

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

Direction des Ressources en Eau et en Sol

DIVISION DES SOLS

**OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE - MER**

MISSION TUNISIE

"EFFETS DE LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LES SOLS A EXCES D'EAU"

APPLICATION AUX SOLS FORESTIERS DU NORD DE LA TUNISIE

(Convention O.R.S.T.O.M. - D.R.E.S. B₂)

Note n° 1

E - S 95

J. Y. LOYER, Pédologue ORSTOM
et
J SUSINI, Chimiste ORSTOM

(Février 1975)

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOLS
DIVISION DES SOLS

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE-MER

MISSION TUNISIE

"EFFETS DE LA DYNAMIQUE DE L'EAU
DANS LES SOLS A EXCES D'EAU"

ES - 95

- Application aux sols forestiers du Nord de la Tunisie -

(Convention ORSTOM - DRES B₂)

- Note N° 1 -

J.Y. LOYER, Pédologue ORSTOM

et

J. SUSINI, Chimiste ORSTOM

(Février 1975)

AVANT-PROPOS

Cette étude répond à une demande exprimée par le Ministère de l'Agriculture Tunisien concernant l'étude de l'hydromorphie (Convention ORSTOM/DRES-Tunis). Cette requête est motivée par le fait que de nombreux échecs ont été constatés dans les reboisements effectués en Tunisie septentrionale depuis quelques dizaines d'années. Si, de l'avis des spécialistes forestiers, certaines causes d'échecs sont à attribuer à la technique de plantation ou au choix de l'espèce, une autre non moins importante accuse le milieu et en particulier l'hydromorphie des sols.

La présente note a pour but :

- d'une part de faire le point de nos connaissances acquises sur les sols forestiers du Nord après deux années de cartographie à but agronomique (DELHUMEAU LOYER) effectuée à différentes échelles (1/25 000, 1/50 000 et 1/200 000 pour projets sylvo-pastoraux et planification), et après une première année de mesures expérimentales réalisées sur ces sols dans le cadre du Bassin-Versant de l'Oued Sidi Ben Nasseur;

- d'autre part de présenter le programme des mesures envisagées pour l'année 1975, et qui doivent permettre de suivre la dynamique saisonnière de ces principaux paramètres par une étude systématique de leurs variations dans l'espace et dans le temps.

Il s'agit donc seulement d'une première présentation des différents paramètres qui caractérisent le mieux le processus d'hydromorphie et dont la mesure de certains demande à être affinée. La synthèse finale des résultats qui sera faite ultérieurement devrait permettre de tirer un certain nombre d'enseignements pour la mise en valeur forestière de ces sols.

Les travaux présentés dans cette note sont le fait d'un travail mené par la collaboration de plusieurs personnes M. DELHUMEAU - Mme NAANAA - M. ROUGIER, et les agents techniques du Bassin-Versant de l'Oued Sidi Ben Nasseur.

I - INTRODUCTION : PRINCIPAUX CARACTERES DU MILIEU NATUREL

Les éléments du milieu naturel de la Tunisie septentrionale étudiés depuis longtemps par les Phyto-écologues, les Forestiers, les Pédologues sont assez bien connus.

Le secteur géographique concerné par cette étude couvre environ 2 000 km²; il est composé des deux unités régionales naturelles des Mogods et de la Kroumirie, originales à de nombreux égards par rapport au reste de la Tunisie (cf. Plan de situation page 3).

Climatiquement la région considérée est la plus arrosée du pays ; les moyennes annuelles varient de 800 à 1 500 mm avec un gradient altitudinal surtout sensible en Kroumirie où les reliefs avoisinent 1 000 m, les Mogods présentant des modelés plus doux dûs en partie à la nature des roches : la lithologie des deux régions est faite d'une alternance de grès et d'argiles acides du flysch oligocène avec une dominance gréseuse en Kroumirie et argileuse dans les Mogods. Quelques pointements triasiques affleurent dans la partie Ouest et les formations sableuses éoliennes affectent plus ou moins profondément la zone côtière (dunes et recouvrements). Les zones de plaine sont d'extension limitée (O. Sedjenane - Meknas - Tabarka), cultivées, elles ne présentent pas d'intérêt dans le cadre de cette étude.

Du point de vue bioclimatique la totalité de la région appartient à l'étage méditerranéen humide inférieur (classification Emberger) avec une variante à hiver doux limitée à la frange côtière et aux Mogods et une variante à hivers tempérés sur les reliefs de Kroumirie, ce qui du point de vue végétation naturelle correspond à la série du chêne liège, avec des variations dues à l'altitude ou la proximité de la mer mais surtout à des faciès de dégradation très accentués principalement dans les Mogods où le chêne-liège a pratiquement disparu remplacé par un maquis lui-même en voie de dégradation intense sous l'influence anthropique (charbonnage - surpâturage).

II - PRINCIPAUX TYPES DE MANIFESTATIONS HYDROMORPHES DANS LES SOLS

Les sols représentatifs de la région ont fait l'objet de descriptions détaillées dans le cadre des études antérieures à but agronomique. Nous nous limiterons ici à une présentation des trois principaux processus hydromorphes rencontrés au sein des profils ou des séquences de sols et qui sont liés au départ à trois types de matériaux originels :

- Hydromorphie par nappe au sein de sables acides : sols podzoliques de nappe.
- Hydromorphie par nappe perchée au sein de colluvions argilo-gréseuses acides : pseudogley.
- Hydromorphie par engorgement d'argiles calcaires, sans nappe : sols de type vertique.

