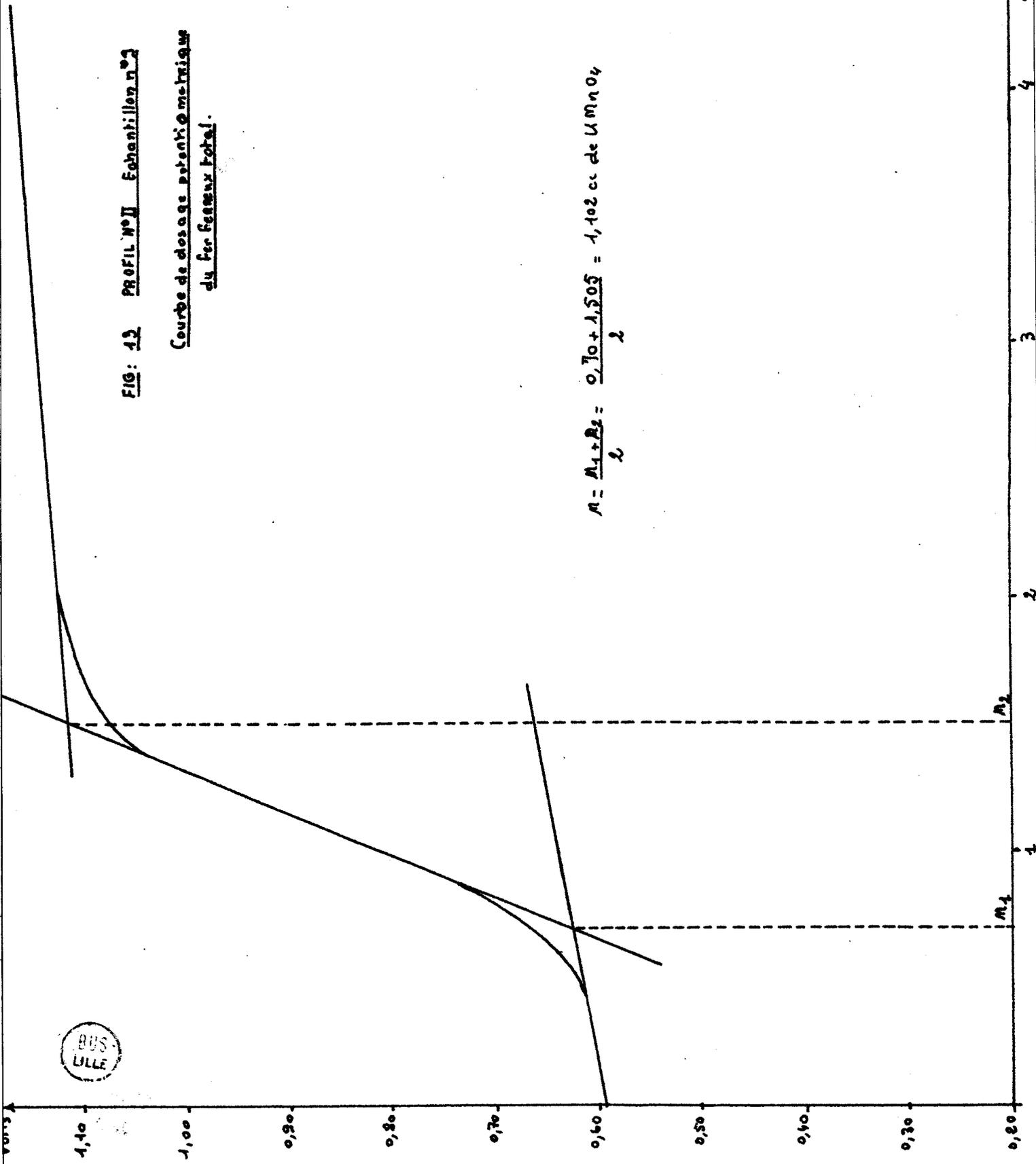
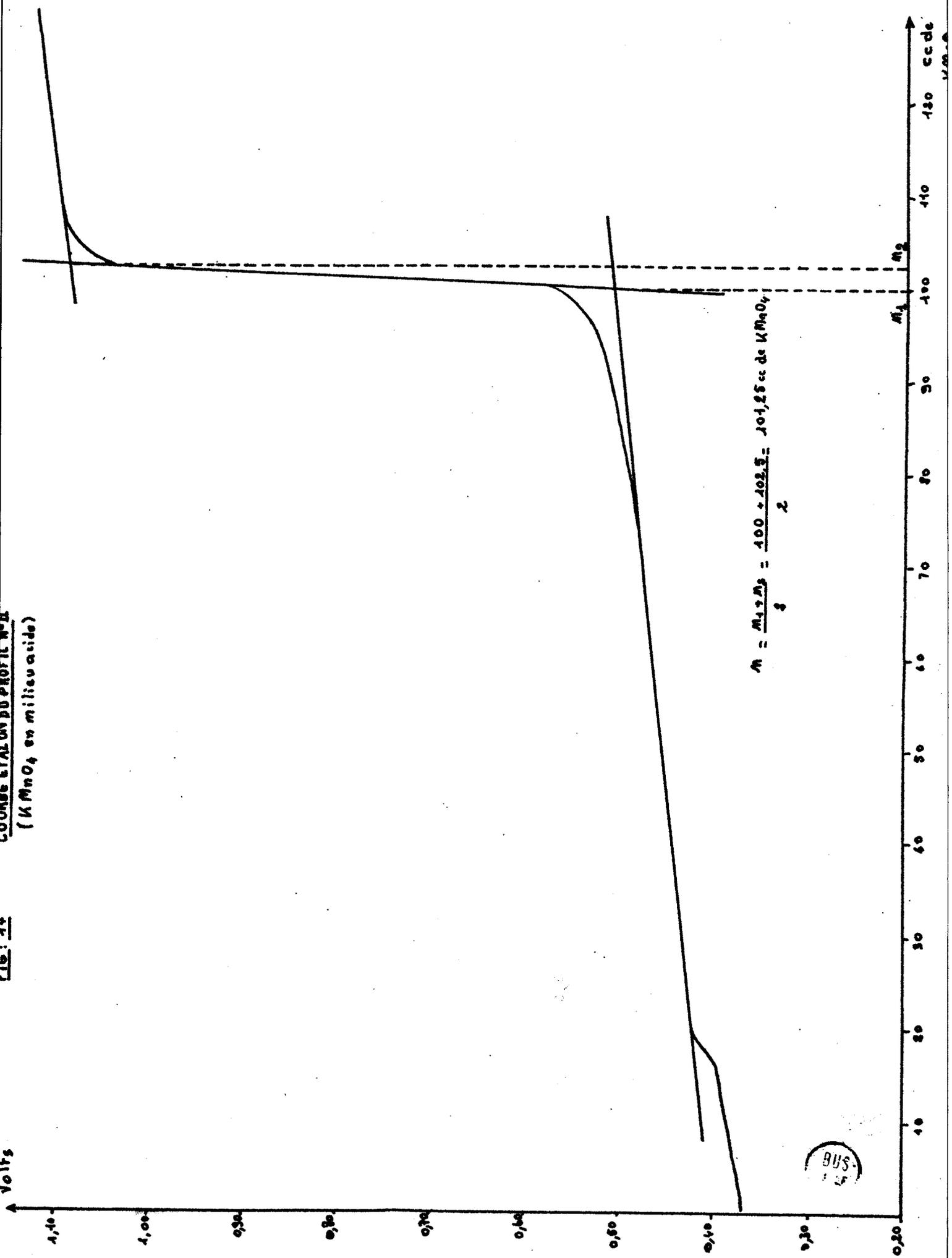


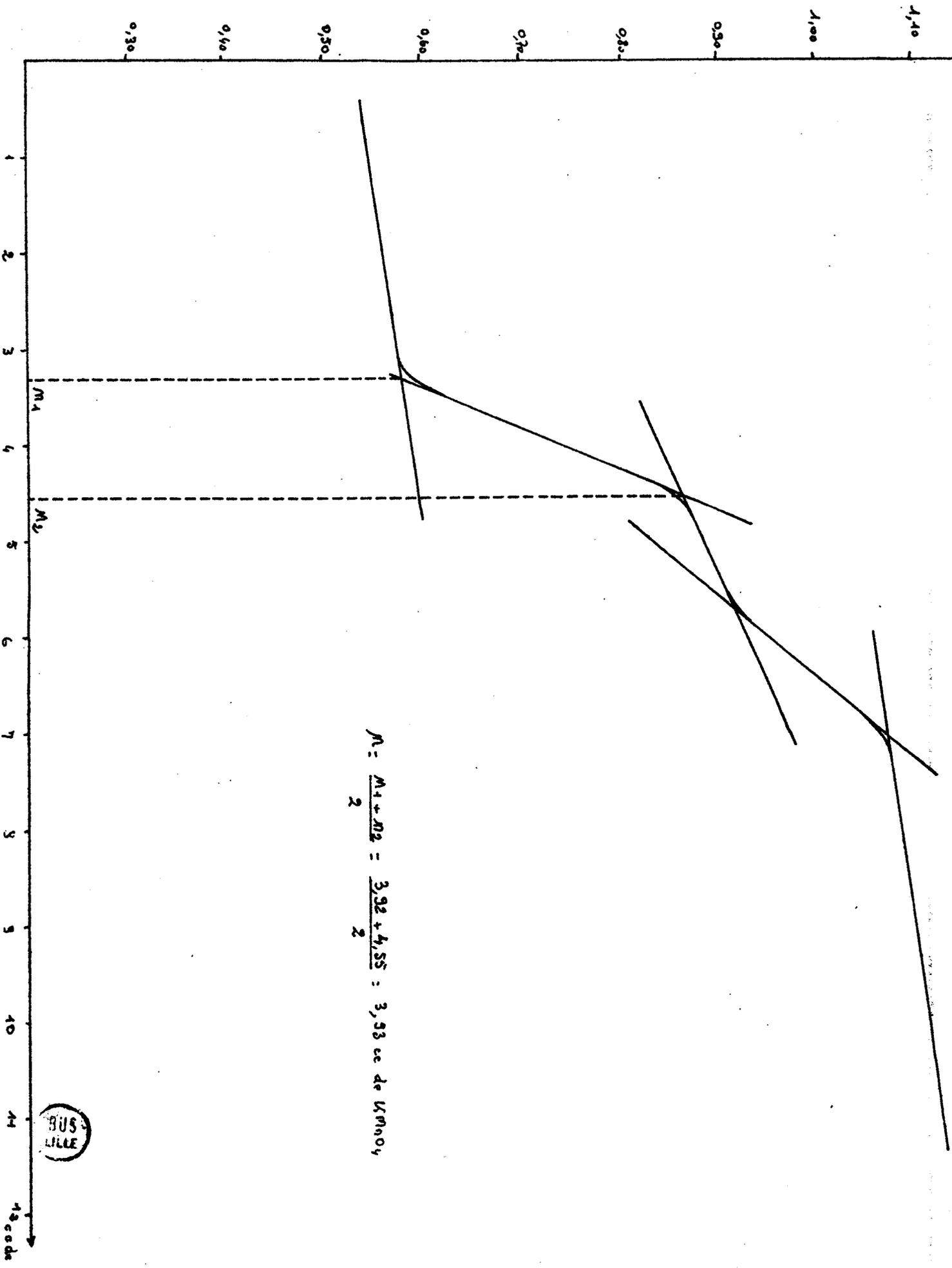
Fig. 24

(KMnO₄ en milieu acide)



$$M = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{100 + 102.5}{2} = 101,25 \text{ cc de KMnO}_4$$





BUS LILLE

1/cds
1/M

TABLEAU 11

RESULTATS DES DOSAGES POTENTIOMETRIQUES

PROFIL N° I		PROFIL N° II		PROFIL N° III	
Etalon 115cc de $KMnO_4$		Etalon 101,25cc de $KMnO_4$		Etalon 113,125cc de $KMnO_4$	
N° Echant.	Fe II %	N° Echant.	Fe II %	N° Echant.	Fe II %
2	0,10	6	0,39	10	< 0,1
3	0,0	7	0,10	14	< 0,1
4	< 0,1	8	< 0,1	15	< 0,1
5	< 0,1	9	0,11	16	< 0,1
Echantillon n° 5 avec l'étalon 113,125 : Fe II < 0,1 %					

3. Le fer échangeable Fe^{2+}

a - Définition

Cette forme est différente de celle que dosent Dupuis et Callame (1972). Il s'agit d'une forme soluble en liaison avec le complexe absorbant du sol et que l'on peut extraire comme nous l'avons fait par déplacement au moyen d'un tampon acétate d'ammonium.

La technique utilisée est celle que préconisent Duchaufour et N'Guyen Kha (1969).

b - Principe de la méthode

Une prise d'essai de 16 g de sol fin préalablement séché en évitant les contacts avec l'air (pour cela on sèche dans une étuve close à température moyenne : 50°) est placé dans un flacon à agitation avec un tampon acétate d'ammonium à pH 5. (300 cc). On agite durant une heure au moyen d'un agitateur mécanique.

c - Technique

La prise d'essai tamisée à 0,2 mm est placée dans le flacon à agitation avec 300cc de tampon acétate d'ammonium à pH 5 et agité durant 1 heure. - 60cc de solution extractrice sont prélevés et centrifugés. Cela correspond à $\frac{16}{5} = 3,2$ g de terre. On dose colorimétriquement avec le chlorhydrate de phénanthroline 1-10.

Réalisation de la solution tampon :

Cela revient à la neutralisation d'un acide faible CH_3COOH par une base forte NH_4OH . Dans ces conditions, le pH de la solution est égal à :

$$\text{pH} = \text{pK} + \log. \frac{(\text{sel})}{(\text{acide})}$$

Lorsque l'on a versé 0,7 litre de NH_4OH (N) dans un litre d'acide acétique (N) le pH est de : $\text{pH} = 4,7 + \log. \frac{0,7}{0,3} = 5,1$ (Mouvier et Martin, 1969).

Nous avons donc réalisé le tampon à partir de 1000cc de CH_3COOH normal pour 700cc d'ammoniaque (N).

Notons que Duchaufour et N^oGuyen Kha (1969) ont préféré l'extraction par agitation, à la méthode classique de percolation utilisée pour l'étude du complexe absorbant, et que l'on retrouve dans le manuel technique d'analyse de Guy Aubert. Cette méthode très longue risque de donner des valeurs faibles à cause des risques d'oxydation encourus par le fer II au cours de l'extraction.

La méthode par agitation nous a fourni des résultats satisfaisants.

Dosage :

La volumétrie, technique précise que nous avons utilisée pour le dosage du fer total, convient moins bien ici car une volumétrie précise est relativement longue et le fer risque de s'oxyder en partie au contact de l'air, si l'on ne prend pas de précautions particulières.

La gravimétrie est peu employée pour le fer ferreux, elle est surtout employée par les chimistes pour le dosage du fer ferrique (Kolthoff, 1959).

La potentiométrie n'a pu être employée car nous ne disposions pas, à l'Institut agricole d'appareil pour sa mise en oeuvre.

Il nous restait la colorimétrie :

Il existe de nombreuses substances susceptibles de former avec le fer II des complexes colorés stables, et l'on peut citer l'acide thioglycolique qui donne une coloration rouge en milieu alcalin (Segalen, 1964) la 2-2^e dipyridil, l'orthophénanthroline, la bathophénanthroline, la phenyl - 2 - pyridil kétoxine (Walker et Sherman, 1961).

Pour notre part, nous avons utilisé la 1-10 phénanthroline chlorhydrate, qui donne avec l'ion Fe^{2+} un complexe rouge orangé très stable.

C'est ce même réactif qui est utilisé par Duchaufour et N^oGuyen Kha (1969) et Duchaufour (1970).

L'orthophénanthroline ou le chlorhydrate d'orthophénanthroline donnent avec le fer II un complexe stable dont les propriétés sont indiquées dans les ouvrages de chimie analytique de Charlot.

Cette méthode a été utilisée et mise au point par Saywell et Cuninghame (1937) qui ont constaté l'absence de modification de la coloration sur des périodes de plusieurs mois. La sensibilité de la méthode s'étend de 0,1 à 6 ppm.

Elle a été reprise par Fortune et Mellon qui ont surtout étudié l'influence d'autres éléments pouvant interférer avec le dosage du fer II.

Le maximum d'absorption se situe aux alentours de 500 nanomètres (Duchaufour 1970, Fortune et Mellon, 1938).

Entre pH 2,0 et 9,0, la coloration est indépendante du pH.

d - Réalisation pratique du dosage

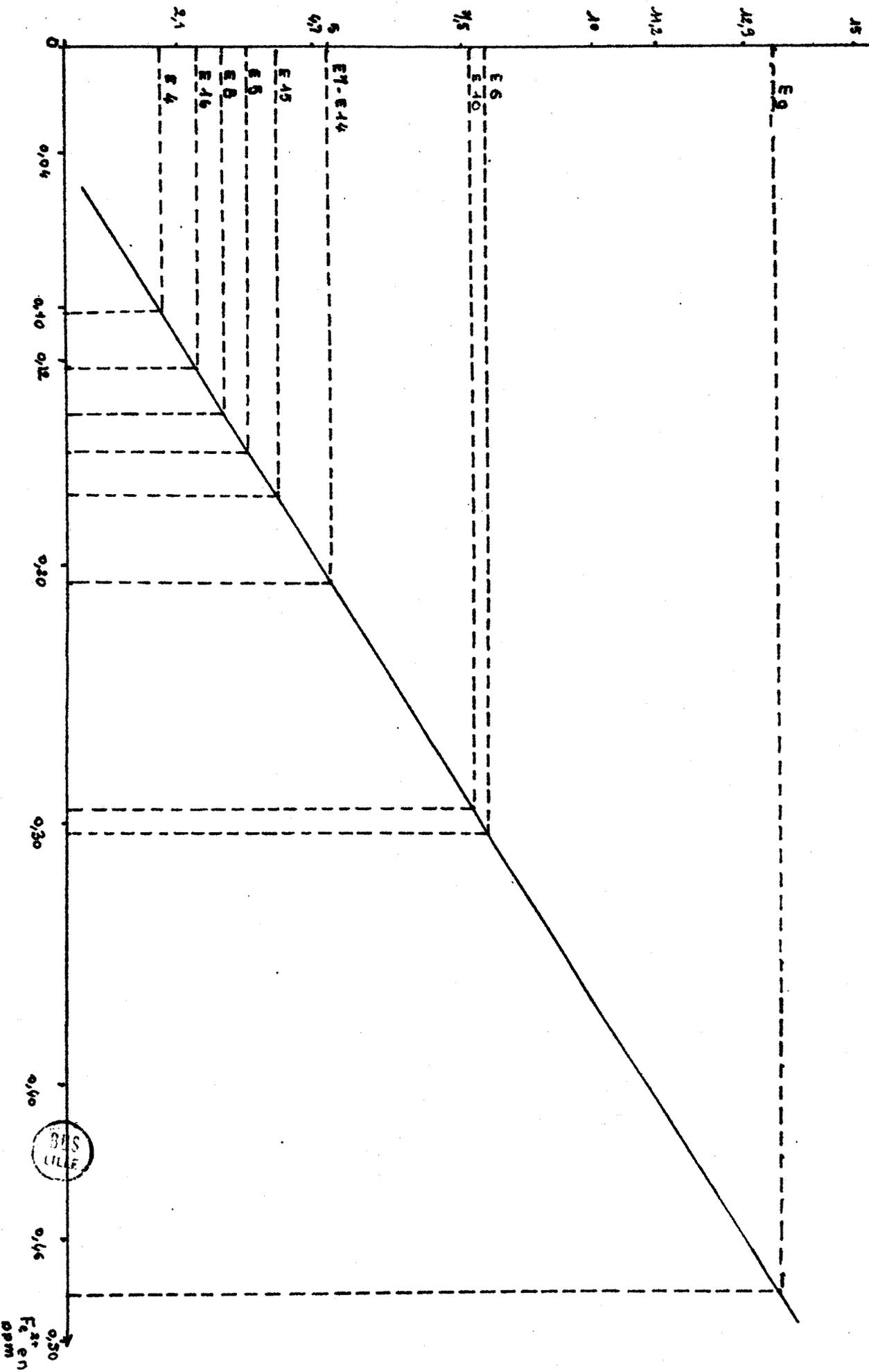
Les complexes formés avec le fer II ont une intensité de coloration qui, dans la gamme de sensibilité de 0,1 à 6 ppm est proportionnelle à la concentration.

Le dosage ne peut se faire directement et l'on doit tout d'abord faire une courbe d'étalonnage. (Tab 12 et 13, figure 16).

Pour cela, on réalise tout d'abord une solution mère à 1.000 ppm de fer II à l'aide de sulfate de fer ammoniacal ; (sel de Mohr) 7,021 g de sel de Mohr pour 1.000 cc H_2O .

FIG. 16

DOSAGE COLORIMÉTRIQUE du Fe^{2+} ECHANGEABLE
COURBE ETALON



Cette solution est diluée au 1/10e pour obtenir une solution intermédiaire à 100ppm, à partir de laquelle seront réalisés les étalons FeII.

On réalise un témoin blanc sans fer.

On prend 10 ml de chaque solution à doser et on les met dans des fioles jaugées de 50cc, on ajoute 20cc d'eau distillée bouillie, on refroidit à l'abri de l'air et on amène ensuite le pH à 3,5. Pour ce faire, on réalise au préalable un essai à blanc en ajoutant quelques gouttes d'acide, on contrôle le pH avec du bleu de bromothymol ou à défaut un papier indicateur de pH. On détermine ainsi la quantité d'acide nécessaire.

On ajoute alors 1cc de réactif complexant, phénanthroline à 1,5 % en solution aqueuse chaude. On complète à 50cc par de l'eau distillée.

On colorimètre à 490 nanomètres.

Il faut, bien entendu, tenir compte dans la réalisation des étalons, de la dilution apportée par les conditions d'expérience.

Pour les solutions inconnues, on procède de la même manière.

L'intensité de la coloration nous a amenés à réduire la dilution pour certains échantillons ou à l'augmenter au contraire (échantillon n° 9). La dilution imposée au départ permet d'éviter les dangers d'interférences avec d'autres ions. (Duchaufour 1970).

TABLEAU 12

COURBE ETALON	
Fer II en ppm	D.O.
0	0
0,04	0
0,12	2,1
0,20	1,7
0,30	7,5
0,40	11,2
0,46	12,9

TABLEAU 13

MESURES SUR ECHANTILLONS			
Echantillon	D.O.	Echantillon	D.O.
2	traces	9	13,5
3	traces	10	7,7
4	1,8	14	5
5	3,5	15	4
6	8	16	2,5
7	5	11	traces
8	3	12	traces
		13	traces

Les résultats sont présentés dans le tableau 14.

e - Discussion de la méthode

Ses avantages sont sa simplicité et sa rapidité.

Les inconvénients principaux en sont les manipulations fastidieuses de réalisation des courbes d'étalonnage.

4. Discussion générale des résultats (voir tableau récapitulatif)

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS
CONCERNANT LE FER

Profil	N° Echant.	Profondeur en cm	Fer total %	Fer II total %	Fe ²⁺ déplaçable ppm.
I	2	10 à 15	1,22	0,10	traces
I	3	23	0,81	0,00	"
I	4	40 à 45	0,56	< 0,1	0,20
I	5	49 à 53	0,90	< 0,1	0,31
II	6	6,5	0,77	0,39	0,61
II	7	10	0,44	0,10	0,41
II	8	27 à 30	0,61	< 0,1	0,71
II	9	47	1,61	0,11	4,82
III	14	2 à 10	1,46	< 0,1	0,41
III	15	10 à 20	1,28	< 0,1	0,35
III	16	50	1,53	< 0,1	0,25
III	10	95	1,78	< 0,1	0,59
IV	11	2 à 10	1,71	—	traces
IV	12	20	2,01	—	traces
IV	13	35	3,14	—	traces

A titre indicatif, on trouvera ci-dessous quelques résultats concernant le profil n° V. Ces résultats ont été obtenus par une calcination à 800°C.

N° Echantillon	Profondeur	Fer total %
V ₁	5 à 12 cm	0,23
V ₂	12 à 26 cm	0,32
V ₃	plus de 26 cm	0,54

Tableau 44.
Resultats du dosage du Fer 2+

Profil	Echantillon	Dilution	D.O.	Fe II d'apres courbe	Fe II corrige selon dilution (ppm)
I	2	—	—	—	traces
I	3	—	—	—	traces
I	4	1/2	1,8	0,102	0,20
I	5	1/2	3,5	0,156	0,31
II	6	1/2	8,0	0,304	0,61
II	7	1/2	5,0	0,207	0,41
II	8	1/5	3,0	0,142	0,71
II	9	1/10	13,5	0,482	4,82
III	10	1/2	7,7	0,294	0,59
III	14	1/2	5,0	0,207	0,41
III	15	1/2	4,0	0,173	0,35
III	16	1/2	2,5	0,124	0,25
IV	11	—	—	—	traces
IV	12	—	—	—	traces
IV	13	—	—	—	traces



a - Le fer total

Les résultats reflètent pour le profil I, l'existence des deux sols superposés que nous avons décrits précédemment.

Si l'on rapproche les teneurs des échantillons 3, 4, 5 (paléosol) de celles des profils II et III, on constate d'une part une valeur plus élevée dans les horizons superficiels (échantillons 3, 6, 14) et d'autre part un lessivage du fer vers la base des profils.

Pourquoi cette teneur plus forte dans les parties superficielles ? Nous pensons que dans ces horizons, il existe des colloïdes humiques susceptibles de retenir le fer. Les colloïdes argileux sont faiblement représentés dans les profils I, II et III et n'interviennent pas dans la rétention.

Pourquoi le profil IV ne suit-il pas cette loi ? Nous pensons qu'il faut invoquer ici une nature différente de l'humus. Celui-ci s'apparente à un hydromoder ou à un an moor. Dans ce type d'humus, la matière organique se trouve principalement sous forme inerte non décomposée ou bien sous forme soluble. Elle ne peut donc pas retenir le fer.

Mais dans ce sol, il y a d'avantage d'argiles alors pourquoi celles-ci ne retiennent-elles pas le fer ? Eh bien comme le montrent les résultats de l'analyse texturale ce sol s'enrichit comme les autres en argiles à sa base. On peut donc supposer que les argiles migrent avec le fer.

La différence entre l'échantillon 3 et l'échantillon 4 peut avoir en plus de la cause que nous venons d'énoncer, la déferrisation (Plaisance, 1965) que nous avons déjà évoquée.

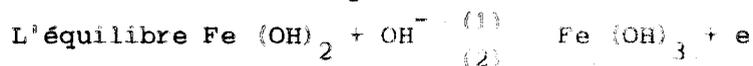
On remarque que le profil III de référence est plus riche que les profils I et II, mais moins riche que le profil IV. Nous pensons que ces différences sont imputables à des degrés variables d'altération des roches-mères.

b - Le fer ferreux total

D'une manière générale, on constate la pauvreté des sols étudiés en cette forme. Les résultats du profil IV étaient tous inférieurs à 0,1 % mais du fait d'un mauvais état de fraîcheur des échantillons ils n'ont pas été retenus.

Pourquoi y-a-t-il si peu de fer ferreux total ? Rappelons nous quelles peuvent être ses origines dans le sol ; elles sont les silicates primaires et secondaires, les oxydes primaires altérés, le fer ferreux interfoliaire des argiles, le fer ionique, l'hydroxyde ferreux enfin.

Les silicates et oxydes primaires sont rares et par suite, les silicates de néoformation aussi, le fer interfoliaire et le fer ionique ont été dosés avec l'appellation de fer déplaçable et l'on voit que c'est peu de chose. Il reste l'hydroxyde ferreux $Fe(OH)_2$. Celui-ci peut se former par altération de minéraux primaires en milieu réducteur mais surtout comme nous le pensons à partir des formes ferriques.



se déplacerait dans le sens (2) dans les sols insuffisamment oxydants. Mais le pH est d'avantage favorable à la formation de l'hydroxyde ferrique de sorte que les quantités d'hydroxyde ferreux formées seront toujours faibles.

Cette dernière caractéristique se retrouve d'ailleurs dans l'ensemble des sols étudiés.

Pourquoi observe-t-on une valeur plus élevée dans l'échantillon 6 du profil II ?

D'abord le fer ferreux ne semble pas subir le lessivage et pourrait par conséquent se former sur place. Cette observation est à rapprocher de celles faites par Duchaufour et N°Guyen Kha (1969) dans un pseudogley, un stagnogley et un pélosol pseudogley. Les valeurs sont toujours très faibles et plus élevées dans la partie superficielle du stagnogley.

Il semblerait que ce dernier trait soit caractéristique des stagnogleys.

Ces auteurs ont observé des teneurs importantes dans le pélosol par rapport aux nôtres. Ceci constitue une raison supplémentaire pour écarter les valeurs du profil IV.

c - Le fer déplaçable

Les teneurs sont extrêmement faibles. On pouvait s'y attendre car dans des sols peu propices à la formation d'hydroxyde ferreux, on a encore moins de chance de trouver l'ion Fe^{2+} .

On observe le très net partage des sols en deux catégories : les sols à fer déplaçable et les sols sans fer déplaçable.

Les seconds se caractérisent par l'absence d'un milieu réducteur permanent. L'apparition du Fe^{2+} n'y suit aucune loi.

Mais notre distinction placerait alors le profil III dans la catégorie des sols réducteurs. On voit tout de même qu'il se singularise nettement par rapport au profil II. L'ion Fe^{2+} suit dans ce dernier la même loi de distribution que les autres formes de fer. Dans le profil III, la distribution est relativement uniforme et si l'on tient compte de la très grande solubilité de l'ion Fe^{2+} on est enclin à penser qu'il se forme sur place.

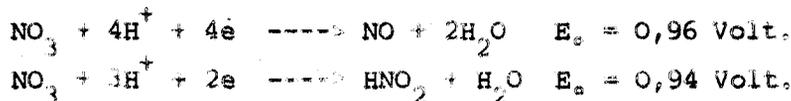
Mais pourquoi une forme aussi soluble n'est-elle pas lessivée ? Nous pensons que c'est parce qu'elle a une origine ponctuelle due à des microhabitats réducteurs.

Dans le profil II, par contre, l'ion Fe^{2+} suit le même comportement que les formes ferriques. Il semble pouvoir être retenu en surface et subir le lessivage vers la base du profil. Son accumulation en profondeur a une cause différente de celle du fer ferrique ; les hydroxydes ferriques s'accumulent par précipitation à cause du pH plus élevé mais ne sont pas visibles car il est possible qu'ils forment les micropaillettes de Blumel (1962).

Les solutions ferreuses s'enrichissent en ion Fe^{2+} par lessivage mais aussi par réduction des formes ferriques dans un milieu d'Eh plus bas (gley).

Cependant, le pH qui se situe à la limite de stabilité de l'ion Fe^{2+} ne permet pas la formation de quantités importantes. En effet, l'énergie nécessaire à la transformation des hydroxydes ferriques est d'autant plus grande que le pH est élevé.

Nota 1 : La courbe de dosage potentiométrique de l'échantillon (3) présentait comme on l'a vu, une allure en escalier. Il est vraisemblable que le palier est en rapport avec la matière organique, car entre le potentiel normal du couple Fe^{2+}/Fe^{3+} et celui du couple Mn^{2+}/Mn^{4+} , on trouve ceux des couples : N^{+VI}/N^{+II} et N^{+VI}/N^{+III} correspondant respectivement aux réactions :



(D'après Billy, 1968).

Nota 2 : Sur les conseils de M. P. Debrabant, a été réalisée l'extraction du fer total par fusion alcaline à 1000° sur 3 échantillons. Le dosage a été fait par absorption atomique. Les résultats sont les suivants :

<u>Echantillon</u>	<u>Fer total %</u> <u>à 1000°</u>	<u>Fer total %</u> <u>à 600°</u>
4	0,60	0,56
9	1,36	1,61
16	1,90	1,53

La comparaison des résultats dans les deux cas permet difficilement d'accorder une signification aux différences obtenues. A priori, on devrait s'attendre à ce que la fusion à 1000° extraie plus de fer dans le cas général car il faut détruire les silicates. Cependant, dans les publications relatives aux sols, on trouve rarement cette dernière technique. Guy Aubert préconise une température de 800°, Duchaufour et N°Guyen Kha (1969) pratiquaient une fusion alcaline à 650°.

CHAPITRE V

---:---:---:---:---:---:---:---:---:---

ANALYSES MICROBIOLOGIQUES

A) PREAMBULE

Les microorganismes jouent des rôles très importants dans les sols ; ils constituent notamment la flore pionnière dans la reconquête d'un sol par la vie.

Ces rôles sont fort bien illustrés par Dommergues et Mangenot (1970) ; les bactéries à l'étude desquelles nous nous sommes limités contribuent à l'altération minérale et libèrent des substances utilisables par les végétaux. Elles réalisent la décomposition des matières organiques d'origine végétale ou animale en les fragmentant et en redistribuant dans le sol les éléments fertiles qu'elles contiennent.

Elles jouent par là un rôle important dans l'élaboration et le maintien de la structure et contribuent à assurer la fertilité du sol.

Les bactéries sont conditionnées par divers facteurs parmi lesquels la température, l'humidité, le pH, la profondeur.

La température, lorsqu'elle est basse, est un agent inhibiteur pour les bactéries, l'humidité lorsqu'elle devient saturante contribue à asphyxier le sol et à développer un milieu anaérobie dans lequel apparaîtra une microflore particulière adaptée à ces conditions.

Le pH optimal est voisin de la neutralité mais les auteurs s'accordent à considérer que les bactéries s'adaptent fort bien à des pH plus acides.

La profondeur développe elle aussi des conditions asphyxiantes et elle fait intervenir la compaction qui est aussi un facteur inhibiteur.

L'augmentation de la profondeur signifie également un appauvrissement en substances nutritives d'origine organique.

Les sols hydromorphes acides réunissent par rapport aux autres sols de nos régions les caractères limitatifs de pH et d'humidité.

Divers auteurs se sont penchés sur l'étude de la microflore des sols hydromorphes ; aucun n'a étudié complètement le spectre bactérien de ces sols, (Waksman et Stevens, 1929), la plupart d'entre eux ont été attirés par les aspects particuliers des conditions qui régissaient leur activité.

Notamment beaucoup se sont intéressés aux bactéries du cycle du fer. Parmi ceux-là, on peut citer Harder (1919), Allison et Scarseth (1942) qui ont mis au point une méthode permettant l'extraction biologique du fer des sols, Halvorson et Starkey (1927-II) qui se sont attachés à déterminer le rôle des microorganismes dans les transformations du fer dans la nature, complétant ainsi l'étude de Harder qui présentait surtout l'aspect qualitatif du problème.

Roberts a tenté de déterminer la nature des germes qui intervenaient dans la réduction du fer. Bromfield (1954) a lui aussi tenté d'isoler les germes qui réduisent le fer.

Aucun n'avait fait le tour du problème de la réduction d'origine bactériologique dans les sols hydromorphes, la réduction du fer par les microorganismes ne constitue en effet qu'un aspect partiel du rôle des microorganismes dans le phénomène hydromorphe.

Les Japonais Takai et Kamura (1966) se sont enfin attachés à cet aspect plus général. Ils ont utilisé pour cela un échantillon de sol prélevé dans une rizière et l'ont placé dans un container clos en le submergeant d'eau. Ils ont laissé incubé durant 31 jours à 35° et ont mesuré à intervalles de temps successifs divers paramètres ; Eh, transformation des nitrates, de l'ammoniaque, formation de sulfure, dégagements gazeux d'oxygène, gaz carbonique, méthane, hydrogène, numération de germes aérobies, anaérobies, bactéries réduisant le fer, sulfato-réducteurs, production d'acides gras à courte chaîne, d'acide acétique, d'acide formique, d'acides lactique, succinique .

En définitive cela revenait à suivre pas à pas l'évolution de la microflore. Ils sont ainsi parvenus à définir deux stades dans l'évolution du sol en conditions d'hydromorphie croissante eux-mêmes divisés en plusieurs étapes successives.

Dans le premier stade de décomposition aérobie puis semi-aérobie se suivent : une respiration vraie, les bactéries intervenant utilisent l'oxygène moléculaire présent au début de l'expérience ; une respiration nitrate (réduction dissimilative des nitrates) ; une respiration manganate (réduction dissimilative des manganates) ; une réduction dissimilative du fer ferrique enfin.

Dans le second stade, on trouve tout d'abord une sulfato-réduction avec formation de sulfure, suivie d'une fermentation avec production d'hydrogène, une fermentation méthanique enfin avec formation de méthane.

Ce second stade correspond à un processus de décomposition anaérobie.

Nous voyons donc que des bactéries sont capables d'utiliser la réduction de substances autres que l'oxygène pour trouver l'énergie nécessaire à leur métabolisme. Pour illustrer cet exemple nous prendrons le cas de la respiration nitrate ou réduction dissimilative des nitrates.

Les bactéries produisent de l'énergie en oxydant des composés organiques. Ces oxydations se ramènent à la perte d'électrons par un substrat, ces électrons doivent absolument être acceptés par une substance qui sera réduite.

En aérobiose l'accepteur des électrons est l'oxygène moléculaire.

En anaérobiose, l'accepteur peut être exogène et il peut s'agir des nitrates ou bien des sulfates, ou bien encore des manganates ou du fer ferrique.

Nous avons limité notre étude à l'analyse qualitative des flores totales aérobie et anaérobie et des flores sulfato-réductrice et fer-réductrice.

B) BACTERIES AEROBIES

Nous avons fait des cultures de Bactéries aérobies par la méthode classique des ensemencements de suspensions-dilutions de sol sur milieu enrichi solide. Auparavant, la terre fraîche stockée dans des sachets plastiques étanches, subit un tamisage à 2 mm.

1. Technique

Dans le sol les bactéries qui sont présentes se trouvent à l'état de germes isolés ou de microcolonies dispersés dans la masse du sol. Les germes isolés et microcolonies ne sont observables qu'au moyen d'un microscope.

Si à ces bactéries nous procurons un substrat enrichi en matières nutritives et qu'on les met dans des conditions d'humidité, pH et température optimales, les germes isolés vont former des microcolonies puis des macrocolonies qui pourront être observées à l'œil nu.

a - Le milieu de culture

Nous avons utilisé le milieu qui est le plus fréquemment employé pour la détermination du spectre bactérien des terres, au laboratoire de

Biologie appliquée. Ce milieu a été mis qu point à l'origine par Bunt et Rovira. Il a subi ensuite diverses modifications et c'est à la version élaborée par Soumare que nous avons eu recours.

Dans un milieu de culture, les Bactéries doivent pouvoir trouver les substances nécessaires à leur survie et notamment des substances carbonées, azotées, des oligo-éléments et divers autres éléments également favorables à leur croissance.

Composition du milieu :

- $\text{PO}_4\text{H}(\text{NH}_4)_2$	0,5g
- PO_4HK_2	0,4 g
- $\text{SO}_4\text{Mg}, 7 \text{H}_2\text{O}$	0,05 g
- MgCl_2	0,1 g
- FeCl_3	0,01 g
- CaCl_2	0,1 g
- Peptone (phytone)	1 g
- Extrait de levure	4 g
- Glucose	2 g

Le milieu est solidifié par 15 g d'Agar.

La composition ci-dessus s'applique pour 1 000 cc d'eau distillée. Le pH est ajusté à 7,4.

Dans la pratique, il s'avère que les constituants surtout minéraux forment fréquemment des précipités qui rendent le milieu très opaque et peuvent être gênants lors de la lecture des résultats.

Nous avons dû recourir à une filtration du milieu. Le glucose et la gélose ne donnant pas lieu à précipités gênants, ils ne participent pas à la filtration qui portera uniquement sur les constituants minéraux, la peptone et l'extrait de levure.

Le glucose et l'Agar sont additionnés au filtrat après ajustement du pH.

Le milieu ainsi réalisé à ébullition est liquide. On le répartit dans des flacons de 150 cc à raison de 100 cc environ par flacon.

Les flacons sont bouchés et portés à l'autoclave à 120° durant 20' pour les stériliser.

Après quoi l'on réalise aseptiquement à proximité d'une flamme le coulage du milieu, liquéfié par ébullition, dans des boîtes de Pétri stériles.

Les boîtes sont séchées en les laissant 2 ou 3 jours (fermées) à la température ambiante ou bien ouvertes pendant 1 heure ou 2 à 37°, en les retournant pour éviter les pollutions par chutes de poussière. Ceci permet d'éliminer l'eau de condensation fort gênante lors des ensemencements. (Car celle-ci a pour effet de provoquer la dispersion des microcolonies).

b · Préparation de la terre

Pour obtenir des résultats valables, il est nécessaire de travailler sur des échantillons parfaitement homogènes. Pour cela, la terre est séchée à l'air durant une nuit évitant ainsi une perte trop forte d'humidité puis tamisée à 2 mm.

Le tamisat est brassé pour l'homogénéiser. On y prélèvera une prise d'essai de terre de 10 grammes qui sera placée dans un flacon spécial adapté à l'homogénéiseur puis homogénéisé au moyen d'un homogénéiseur de type "mixer" susceptible de tourner à 40 000 tours/minute.

On homogénéise ainsi durant une minute, la terre en solution dans 90 cc d'eau physiologique. (H_2O distillée avec 9 g de NaCl/l).

Cette opération se traduit donc par la mise en suspension de la terre et sa dilution à 10^{-1} .

Ensuite on réalise des dilutions de 10 en 10 jusque 10^{-5} .

Avec chacune des dilutions on ensemence 10 boîtes de Pétri préparées comme nous l'avons indiqué ci-avant, à raison de 0,1 ml de suspension par boîte. La goutte (0,1 ml) est disposée aseptiquement au moyen d'une pipette stérile au centre de la boîte.

On l'étale ensuite à l'aide d'une baguette de verre que l'on aura au préalable étirée à la flamme. L'extrémité effilée est rodée

et recourbée en boucle dans la flamme du bec Bunsen. La goutte est ainsi étalée sur la gélose de la boîte en un quadrillage serré couvrant toute la boîte.

Les boîtes numérotées sont placées à l'étuve à 28° durant 5 jours.

REMARQUE IMPORTANTE :

Il est indispensable de travailler avec des échantillons frais. Ceux-ci étaient prélevés, séchés à l'air durant la nuit etensemencés le lendemain. S'ils ne peuvent être utilisés le jour même ou le lendemain, ils doivent être conservés au réfrigérateur mais cela ne doit pas dépasser 3 ou 4 jours. En effet, le prélèvement et la conservation dans des sacs de plastique étanches induisent des modifications importantes du milieu.

Les bactéries dans leur ensemble se trouvent portées à des températures plus élevées et plus favorables à leur croissance. Les bactéries anaérobies strictes se trouvant amenées au contact de l'air peuvent être inhibées.

2. Résultats

a - Présentation

Les premières cultures ont été réalisées en hiver et ont concerné uniquement le profil n° I, car dans un second temps nous avons réalisé des cultures de germes anaérobies pour le même profil et nous verrons ensuite que nous avons connu là des déboires qui nous ont conduit à abandonner nos premiers résultats.

Notons au vu de ces résultats que les horizons organiques n'ont pas été analysés et ceci parce que leur homogénéisation ne peut se faire par la méthode classiquement employée pour les terres minérales.

Notons également que nous ne nous sommes pas intéressés aux champignons. (Ceux-ci en effet, sont fragmentés par l'homogénéisation et chaque fragment pouvant redonner un champignon, on se rend compte de la difficulté d'interprétation des résultats).

- Les dilutions qui donnent plus de 100 à 200 germes doivent également être rejetées car la surpopulation est une cause d'inhibitions de certains germes.

- On utilisera donc dans la pratique les dilutions qui auront donné entre 10 et 100 colonies par boîte.

- Dans une série de boîtes de la dilution retenue, on éliminera les valeurs trop faibles ou trop grandes. On calculera la moyenne correspondant aux boîtes retenues et l'on multipliera par 10 pour connaître le nombre moyen de bactéries par ml de suspension. On multipliera par la dilution pour arriver au nombre correspondant à 1 g de sol.

Le résultat sera corrigé ensuite en fonction de l'humidité pour obtenir finalement un nombre de Bactéries par gramme de terre sèche.

c - Résultats proprement dits et discussion (Tab. 15 et 16)

Entre 0 et 45 cm les résultats varient de 2 à 4 00 000.

A des profondeurs plus importantes, la population devient beaucoup plus faible. Ceci tient au caractère inhibiteur de la profondeur dont nous avons déjà parlé. A cette profondeur, le milieu se raréfie en oxygène et en substances nutritives.

Les nouvelles valeurs pour le niveau 10 à 20 cm, et pour le niveau 35 à 45 cm, uniformisent la densité de la population pour l'ensemble des horizons superficiels.

Les horizons organiques semblent ici très pauvres en bactéries, nous avons par contre, observé la recrudescence de champignons. Dans ces niveaux, en hiver, la matière organique se décompose très mal et fournit peu d'éléments nutritifs aux Bactéries.

Ce sont surtout des champignons qui interviennent.

Dans l'ensemble, la microflore est très peu dense, Blondeau et Soumare ont enregistré des populations oscillant entre 7,1 et 85,5 10^6 Bactéries/g de terre sèche dans des sols non hydromorphes du Nord de la France (cultivés ou non).

Les Actinomycètes, germes apparentés aux Bactéries mais faisant le lien entre champignons et Bactéries de par leurs caractères mixtes, ont été envisagés dans un premier temps.

Ces germes moins nombreux dans le sol que les Bactéries sont généralement inhibés par la croissance bactérienne. Leurs exigences nutritives sont légèrement différentes de celles des Bactéries de sorte qu'ils poussent mal sur les milieux de culture pour Bactéries. Leur étude requiert donc un milieu plus spécifique dont la composition voisine de celle du milieu pour Bactéries en diffère cependant au niveau des oligo-éléments en particulier. De tels milieux pouvant également être utilisés favorablement par les Bactéries, on leur additionne des substrats spécifiques des Actinomycètes tels que le glycérol en particulier.

Les quelques analyses que nous avons faites de ces germes ne sont pas figurées dans ce travail car elles se sont avérées très décevantes : nous arrivions à des populations très réduites qui nous contraignaient à l'emploi des dilutions très faibles (10^{-1}), pour lesquelles on se heurte à des difficultés importantes lors de l'ensemencement. La densité des solutions est très grande et les particules qu'elles contiennent bouchent les pipettes rendant impossibles les prélèvements si l'on n'a pas recours au sciage du bout de la pipette, opération qui entraîne ensuite des erreurs dans le volume prélevé.

Par la suite, nous n'avons pas poursuivi dans cette voie.

Notons enfin que la première dilution n'est pas réalisée aseptiquement car, à ce niveau, la population est très grande et les erreurs entraînées par la chute de poussières ne peuvent avoir de répercussion notable sur la quantité de germes présents.

b - La lecture des résultats

- On compte les colonies qui se sont formées, chaque colonie vaut pour une Bactérie.

- Les dilutions qui donnent un nombre de colonies inférieures à 10 sont éliminées car les résultats ne sont pas significatifs. Une boîte peut porter 10 colonies, la suivante 0. Il est donc impossible de faire une moyenne significative à partir de là.

Pour le profil n° V, nous avons trouvé à la même période : environ 400.000 bactéries entre 5 et 12 cm de profondeur, environ 650.000 entre 12 et 26 cm, environ 150.000 au delà de 26 cm.

Il s'agit là d'un sol très pauvre en substances nutritives et riche en éléments toxiques (sulfures).

En septembre 1974 ont été refaites quelques mesures sur 4 échantillons prélevés respectivement dans chacun des quatre profils. Le profil n° V avait été abandonné à cause de sa souillure dont nous ne connaissions pas bien l'origine.

On remarque que le résultat obtenu pour le niveau 4 du profil I est sensiblement égal à celui qui avait été obtenu en décembre. Il ne semble donc pas y avoir d'influence notable de la saison à moins qu'il n'y ait modification des facteurs inhibiteurs. En novembre et décembre nous avons enregistré des températures très basses, (on ne peut parler pour ce niveau de l'influence directe de la végétation, à cette profondeur son influence sur le plan nutritif est certainement assez uniforme au cours de l'année), en septembre, par contre, l'humidité était plus importante, si les températures ont été plus élevées.

On note la très grande pauvreté de l'échantillon n° 9 (profil II), comparable à celle de la base du profil V. On peut l'expliquer par les causes suivantes : absence de substances nutritives, absence presque totale d'oxygène, eau peu mobile, donc peu réoxygénée, humidité excessive.

Les résultats, tous très faibles pour les quatre échantillons sont imputables à la profondeur en premier lieu.

Nous devons à présent ouvrir une parenthèse pour justifier cette dernière analyse. Notre but était de dénombrer les germes aérobies et anaérobies, les sulfato-réducteurs et les germes réalisant la réduction dissimilative du fer ferrique pour avoir une idée de l'état de réduction du sol par rapport au schéma de Takai et Kamura.

Cependant, nous l'avons déjà dit, nous fûmes contraints d'abandonner les premiers résultats obtenus en aérobiose, car ils avaient été réalisés à une période différente et il nous semblait donc qu'il serait difficile d'exploiter ensemble des résultats correspondant à des conditions de milieu différentes.

Nous avons décidé de recommencer les analyses au printemps et cette fois, faute de temps, nous avons dû renoncer au projet d'analyse systématique des différents profils.

Nous nous sommes donc contentés de choisir des échantillons précis dans le but d'une comparaison. Voulant comparer les effets de l'hydromorphie, il nous a fallu choisir des échantillons présentant le caractère hydromorphe. Nous avons donc retenu pour le profil n° I les échantillons 4 et 5 appartenant au faciès marmorisé. La profondeur a été choisie de manière à ce qu'elle soit voisine d'un échantillon à l'autre. Nous avons dans cette optique, préféré l'échantillon n° 4 (40-50 cm), et retenu les échantillons n° 9 (44-50 cm), 16 (50 cm) et 13 (35-40 cm). (Le n° 16 étant l'échantillon de référence non hydromorphe).

D) BACTERIES ANAEROBIES

1. Première technique

Ces bactéries requièrent pour leur développement des conditions asphyxiantes, liées dans le sol à l'humidité excessive.

Au laboratoire, il nous faut recréer de semblables conditions si l'on veut qu'elles puissent survivre.

L'ensemencement se fait suivant le même mode que pour les bactéries aérobies. On utilise le même milieu et les suspensions diluées sont réalisées de la même manière.

La différence fondamentale intervient au niveau de l'incubation. Celle-ci doit se faire en l'absence d'oxygène. La technique que nous avons utilisée est récente et a été mise au point aux Etats-Unis. Les boîtes de Pétriensemencées sont placées dans des jarres. Dans chaque jarre, on place en outre un sachet "Gas Pak" contenant un réactif qui prélèvera, additionné d'eau, l'oxygène contenu dans la jarre. La réaction est facilitée par l'emploi d'un catalyseur situé dans le couvercle de la jarre. On met dans la jarre un papier indicateur d'anaérobiose au bleu de méthylène. Celui-ci qui est de couleur bleue en présence d'oxygène doit devenir blanc en son absence.

Les jarres ainsi équipées sont fermées hermétiquement et mises à l'étuve à 28°C durant 5 à 7 jours.

Il s'est avéré que dans nos expériences, l'indicateur d'anaérobiose n'a fonctionné qu'une seule fois. M. Blondeau qui avait sérieusement testé le système auparavant concluait à une défectuosité de l'indicateur.

Nous avons dû abandonner cette hypothèse lorsque deux jarres incubées simultanément dans les mêmes conditions ont montré l'une le fonctionnement de l'indicateur, l'autre pas.

Les résultats, très différents dans l'une et l'autre jarre, nous conduisirent à rechercher la faille dans une défectuosité du système et non de l'indicateur. Dans la jarre où l'indicateur avait fonctionné, les bactéries étaient beaucoup moins nombreuses que dans l'autre jarre.

Ce système est appliqué avec succès à l'Institut agricole et au C.E.R.C.I.A., mais en utilisant des jarres beaucoup plus petites pour la même quantité de réactif.

Par contre, la Faculté de Pharmacie de Lille utilise des jarres de dimensions égales aux nôtres et rencontre les mêmes difficultés que nous.

Monsieur Blondeau a tenté de faire fonctionner le système en utilisant 2 "Gas Pak" au lieu d'un, mais n'a pas obtenu de résultats satisfaisants, l'indicateur ne fonctionnait toujours pas.

Pour sa part, il est plus favorable à l'hypothèse de la défectuosité de l'indicateur (il a réussi à faire pousser dans les jarres des souches pures anaérobies connues, avec le système "Gas Pak", mais l'indicateur n'a jamais fonctionné).

Dans le doute nous avons préféré renoncer à l'utilisation de cette technique.

Résultats

Quoiqu'il en soit, nous avons tout de même retenu les résultats obtenus par ce système dans l'unique cas où l'indicateur avait fonctionné :

- nous avons trouvé pour le profil I - 256.000 bactéries g de terre sèche entre 10 et 20 cm de profondeur ; 34100 bactéries entre 55 et 65 cm ;

- on retrouve là, le caractère inhibiteur de la profondeur qui prend le pas sur le caractère favorable constitué par l'asphyxie due à l'eau. (Ces résultats ont été obtenus au mois d'avril).

2. Deuxième technique

Pour les mesures faites en septembre, nous avons recouru à la méthode classique mais fastidieuse du pyrogallol.

a - Technique

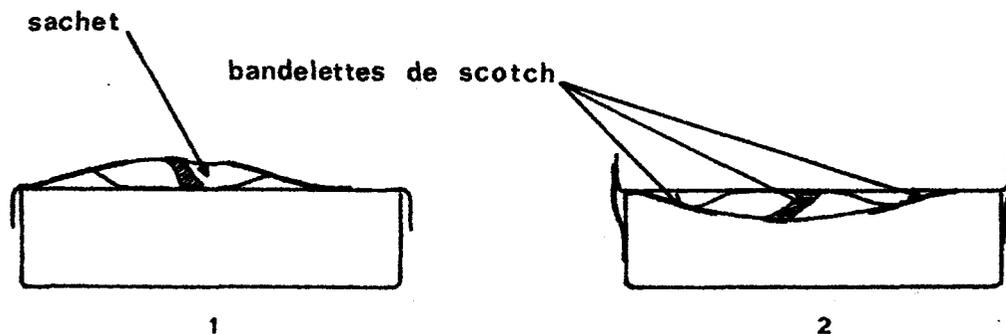
- les boîtes sont ensemencées comme précédemment ;
- on réalise un mélange dont la composition est la suivante :

CO_3K_2 3 g

Pyrogallol 3 g

Terre d'infusoire 15 g

- on aura fabriqué, avant, des petits sachets à l'aide de papier filtre (papier Joseph) autant de sachets que de boîtes ;
- dans chaque sachet on met environ 2 grs du mélange décrit ci-dessus préalablement homogénéisé au mortier ;
- chaque sachet est fixé par du papier adhésif sur le couvercle de chaque boîte ;
- après de la flamme on retourne les boîtes en ôtant le couvercle qui est redéposé à l'envers sur la boîte. L'aseptie n'est pas rigoureusement nécessaire car les germes anaérobies sont peu nombreux dans l'air ;
- l'ensemble couvercle-boîte est collé au moyen de papier adhésif de façon à éviter les échanges gazeux avec l'extérieur ;
- la terre d'infusoire absorbe l'humidité, le pyrogallol en milieu alcalin (CO_3K_2) absorbe l'oxygène présent.



b - Résultats

Les résultats sont donnés dans le tableau n° 17.

Les valeurs obtenues sont voisines pour les différents échantillons, elles sont plus élevées pour l'échantillon n° 13, vraisemblablement à cause de la profondeur plus faible.

Il est remarquable de constater qu'au mois de septembre où les précipitations ont été plus fortes cependant, et les températures plus élevées l'échantillon n° 4 donne des valeurs plus faibles que l'échantillon 10/20 cm en avril lequel est pourtant plus oxygéné.

On a ici encore une illustration très nette du caractère limitatif de la profondeur surtout par la pauvreté en substances nutritives organiques qu'elle détermine.

Par contre, on note que le niveau 55/65 cm de profondeur plus voisine est nettement défavorable par rapport au niveau n°4 (40/45 cm).

A 55/65 cm, les phénomènes d'oxydation prennent le pas sur les phénomènes de réduction dans ce profil.

E) CONCLUSIONS RELATIVES AUX FLORES TOTALES AEROBIE ET ANAEROBIE

Le rapport bactéries aérobies/anaérobies rend compte de l'état d'oxydation de l'échantillon.

Il est de : $\frac{420}{172} = \frac{15}{43}$ 2,7 pour le niveau 4 (Profil I)

de : $\frac{61}{23} = 2,6$ pour le niveau 9 (profil II)

de : $\frac{265}{110} = 2,3$ pour le niveau 16 (profil III)

de : $\frac{515}{268} \frac{515}{270} = \frac{103}{54}$ 2 pour le niveau 13 (profil IV)

Il semble que dans le profil IV, échantillon 13, ce résultat soit imputable à la profondeur qui est plus faible.

Aux profondeurs équivalentes pour les 3 autres profils, nous constatons une uniformité du rapport des Bactéries aérobies aux Bactéries anaérobies.

Tableau 15
Numération de germes aerobies

Profil	Echantillon	Profondeur	Humidite %	pH	Date	Dilution	Resultats
I	—	0/3	56,3	4,3	Hiver 73/74	non analyse	
I	—	3/7	25,25	4,2	"	10 ⁻³	340000
I	—	10/20	15,0	4,3	"	10 ⁻⁴	200000
I	—	20/30	15,0	4,1	"	10 ⁻⁴	325000
I	—	35/45	14,15	4,15	"	10 ⁻⁴	390000
I	—	45/55	—	—	—	non analyse	
I	—	55/65	13,0	4,15	"	10 ⁻³	409000
I	—	75/85	14,5	4,17	"	10 ⁻³	320000

Les resultats sont donnees en bacteries par gramme de terre seche.
De nouvelles mesures faites a la meme epoque ont donne:
280000 bact. pour le niveau 16/20cm et 325000 bact. pour le niveau 35/45cm.
Une mesure faite en avril 74 a donne pour le niveau 3/7cm 420000 bacteries, l'humidite etant alors de 12%.

Tableau 16
Numération de germes aerobies

Profil	Echantillon	Profondeur cm	Humidite %	pH	Date	Dilution	Resultats
I	4	40/45	13,5	4,26	Sept, 74	10 ⁻³	420000
II	9	44/50	23	5,70	"	10 ⁻²	60600
III	16	50	14,3	5,50	"	10 ⁻²	265000
IV	13	35	23	4,39	"	10 ⁻³	515000

Resultats en bacteries par gramme de terre seche.

Tableau 17
Numération de germes anaerobies

Profil	Echantillon	Profondeur	Humidite %	pH	Date	Dilution	Resultats
I	4	40/45	13,5	4,26	Sep 74	10 ⁻²	172000
II	9	44/50	23	5,70	"	10 ⁻²	23000
III	16	50	14,3	5,50	"	10 ⁻²	110000
IV	13	35	23	4,39	"	10 ⁻²	268000

Resultats obtenus en avril 74:

profil I 10/20cm 256000 bac./g de terre seche
profil I 55/65cm 34100 bac./g de terre seche



Ces rapports sont voisins de celui que l'on obtient pour un échantillon non hydromorphe (n° 16 - profil III).

Nous pensons que, lorsqu'il est possible de faire de semblables analyses au niveau d'horizons plus superficiels, les différences devraient être plus marquées.

Ces analyses nous ont permis de faire en outre les remarques suivantes : on a constaté l'existence très nette d'une flore dominante dans le cas de l'échantillon n° 4.

L'échantillon n° 13 s'est avéré très riche en Actinomycètes colorés - (violets, jaunes, oranges et blancs) libérateurs d'antibiotiques inhibiteurs des Bactéries -.

Notons que les résultats obtenus en aérobose et en anaérobiose se chevauchent du fait de l'existence de germes aérobies-anaérobies facultatifs qui se développent aussi bien en aérobose qu'en anaérobiose.

F) LES SULFATO-REDUCTEURS

Nous avons utilisé pour leur culture une technique très différente de celle qui a été employée pour déterminer les germes aérobies et anaérobies.

La méthode est sélective et consiste dans une mise en évidence des germes par une réaction colorée.

1. Le milieu (Pochon et Tardieux, 1954) d'après Starkey

C'est un milieu liquide cette fois.

Composition :

NH_4Cl	1 g
$(\text{PO}_4\text{H})\text{K}_2$	0,5 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2 g
Na_2SO_4	0,5 g
CaCl_2	0,1 g
Lactate de sodium à 60 %	6cc
H_2O distillée q.s.p.	1000 cc

Ce milieu est réparti dans des tubes à raison de 5cc par tube ; les tubes sont bouchés et autoclavés à 110° durant 20'.

2. Utilisation

Si le milieu a été fait depuis plusieurs heures, il doit être régénéré, c'est-à-dire débarrassé de l'oxygène qu'il contient ; ceci se fait par ébullition durant 15' au bain-Marie.

Dans chaque tube est introduit aseptiquement un clou préalablement stérilisé à la flamme et refroidi quelques secondes.

On ensemence ensuite des suspensions dilutions réalisées par la méthode classique précédemment décrite, à raison de 1 ml de suspension par tube.

Pour réaliser l'anaérobiose, on introduit dans le tube de la vaseline ou de la parafine sur une hauteur de 1 cm environ. Cet anneau huileux va faire obstacle à l'oxygène.

On incube à 28° durant 3 semaines.

On aura réalisé des dilutions de 10 en 10 jusque 10^{-4} , et ensemencé 5 tubes par dilution.

3. Lecture des résultats

On note l'existence ou la non existence de réaction colorée qui traduisent respectivement la présence ou l'absence de germes sulfato-réducteurs dans le sol.

En l'occurrence les tubes positifs ont une couleur noire due à la formation de FeS.

Le tableau 18 donne la liste des résultats.

Ceux-ci sont calculés au moyen des tables de Mac Crady que nous avons trouvées dans le manuel de Pochon et Tardieux (1954).

Pour chaque dilution on note le nombre de tubes + (=colorés) et le nombre de tubes -. Cela permet de déterminer le "nombre caractéristique" correspondant qui comportera 3 chiffres.

Prenons un exemple :

Dilutions	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Nombre de tubes +	5	5	5	5	0

Le premier chiffre du nombre caractéristique sera 5, on choisira la dernière dilution qui a donné 5 +.

Le second chiffre sera forcément inférieur à 5 et sera le chiffre situé immédiatement à droite du dernier chiffre 5. Ici ce sera 4.

Le troisième chiffre sera la somme des chiffres suivants vers la droite : ici $3 + 0 = 3$.

D'où le nombre caractéristique 543 à la dilution 10^{-2} .

Dans la table on lit en face du nombre caractéristique 543, le nombre le plus probable de bactéries se trouvant dans 1 ml de suspension à la dilution correspondante. Ce nombre est 30 bactéries à 10^{-2} , ce qui fait $30 \times 10^2 = 3\ 000$ bactéries/g de terre humide.

Si l'on avait eu un nombre caractéristique de 543 à 10^{-3} , on aurait encore trouvé 30, ce qui aurait donné : $30 \times 10^3 = 30\ 000$ bactéries/g de terre humide.

Pour obtenir le nombre réel de bactéries/g de terre sèche, on corrige en fonction du coefficient d'humidité.

Les résultats sont donnés dans le tableau 18.

Tableau 18

GERMES SULFATO-REDUCTEURS

DATE	PROFIL	ECHANTILLON	PROFONDEUR	HUMIDITE %	pH	RESULTAT
Juin 74	I	1	17/23 cm	10,7	4,10	196
"	I	3	23/24 cm	13,4	4,12	577
"	I	4	40/45 cm	12	4,26	397
"	I	5	49/53 cm	11,5	4,12	91
"	II	6	6,5 cm	17,7	5,25	61
"	II	7	10 cm	20	5,00	163
"	II	8	27/30 cm	25,4	4,55	34
"	II	9	47 cm	23,1	5,70	46
"	III	10	9,5 cm	19,2	4,35	43
"	IV	11	2/10 cm	32,5	4,70	118
"	IV	12	20 cm	22,7	6,10	32
"	IV	13	35 cm	23,9	5,50	46

Résultats donnés en nombre de bactéries par gramme de terre sèche.

- TAMM O. Om bestämning av de organiska komponenterna i markens gelkomplex. Medd. Fr. Stat. Skogsf. Stockholm, 1922, 19, 385.
- TAKAI Y, KAMURA T. The mechanism of reduction in water-logged paddy soil. Fol. Mic. 1966, II, 304-313.
- TURC L. Influence de la fermentation d'une litière végétale sur la dynamique du fer dans un sol en place. C.R.A.S. 1958, 247, 1639-42.
- WAKSMAN S.A., STEVENS K.R. Contribution to the chemical composition of peat: V the role of microorganisms in peat formation and decomposition. Soil Sci. 1929, XXVIII, N° 4, 315.
- WALKER S.L., SHERMAN G.D. Determination of total ferrous iron in soils. Soil Sci. 1962, 33, 5, 325-8.

- KRAUSKOPF K.B. Introduction to geochemistry.
The Mac Graw Hill Company Edit. New York. 1967.
- LEENHEER (L de) Bull. Inst. Agr. Gembloux 1958,26,1 et 3 p 13-65.
- LEVY G. Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous résineux et sous feuillus. Ann. Sci. For. 1969,26,1,65-79.
- LOSSAINT P. Etude expérimentale de la mobilisation du fer dans les sols sous l'influence de litières forestières. Ann. Agr. 1959,363-414,493-542.
- MATTSON S. The laws of colloidal behavior : III Isoelectric precipitates. Soil Sci. 1930,31,57-77.
- MATTSON S., CSIKY S.S.
The laws of colloidal behavior: XVI The cation-exchange maximum in alumino-silicates. Soil Sci. 1934,39,161-165.
- MERIAUX S. Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. 1953 Thèse - INRA.
- PLAISANCE G. Les sols à marbrures de la forêt de Chaux. Ann. Sci. For. 1965,22,4,437-680.
- POCHON ., TARDIEUX P.
Manuel technique d'analyse microbiologique du sol. MASSON et Cie Edit. Paris 1954.
- QUISPEL A. Measurement of oxidation-reduction potentials of normal and inundated soils. Soils Sci. 1947,63,4,265-276.
- RIGHI D. Aspects morphologiques et physico-chimiques de la podzolisation en forêt de Rambouillet. Thèse Orsay, 1969.
- ROBERTS J.L. Reduction of ferric hydroxide by strains of Bacillus polymyxa. Soil Sci. 1947,63-2,135-140.
- SAYWELL L.G., CUNNINGHAM B.B.
Determination of iron colorimetric o-phenanthroline method. Ind Eng. Chem. Anal. Ed. 1937,9,67-69.
- SCHAEFFER R. Thèse Orsay, 1967. Rev. Ecol. Biol. du sol. 1967,4 (3), p 385-437, et (4) p 567-592.
- SEGALEN P. Le fer dans les sols. Orstom , 1964.
- SOMMARE S. DEA Lille
- SWENSON K.M., COLE C.V., SIELING D.H.
Fixation of phosphate by iron and aluminium and replacement by organic and inorganic ions. Soil Sci. 1949, 67,3-22.

DUCHAUFOR Ph., N^o GUYEN KHA

Note sur l'état du fer dans les sols hydromorphes.
Sci. du Sol 1969, 1, 96-110.

FORTUNE W.B., MELLON M.G.

Determination of iron with o-phenanthroline.
Ind. Eng. Chem. Anal. Edit. 1938, 10, 60-64.

GARRELS R.M., CHRIST C.L.

Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses.
Gauthier-Villars - Edit. Paris 1967.

HALVORSON H.O., STARKEY R.L.

Studies on the transformation of iron in nature.
I. Theoretical considerations. J. Phys. Chem.
1927, 31, 626-631.

II. Concerning the importance of microorganisms in
the solution of iron. SOIL Sci. 1927, 24, 381.

HARDELIN J.L. DEA LILLE (Communication de M. L. Durin)

HARDER E.C. Iron depositing bacteria and their geologic rela-
tions. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper n^o 113 (1919)

HEM J.D., CROPPER W.M.

Survey of ferrous ferric chemical equilibria and
redox potentials. U.S. Geol. Surv. Water Supply
Paper, 1959, 1453, A, 1-31.

HEM J.D. Restraints on dissolved ferrous iron imposed by
bicarbonate, redox potential and pH.

U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1960, 1459, B,
35-55.

IGNATIEFF V. Method for determining ferrous iron in soil solu-
tions and a study of the effect of light on the re-
duction of iron by citrate and 2-2' dipyridyl.
J. Soc. Chem. Indust. 1937, 56, 407-410.

JAMAGNE M. Bases et techniques d'une cartographie des sols.
Ann. Agr. 1967, volume 18, n^o spécial.

JEFFERY J.W.O. Iron and the Eh of water logged soils with particu-
lar reference to paddy.
J, Soil Sci. 1960, 11, 1, 140-148.

KOLTHOF I.N., SANDELL E.B.

Textbook of quantitative inorganic analysis.
The Mac Millan Company Edit. New York. 1959.

- BROMFIELD S.M. The reduction of iron by bacteria.
J. Soil Sci. 1954,5,123-139.
- BROWN G. A qualitative study of some gleyed soils from North
West England. J. Soil Sci. 1954,5,I,143-145.
- CALLAME B.,DUPUIS J.
Recherches sur la dynamique du fer dans les forma-
tions littorales et les sols de prés salés.
Sci. du Sol. 1972,2,33-60.
- CAPOCHICHI A.E. Influence des plantations de résineux sur substrat
sablo-limoneux. (Etudes faites en forêts de Saint-
Amand et Mormal) 1969, DES LILLE.
- CARROLL D. Role of clay minerals in the transportation of iron.
Geoch. Cosmoch. Acta 1958,14,1-28.
Carte géologique de la France au 1/50 000°.
B.R.G.M. 1973, Feuille Saint-Amand-Mons-Crespin.
Carte géologique de la France au 1/80 000°
BR.G.M. 3ème édition Lille 1968 - Feuille Douai.
Carte du Parc Naturel Régional de Saint-Amand/Rais-
mes au 1/25 000°.
- CHARLOT G. Dosage colorimétrique des éléments minéraux.
2ème édition 1961, MASSON Editeur PARIS.
- CLARK J.S., GOBIN C.A., SPROUT P.N.
Yellow mottles in some poorly drained soils of the
lower Fraser Valley. (Brit. Columbia)
Can. J. Soil Sci. 1961,41-2,218-227.
- MOUVIER, MARTIN Cours CBEG - Paris 1969 (Polycopié).
- DEMOLON A. Principes d'agronomie. (I. la dynamique du sol)
DUNOD Edit. PARIS 1952.
- DEMOLON A., BASTISSE E.M.
Observations sur la géochimie du fer.
C.R.A.Agr. 1944,30,501-2.
- DOMMARGUES Y., MANGENOT F.
Ecologie microbienne des sols. MASSON Edit. Paris
1970.
- DUCHAUFOR Ph. Note sur le rôle du fer dans les complexes argillo-
humiques. C.R.A.S. 1963,256,12,2657-61.
- DUCHAUFOR Ph. Précis de pédologie. MASSON Edit. Paris 1970.

BIBLIOGRAPHIE

- AARNIO Cité par BARBIER (BARBIER G. Ann. Agr. 1938, 8, 34)
- ALLISON et SCARSETH
 Cité par SEGALEN. (SEGALEN P. Le fer dans les sols
 1964 ORSTOM.
- ARDEN T.V. The solubility products of ferrous and ferrosic hydroxides. J. Chem. Soc. 1950, 1, 882-885.
- AUBERT G. Méthodes d'analyse des sols - CRDP - Marseille.
- BARBIER G. Conditions et modalités de fixation de l'hydrate de fer colloïdal par l'argile du sol. Ann. Agr. 1938, 8, 34.
- BASS-BECKING G.M., MOORE D.
 The relation between iron and organic matter in sediments. J. Séd.Pétr. 1959, 29, 3, 454-8.
- BECKER M. Etude des relations sol-végétation en conditions d'hydromorphie, dans une forêt de la plaine lorraine. 1971 - Thèse, Nancy.
- BETREMIEUX R. Cité par Turc - TURC L. Ann. Agr. 1951 p 193-195.
- BETREMIEUX R. Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols.
- BEZIER D. Etude électrochimique de la stabilité de quelques complexes ferriques. J. Chim. Phys. 1944, 41, 125.
- BILLY Introduction à la chimie analytique - CBBG-PC. DUNOD 1968.
- BLONDEAU R., SOUMARE S.
 Caractéristiques microbiologiques des sols de la région nord de la France. Ann. Inst. Pasteur 1972, 123, 239
- BLOOMFIELD C. The possible significance of polyphenols in soil formation. J. Sc. Food Agr. 1957, B, 383-392.
- BLOOMFIELD C. Some observations on gleying. J. Soil Sci. 1950, I, 2, 205-211.
- BLUMEL F. Formen der Eisen oxydhydrat Ausscheidungen in Gleyen und Pseudogleyen. Zeit. Pflanz. Düng. und Bodenk. 1962, 258-264.
- BROMFIELD S.M. Reduction of ferric compounds by soil bacteria. J. Gen. Microbiol. 1954, II, 1-6.

Il s'avère qu'ils sont très faibles dans tous les cas, ce qui laisse supposer que l'état de réduction du sol n'est pas suffisant pour le développement des sulfato-réducteurs.

G) BACTERIES QUI REDUISENT LE FER FERRIQUE

1. Bibliographie technique

Nous n'avons pu exploiter les techniques mises en oeuvre par Takai et Kamura (1966), ces auteurs n'en faisant pas état dans leur publication. Leurs autres publications sont par ailleurs d'accès difficile car rédigées dans la langue nippone.

D'autres auteurs ont étudié ce groupe de Bactéries et en particulier Roberts (1947) et Bromfield (1954).

Roberts les a isolées et a conclu à une flore hautement spécifique réduite à une seule espèce pratiquement.

Bromfield (1954) reprit les travaux de Roberts en portant son attention sur la détermination du milieu de culture. Il a pu mettre en évidence une flore plus diversifiée que le supposait Roberts et concluait que la spécificité de la flore décrite par ce dernier était imputable à une mauvaise adaptation du milieu de culture.

Il a donc déterminé un milieu plus favorable à l'ensemble de ces germes. C'est ce milieu que nous avons utilisé pour notre étude.

Le dénombrement des germes se fait, comme dans le cas des sulfato-réducteurs, à l'aide d'une réaction colorée en milieu liquide.

Bromfield (1954) utilisait un réactif sélectif du fer divalent susceptible de former avec celui-ci un complexe coloré. Ce réactif est la 2-2' bipyridyl qui donne avec Fe^{2+} un complexe de couleur rose.

Il ensemait ses bactéries dans un milieu liquide auquel il additionnait du fer ferrique sous forme d'hydroxyde $Fe(OH)_3$. (Il utilisait également des milieux solides en boîtes de Pétri).

En mettant en contact avec le milieu solide, un papier filtre imbibé de réactif ou en ajoutant quelques gouttes de réactif dans le milieu liquide, il constatait la présence du Fe^{2+} par le rougissement immédiat du réactif. Nous l'avons constaté et Ignatieff (1937) en a fait l'étude, les complexes à la dipyridyl sont sensibles à la lumière, il faut donc ne considérer que les résultats immédiats.



Bromfield ajoute que sur le milieu solide, il n'est pas possible de colorer sélectivement les colonies spécifiques de la réduction car le milieu se colore uniformément en rose.

2. Technique adoptée

a - Le milieu

Nous avons utilisé le milieu liquide de Bromfield dont la composition est la suivante :

KH_2PO_4	0,05 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,02 g
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,1 g
Saccharose	0,5 g
CaCO_3	0,5 g
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	0,05 g
Extrait de levure	0,015 g
H_2O distillée	100 cc

Le pH était ajusté à 7.

Ce milieu est réparti en tubes à raison de 5cc par tube. Ceux-ci sont bouchés et stérilisés à l'autoclave à 110° pendant 20'.

Notons que Bromfield préfère le saccharose au glucose car ce dernier possède un pouvoir réducteur important vis à vis du fer (Bloomfield 1950 : Bétrémieux cité par Turc, 1958).

Il utilise dans ce milieu du carbonate de calcium comme l'a fait Bloomfield (1950) qui remarquait qu'en présence de ce composé l'activité microbienne était meilleure.

L'hydroxyde ferrique a été obtenu par précipitation à partir du chlorure ferrique en présence de soude fortement en excès. Le précipité obtenu était lavé plusieurs fois à l'eau distillée avant utilisation.

Nous avons réalisé ensuite une suspension homogène et prélevé la quantité de suspension nécessaire pour fournir une quantité d'hydroxyde égale à 0,05 %.

Le réactif utilisé était la dipyridyl à 0,1 % en solution d'acide acétique à 10 % (Bromfield 1954).

b - Préparation de la terre et utilisation du milieu

- On réalisait tout d'abord des suspensions-dilutions de terre suivant la technique habituelle ;
- comme pour les sulfato-réducteurs, on aensemencé 5 tubes par dilution jusqu'à la dilution 10^{-4} ;
- l'incubation était faite à 28° pendant 5 jours en anaérobiose ;
- l'anaérobiose était obtenue par un bouchon de vaseline ;
- les résultats ont été déterminés au moyen des tables de Mac Crady.

3. Discussion et résultats

Il nous semblait possible, avec la méthode de Bromfield, de doser quantitativement par colorimétrie, l'activité réductrice de la microflore vis à vis du fer.

Un dosage quantitatif précis de l'activité microbienne réductrice devait tenir compte de la réduction purement chimique d'une part et de la présence de Fe^{++} dans l'échantillon au départ.

Nous avons donc entrepris le dosage séparé de chacune de ces trois composantes.

Le Fe^{++} présent au départ était dosé colorimétriquement pour chaque suspension-dilution de 10^{-1} à 10^{-4} .

La réduction chimique était dosée pour chaque suspension-dilution de 10^{-1} à 10^{-4} en présence du milieu de Bromfield. Mais la terre avait été stérilisée au préalable. On additionnait aux terres diluées le milieu de Bromfield tout d'abord pour se placer dans les mêmes conditions expérimentales que pour le dosage de l'activité bactérienne. En outre, nous voulions donner à la technique une valeur d'applicabilité plus générale et le milieu de Bromfield contenant du carbonate de calcium nous plaçait dans le cas défavorable des sols riches en calcium. On sait en effet que le calcium a un fort pouvoir flocculant vis à vis du fer (Segalen, 1964 ; Barbier, 1938 ; Demolon et Bastisse, 1944 ; Duchaufour, 1970 etc ...). Par conséquent, si notre technique pouvait s'appliquer dans le cas des sols riches en calcium on était en droit de penser qu'elle s'appliquerait aux autres sols.

L'activité réductrice des bactéries enfin, était dosée colorimétriquement.

Si pour une dilution donnée, x_1 était le pourcentage de Fe^{++} obtenu pour le premier dosage, x_2 le pourcentage obtenu pour le second dosage et x_3 le pourcentage donné par le dernier dosage, la valeur de l'activité réductrice des bactéries devait être:

$$x_3 = (x_1 + x_2)$$

Les résultats ont été très décevants, en effet :

- 1° Il semble qu'il soit très difficile de faire un dosage quantitatif avec des bactéries. Le résultat final qui devait être une moyenne entre ceux des 5 tubes d'une même dilution, était difficilement chiffrable car les variations de l'intensité de coloration entre les différents tubes pouvaient aller du simple au centuple. Certains tubes pouvaient même se révéler incolores.

- 2° Les complexes à la dipyridyl sont sensibles à la lumière et s'altèrent très rapidement avec le temps (Ignatieff, 1937).

- 3° La réduction chimique du fer requiert assurément des temps plus longs que la réduction bactérienne. On ne pouvait donc pas rendre compte, dans les cinq jours que durait l'incubation, de son importance propre.

- 4° La présence des carbonates entraînait la formation dans les échantillons stériles de gommages au fond des tubes. Ces gommages se coloraient en rose en présence de dipyridyl. Le liquide surnageant demeurait incolore et ne pouvait donc pas être dosé par colorimétrie.

Notons que ces gommages résistaient à l'attaque des acides et bases concentrées.

- 5° Les résultats obtenus à l'aide des tables de Mac Crady étaient anormalement élevés puisque dans certains cas le nombre de germes fer-réducteurs était supérieur au nombre total de germes anaérobies.

Tableau 19 - Germes Fer-réducteurs

Date	Profil	Echantillon	Profondeur	Humidité %	pH	Résultat
Juin 74	I	1	17/23 cm	10,7	4,10	19 000
"	I	3	23/24	13,4	4,12	trop élevé
"	I	4	40/45	12	4,26	"
"	I	5	49/53	11,5	4,12	"
"	II	6	6,5	17,7	5,25	"
"	II	7	10	20	5,00	"
"	II	8	27/30	25,4	4,55	"
"	II	9	47	23,1	5,70	"

L'analyse à la même époque des échantillons 10 du profil III et 12,13 pour le profil IV a donné elle aussi des résultats trop grands. Les résultats du tableau 19 sont donnés en bactéries par gramme de terre sèche.

- 6° Nous avons pu observer occasionnellement la coloration des témoins blancs du dosage, où la terre était remplacée par de l'eau pure. Il semble donc que cette eau pouvait contenir dès le départ des ions susceptibles de former un complexe rose avec la dipyridyl.

On peut conclure que cette technique ne permet pas de doser quantitativement l'activité réductrice des bactéries par rapport à la réduction purement chimique. Tout au plus permet-elle de mettre en évidence l'existence dans le sol de germes réducteurs sans qu'il soit possible de les dénombrer fidèlement.

H) CONCLUSIONS

Notre étude microbiologique a été très incomplète parce que nous n'avons pas analysé les champignons ni les Actinomycètes et que nous avons délaissé l'analyse des horizons organiques superficiels, parce que nous n'avons pas envisagé le spectre bactérien des terres et enfin parce que nous nous sommes limité à un nombre restreint d'échantillons. En outre la profondeur des échantillons retenus était un facteur inhibiteur de poids vis à vis de la microflore, car elle est responsable d'une compaction et d'un appauvrissement en substances métabolisables qui sont néfastes.

Lorsque de semblables analyses peuvent être réalisées avec des échantillons plus superficiels il est vraisemblable que les différences entre les divers échantillons sont plus significatifs et la spécificité des flores plus nette.

Quoique les résultats concernant les bactéries fer-réductrices soient difficilement exploitables on peut penser que le milieu est favorable à leur développement surtout dans les horizons où l'on a pu doser l'ion Fe^{++} .

La pauvreté en sulfato-réducteurs - Takai et Kamura (1966) en dénombraient entre 150 000 et 1 000 000 par gramme de sol dans le cas des rizières - témoigne de conditions insuffisamment réductrices

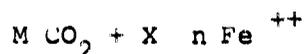
pour justifier leur développement. Tous les sols étudiés se trouveraient donc à un stade de décomposition aérobie à semi-anaérobie; le premier stade décrit par les Japonais.

NOTA : la température des sols de Saint-Amand n'a rien de comparable avec celle des sols de rizière au Japon. A Saint-Amand les températures assez basses dans l'ensemble ont un caractère inhibiteur certain vis à vis de la microflore et dont il faut tenir compte dans l'interprétation des analyses.

En ce qui concerne le problème de la part bactérienne comparée à la part chimique dans la réduction du fer, nous avons échoué dans la mise au point d'une technique quantitative de dosage individuel de l'une et l'autre.

Certains ont affirmé que la végétation jouait un rôle essentiel dans la réduction du fer, d'autres ont prétendu que les bactéries pouvaient jouer un rôle important mais qu'elles n'intervenaient pas directement faute de pouvoir utiliser l'oxygène des oxydes ferriques (Bromfield, 1954), d'autres enfin prétendent que les bactéries ont une importance primordiale dans ce processus (Takai et Kamura, 1966).

Ces derniers ont constaté une accumulation très faible de fer ferreux dans des échantillons stérilisés mais enrichis en produits du métabolisme bactérien à fort pouvoir réducteur, par rapport à celle qui avait lieu dans les mêmes sols non stérilisés. Selon ces auteurs, les bactéries pourraient intervenir directement dans la réduction du fer car cette dernière s'accompagne toujours d'une dégradation de matière organique. Ils décrivent le phénomène comme suit:



En même temps que le fer est réduit, une substance organique est oxydée. Nous rejoignons ce que nous avons dit plus haut: le fer ferrique serait utilisé comme accepteur final des électrons, lors de l'oxydation de substrats organiques.

Néanmoins il reste difficile de comparer une réduction bactérienne avec une réduction non bactérienne principalement à cause du facteur temps.

Les végétaux, les facteurs physico-chimiques, les bactéries interviennent simultanément et leurs actions sont dépendantes les unes des autres. En fonction du contexte climatique les uns ou les autres peuvent devenir prépondérants.

Les bactéries ont un rôle accélérateur mais ne peuvent intervenir seules car elles-mêmes requièrent un milieu favorable à leur développement et qui en général est lui-même propice à la réduction du fer.

Si dans les sols les facteurs physico-chimiques sont peu sensibles aux variations de température, les bactéries par contre sont fortement influencées par elles. Nous en avons d'ailleurs fait l'observation en incubant des cultures bactériennes en présence du milieu de Bromfield, à la température de 6°. Dans ces conditions nous avons constaté la formation des gomes qui caractérisaient les échantillons stériles. La réduction du fer était fortement inhibée. Par contre, un sol stérile placé à 28° ne subira pas d'influence notable de la part du facteur température alors que la microflore sera nettement favorisée.

Notons enfin que l'emploi de la phénanthroline plus stable que la dipyridyl, devrait offrir la possibilité d'une conservation de témoins colorés et qui permettrait de suivre l'évolution de la coloration sous l'influence des seuls facteurs chimiques.

C H A P I T R E V I

CONCLUSIONS

Les sols étudiés, nous l'avons vu, sont des sols forestiers acides; sableux pour les profils I, II et V, limoneux pour le profil IV, argilo-sableux pour le profil III.

Du point de vue systématique, ils s'apparentent à un pseudogley pour le profil I, à des stagnogleys pour les profils II et V, avec une tendance au gley pour le profil II à cause de son pH faiblement acide en profondeur, à un pélosol pseudogley pour le profil IV, à un sol brun forestier acide et lessivé pour le profil III de référence.

L'engorgement hydrique est toujours dû à une nappe perchée temporaire ou permanente jamais à la nappe phréatique plus profonde.

La formation de cette nappe perchée est régie par un défaut de porosité à un certain niveau généralement à profondeur moyenne dans les profils I, II, V soit à cause d'une accumulation d'argile ayant migré dans le cas du profil I, soit par la présence de tourbe spongieuse mais aussi d'argile dans le profil II. Dans le profil IV, il s'agit d'une hydromorphie sans nappe due à un défaut de porosité général pour l'ensemble du profil.

La structure est dans l'ensemble mauvaise de par la pauvreté en argiles pour le profil I, en limons et argiles dans les profils II et V, en limons dans le profil III, en sables dans le profil IV. Il est vraisemblable que dans les profils à dominante sableuse, le mauvais état de la structure soit en partie lié également à la pauvreté en bases.

Un bon équilibre des diverses fractions granulométriques est, comme nous le voyons, nécessaire à l'édification d'une structure bonne et stable.

La carence en argile est responsable d'une impossibilité de formation des agrégats. Le défaut de limons donne lieu à des agrégats peu stables entre l'argile et le sable. Une pauvreté en sable donne lieu à la formation d'une boue plastique et collante imperméable.

Dans l'ensemble la structure est meilleure dans les horizons superficiels où l'argile s'associe aux matières humiques.

Le fer total présente des caractères de lessivage important. Dans le profil I à pseudogley on trouve concrétisé l'hypothèse de déferrisation de Plaisance (1965). Les taches décolorées correspondent à l'absence de fer plutôt qu'à la présence de fer ferreux.

Les teneurs en fer ferreux total sont toujours faibles. Il s'agirait essentiellement de l'hydroxyde ferreux, formé sur place et peu sensible au lessivage. Ces faibles teneurs sont à rapprocher de celles observées par Duchaufour et N'Guyen Kha (1969). Ces auteurs ont trouvé 0,20 à 0,27 % de fer ferreux total dans un sol à pseudogley, 0,27 à 0,80% dans un stagnogley, 0,43 à 1,05% dans un pélosol pseudogley.

Comme eux nous avons constaté la richesse relative en cette forme dans la partie superficielle du stagnogley.

D'autre part nous n'avons pu écarter avec certitude la possibilité d'une oxydation en cours d'expérience particulièrement lors du séchage des terres. Si les résultats obtenus par Duterage (1974, 1975) pour les glauconites sont reproductibles nous pensons que le fer II du sol est moins stable que celui des glauconites. Il nous semble donc qu'il serait nécessaire de rechercher pour l'analyse du fer II du sol une technique mieux adaptée et plus sûre.

L'ion Fe^{++} est toujours très faiblement présent comme on pouvait s'y attendre du fait des faibles teneurs en fer ferreux total. Sa distribution ne suit apparemment aucune loi dans les sols comportant des phases oxydantes. Elle est par contre plus significative dans les sols à caractère réducteur permanent et paraît y suivre les mêmes lois que la distribution des autres formes ferrugineuses présentes.

Le défaut d'analyse du fer libre nous permet difficilement de juger du degré d'altération des sols étudiés.

Les analyses microbiologiques ont révélé une pauvreté de la microflore bactérienne justifiée par la saturation en eau, le pH très acide, le potentiel rédox très réducteur, la pauvreté en éléments minéraux (bases en particulier) qui tendent à la mise en place d'une microflore spécifique et donc restreinte.

Le choix de quatre échantillons de profondeur voisine n'a pas permis de comparaisons fructueuses. Il est vraisemblable que la profondeur est en grande partie responsable de cet échec.

Les techniques habituelles d'une part et la localisa-

tion de l'hydromorphie en profondeur ne nous ont pas permis de comparer des échantillons plus superficiels. L'analyse systématique des flores totales aérobie et anaérobie pour les 16 échantillons requerrait un temps considérable dont nous ne disposions plus à l'époque où nous devions les entreprendre. En travaillant sur 4 prises d'essai par échantillon il nous aurait fallu ensemercer quelques 40 boîtes de Pétri par dilution soient 120 boîtes pour trois dilutions et près de 2000 boîtes pour les 16 échantillons, ceci pour la seule flore aérobie, auxquelles il aurait fallu ajouter autant de boîtes pour la flore totale anaérobie.

Du fait de la profondeur, les réactions de la microflore aux variations du milieu sont atténuées et les flores spécifiques sulfato-réductrice et fer-réductrice très réduites.

Ces flores spécifiques ayant pu être étudiées en milieu liquide dont la préparation est beaucoup moins longue que pour les milieux solides on a pu analyser un plus grand nombre d'échantillons. Tous reflètent une pauvreté de ces deux flores qui laisse supposer que le milieu est insuffisamment réducteur pour justifier leur développement.

Au vu de ces résultats on est tenté de conclure que les sols étudiés se trouvent tous au stade de décomposition aérobie à semi-anaérobie; le stade 1 de Takai et Kamura (1966).

Mais pour que notre conclusion soit la plus objective possible, il nous faut tenir compte des deux faits suivants :

1° La pauvreté des flores totales aérobie et anaérobie qui justifie la faiblesse des résultats obtenus pour les flores spécifiquement sulfato-réductrice et fer-réductrice rend ces derniers peu significatifs.

2° Dans le profil II en particulier, où l'on a pu doser des quantités faibles certes, mais appréciables de fer déplaçable, il est possible que l'on ait dépassé le stade 1 de Takai et Kamura. En effet, les conditions d'apparition de l'ion Fe^{++} sont voisines de la limite de stabilité de l'eau devant l'hydrogène et l'on a peut-être atteint le stade de formation d' H_2 .

L'échec que nous avons connu dans la mise au point d'une technique de dosage de l'activité réductrice des bactéries peut être justifié par le fait que si l'on veut doser quantitativement une activité quelconque d'origine microbienne le résultat n'aura de valeur que s'il est représentatif d'une grande population; ce qui n'était évidemment pas le cas dans les sols étudiés.

Takai et Kamura ont montré expérimentalement que des sols stériles réalisaient une réduction de l'hydrate ferrique nettement moindre que celle qui peut être observée dans le cas des mêmes sols non stériles. Cependant leurs résultats ont une portée limitée pour 3 raisons :

1° Le modèle de sol expérimental avait peu de liens avec la réalité comme le disent les auteurs eux-mêmes.

2° La cinétique chimique est très différente de la cinétique bactérienne.

3° Si la réduction physico-chimique du fer dans les conditions de basse pression/basse température est peu sensible aux variations de température, les bactéries par contre le sont très fortement.

Enfin les sols étudiés par Takai et Kamura étaient des sols chauds et la température lorsqu'elle est élevée joue un rôle déterminant dans l'installation et le développement des flores bactériennes.

Nous pensons que s'il est vrai que les bactéries peuvent accélérer le phénomène de la réduction, elles n'interviennent jamais seules et ne sont jamais responsables du déclenchement du processus réducteur.

Les bactéries, les végétaux et les facteurs physico-chimiques interviennent simultanément et sont dépendants les uns des autres dans leurs actions. Les bactéries requièrent un milieu propre à leur croissance. Dans le cas des bactéries fer-réductrices ce milieu est lui-même favorable à la réduction non bactérienne du fer.

Les sols étudiés, pauvres en fer divalent et en bactéries ne nous ont pas permis de dresser la fiche de l'hydromorphie que nous souhaitions réaliser. Ceci est dû principalement à l'inadaptation des techniques.

Un tel but ne pourra être atteint tant que l'on n'aura pas trouvé des techniques permettant d'étudier ce type de sols avec la même précision que pour des sols sains, qu'ils soient cultivés ou non. Ces techniques supposent en particulier que l'on puisse doser avec sûreté le fer ferreux total, et que l'on connaisse un peu mieux le spectre bactérien de ces sols.

BIBLIOGRAPHIE

- AARNIO Cité par BARBIER (BARBIER G. Ann. Agr. 1938, 8, 34)
- ALLISON et SCARSETH
 Cité par SEGALEN. (SEGALEN P. Le fer dans les sols
 1964 ORSTOM.
- ARDEN T.V. The solubility products of ferrous and ferrosic hydroxides. J. Chem. Soc. 1950, 1, 882-885.
- AUBERT G. Méthodes d'analyse des sols - CRDP - Marseille.
- BARBIER G. Conditions et modalités de fixation de l'hydrate de fer colloïdal par l'argile du sol. Ann. Agr. 1938 8, 34.
- BASS-BECKING G.M., MOORE D.
 The relation between iron and organic matter in sediments. J. Séd.Pétr. 1959, 29, 3, 454-8.
- BECKER M. Etude des relations sol-végétation en conditions d'hydromorphie, dans une forêt de la plaine lorraine. 1971 - Thèse, Nancy.
- BETREMIEUX R. Cité par Turc - TURC L. Ann. Agr. 1951 p 193-195.
- BETREMIEUX R. Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols.
- BEZIER D. Etude électrochimique de la stabilité de quelques complexes ferriques. J. Chim. Phys. 1944, 41, 125.
- BILLY Introduction à la chimie analytique - CBBG-PC. DUNOD 1968.
- BLONDEAU R., SOUMARE S.
 Caractéristiques microbiologiques des sols de la région nord de la France. Ann. Inst. Pasteur 1972, 123, 239
- BLOOMFIELD C. The possible significance of polyphenols in soil formation. J. Sc. Food Agr. 1957, B, 383-392.
- BLOOMFIELD C. Some observations on gleying. J. Soil Sci. 1950, I, 2, 205-211.
- BLUMEL F. Formen der Eisen oxydhydrat Ausscheidungen in Gleyen und Pseudogleyen. Zeit. Pflanz. Düng. und Bodenk. 1962, 258-264.
- BROMFIELD S.M. Reduction of ferric compounds by soil bacteria. J. Gen. Microbiol. 1954, II, 1-6.

- BROMFIELD S.M. The reduction of iron by bacteria.
J. Soil Sci. 1954,5,123-139.
- BROWN G. A qualitative study of some gleyed soils from North
West England. J. Soil Sci. 1954,5,I,143-145.
- CALLAME B., DUPUIS J.
Recherches sur la dynamique du fer dans les forma-
tions littorales et les sols de prés salés.
Sci. du Sol. 1972,2,33-60.
- CAPOCHICHI A.E. Influence des plantations de résineux sur substrat
sablonneux. (Etudes faites en forêts de Saint-
Amand et Mormal) 1969, DES LILLE.
- CARROLL D. Role of clay minerals in the transportation of iron.
Geoch. Cosmoch. Acta 1958,14,1-28.
Carte géologique de la France au 1/50 000°.
B.R.G.M. 1973, Feuille Saint-Amand-Mons-Crespin.
Carte géologique de la France au 1/80 000°
B.R.G.M. 3ème édition Lille 1968 - Feuille Douai.
Carte du Parc Naturel Régional de Saint-Amand/Rais-
mes au 1/25 000°.
- CHARLOT G. Dosage colorimétrique des éléments minéraux.
2ème édition 1961, MASSON Editeur PARIS.
- CLARK J.S., GOBIN C.A., SPROUT P.N.
Yellow mottles in some poorly drained soils of the
lower Fraser Valley. (Brit. Columbia)
Can. J. Soil Sci. 1961,41-2,218-227.
- MOUVIER, MARTIN Cours CBBG - Paris 1969 (Polycopié).
- DEMOLON A. Principes d'agronomie. (I. la dynamique du sol)
DUNOD Edit. PARIS 1952.
- DEMOLON A., BASTISSE E.M.
Observations sur la géochimie du fer.
C.R.A.Agr. 1944,30,501-2.
- DOMMARGUES Y., MANGENOT F.
Ecologie microbienne des sols. MASSON Edit. Paris
1970.
- DUCHAUFOR Ph. Note sur le rôle du fer dans les complexes argilo-
humiques. C.R.A.S. 1963,256,12,2657-61.
- DUCHAUFOR Ph. Précis de pédologie. MASSON Edit. Paris 1970.

DUCHAUFOR Ph., N° GUYEN KHA

Note sur l'état du fer dans les sols hydromorphes.
Sci. du Sol 1969, 1, 96-110.

FORTUNE W.B., MELLON M.G.

Determination of iron with o-phenanthroline.
Ind. Eng. Chem. Anal. Edit. 1938, 10, 60-64.

GARRELS R.M., CHRIST C.L.

Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses.
Gauthier-Villars - Edit. Paris 1967.

HALVORSON H.O., STARKEY R.L.

Studies on the transformation of iron in nature.
I. Theoretical considerations. J. Phys. Chem.
1927, 31, 626-631.
II. Concerning the importance of microorganisms in
the solution of iron. SOIL Sci. 1927, 24, 381.

HARDELIN J.L.

DEA LILLE (Communication de M. L. Durin)

HARDER E.C.

Iron depositing bacteria and their geologic rela-
tions. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper n° 113 (1919)

HEM J.D., CROPPER W.M.

Survey of ferrous ferric chemical equilibria and
redox potentials. U.S. Geol. Surv. Water Supply
Paper, 1959, 1453, A, 1-31.

HEM J.D.

Restraints on dissolved ferrous iron imposed by
bicarbonate, redox potential and pH.
U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1960, 1459, B,
35-55.

IGNATIEFF V.

Method for determining ferrous iron in soil solu-
tions and a study of the effect of light on the re-
duction of iron by citrate and 2-2' dipyridyl.
J. Soc. Chem. Indust. 1937, 56, 407-410.

JAMAGNE M.

Bases et techniques d'une cartographie des sols.
Ann. Agr. 1967, volume 18, n° spécial.

JEFFERY J.W.O.

Iron and the Eh of water logged soils with particu-
lar reference to paddy.
J; Soil Sci. 1960, 11, 1, 140-148.

KOLTHOF I.N., SANDELI E.B.

Textbook of quantitative inorganic analysis.
The Mac Millan Company Edit. New York. 1959.

- KRAUSKOPF K.B. Introduction to geochemistry.
The Mac Graw Hill Company Edit. New York. 1967.
- LEENHEER (L de) Bull. Inst. Agr. Gembloux 1958, 26, 1 et 3 p 13-65.
- LEVY G. Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous résineux et sous feuillus. Ann. Sci. For. 1969, 26, 1, 65-79.
- LOSSAINT P. Etude expérimentale de la mobilisation du fer dans les sols sous l'influence de litières forestières. Ann. Agr. 1959, 363-414, 493-542.
- MATTSON S. The laws of colloidal behavior : III Isoelectric precipitates. Soil Sci. 1930, 31, 57-77.
- MATTSON S., CSIKY S.S.
The laws of colloidal behavior: XVI The cation-exchange maximum in alumino-silicates. Soil Sci. 1934, 39, 161-165.
- MERIAUX S. Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. 1953 Thèse - INRA.
- PLAISANCE G. Les sols à marbrures de la forêt de Chaux. Ann. Sci. For. 1965, 22, 4, 437-680.
- POCHON , TARDIEUX P.
Manuel technique d'analyse microbiologique du sol. MASSON et Cie Edit. Paris 1954.
- QUISPEL A. Measurement of oxidation-reduction potentials of normal and inundated soils. Soils Sci. 1947, 63, 4, 265-276.
- RIGHI D. Aspects morphologiques et physico-chimiques de la podzolisation en forêt de Rambouillet. Thèse Orsay, 1969.
- ROBERTS J.L. Reduction of ferric hydroxide by strains of Bacillus polymyxa. Soil Sci. 1947, 63-2, 135-140.
- SAYWELL L.G., CUNNINGHAM B.B.
Determination of iron, colorimetric o-phenanthroline method. Ind Eng. Chem. Anal. Ed. 1937, 9, 67-69.
- SCHAEFFER R. Thèse Orsay, 1967. Rev. Ecol. Biol. du sol. 1967, 4 (3), p 385-437, et (4) p 567-592.
- SEGALEN P. Le fer dans les sols. Orstom, 1964.
- SOUMARE S. DEA Lille
- SWENSON K.M., COLE C.V., SIELING D.H.
Fixation of phosphate by iron and aluminium and replacement by organic and inorganic matter. Soil Sci. 1949, 67, 3-22.

- TAMM O. Om bestämning Av de Oorganiska komponenterna i markens gelkomplex. Medd. Fr. Stat. Skogsf. Stockholm, 1922, 19, 385.
- TAKAI Y, KAMURA T. The mechanism of reduction in water-logged paddy soil. Fol. Mic. 1966, II, 304-313.
- TURC L. Influence de la fermentation d'une litière végétale sur la dynamique du fer dans un sol en place. C.R.A.S. 1958, 247, 1639-42.
- WAKSMAN S.A., STEVENS K.R. Contribution to the chemical composition of peat: V the role of microorganisms in peat formation and decomposition. Soil Sci. 1929, XXVIII, N° 4, 315.
- WALKER S.L., SHERMAN G.D. Determination of total ferrous iron in soils. Soil Sci. 1962, 33, 5, 325-8.