II.1. - HYDROMORPHIE DE TYPE PODZOLIQUE DE NAPPE

En Mogods et Kroumirie les sables occupent de larges étendues en particulier sur la frange côtière, mais s'avancant parfois jusqu'à 20 km à l'intérieur des terres. Ces accumulations d'origine éolienne sont d'âges très variés : la plus ancienne, d'âge Thyrrénien étant consolidée et calcaire et constituée de débris coquilliers ; les plus récentes encore en formation actuellement, sont constituées de sables acides dont la morphologie revêt deux aspects principaux :

- soit des placages peu épais qui envoient toutes sortes de matériaux plus anciens (dune Thyrrénienne ou argiles et grès de l'Oligocène).
- soit des dunes puissantes, séparées par des espaces interdunaires sableux sur une grande profondeur.

Sous les conditions climatiques de la région, ces deux types d'accumulations sableuses sont affectés de deux façons différentes par les nappes selon leur épaisseur et leur position topographique :

- . soit une nappe perchée circulant latéralement dans les placages sableux lorsqu'ils reposent sur un substrat peu perméable (horizon argileux issu des argiles de l'Oligocène) créant une discontinuité granulométrique très brutale.

- . soit par une nappe plus profonde à battements saisonniers, affectant les espaces interdunaires sableux (sables à nappe).

II.1.1. -- Hydromorphie par nappe perchée pluviale (profil type FPS 1 pages 6 et 7 Ferme pilote de Sedjenane)

Une nappe d'origine pluviale se forme au contact du placage sableux de surface et d'un matériau sous jacent imperméable. De nombreuses morphologies de profils ont été observées suivant l'épaisseur du recouvrement et les conditions topographiques déterminant un engorgement plus ou moins superficiel par la nappe et un écoulement latéral rapide des eaux, ou une infiltration verticale lente. Les caractères les plus constants de ces profils sont :

- la présence d'un horizon blanchi au-dessus du plancher imperméable. Cet horizon est soit uniformément blanchi, soit marqué de taches ferrugineuses ocres, soit même parsemé de concrétions Ferromanganiques dans les cas extrêmes d'évolution hydromorphe à caractère podzolique (pseudogley podzolique).
- une limite entre les deux matériaux de type planosolique, déterminée par une discontinuité granulométrique tranchée.
- une marmorisation profonde très marquée, réticulée, du matériau sous-jacent très compact, qui en topographie subhorizontale est affecté de langues blanches verticales déferrifiées (horizon glossique) correspondant à une infiltration préférentielle des eaux de surface. Cet horizon sous-jacent est généralement enrichi en argile et correspond à un ancien horizon B textural de sol lessivé plus ou moins colmaté (profil type FPS. 1).

L'évolution de ces sols brunifiés vers les sols hydromorphes est probablement conditionnée par la déforestation qui affecte gravement ces régions, aboutissant au remplacement du chêne-liège et du maquis par la prairie, déclenchant une érosion superficielle et une remontée relative de l'horizon imperméable, et apportant d'importantes modifications du bilan hydrique de ces sols (ETP).

La chrono-séquence de dégradation consécutive à ce phénomène est la suivante :


- sol brun lessivé ou sol lessivé (vertical ou oblique) à mull
- sol lessivé hydromorphe dégradé
- sol hydromorphe à pseudogley - marmorisé
- à tendance podzolique, à concrétions.

DESCRIPTION DU PROFIL

GROUPE SOUS-GROUPE Famille Série	Sol lessivé dégradé Hydromorphe sur sables et argiles faciès glossique.
---	--

PROFIL FPS.1-Parcelle 3.	
LOYER TUNIS 22-6-73.	

Ferme pilote-Sedjona

Croquis du profil	Prélèvements numéro du sac	Profondeur en cm et nomenclature des horizons	
		0 - 5	Horizon brun homogène, peu humifère - sableux - sec, friable - structure particulière - très poreux - abondant chevelu racinaire - non calcaire - limite nette et régulière.
	Allp	5 - 25	Horizon grisâtre imprégné de matière organique par taches-sableux, particulière - quelques fines taches de pseudogley jaunâtre (2 à 3 %) - chevelu racinaire - limite distincte et régulière.
	A2g	25 - 50	Horizon gris très clair, nettement blanchi, avec taches ocracées (5 %) et concrétions Fe Mn, petites, friables - structure particulière - racines - sableux - limite très distincte et régulière.
	A2/Bg	50 - 60	Horizon gris légèrement brunâtre - horizon de transition-sableux - abondantes concrétions Fe Mn et taches de pseudogley - structure particulière poreux - pas de racine - transition nette et régulière.
	II Btg 21	60 - 90	Horizon brunâtre, enrichi en matière organique et argile ocre rouille - argilo sableux - tendance polyédrique mal définie - peu poreux.
	II Btg 22	90 - 160	Passage progressif - horizon plus sableux - sablo limoneux très bariolé ocre rouille et traînées verticales de pénétration de matière organique - assez compact - structure massive à éclats - poreux finement. (apparenté fragipan)
	II Bg(x)	< 160	Passage à un horizon bariolé avec langues verticales blanchâtres - poreux - sablo-limoneux.
III B/Cg			

Moisture content: 1.03

II.1.2. - Hydromorphie des sables à nappe profonde

Dans les espaces interdunaires dépressionnaires proches du littoral (Mouaden - Cap Serrat - Nefza), où les sables peuvent atteindre une grande épaisseur (>3 m), la nappe phréatique acide présente dans ces matériaux très filtrants, d'amples oscillations saisonnières avec phases d'engorgement et de dessiccation.

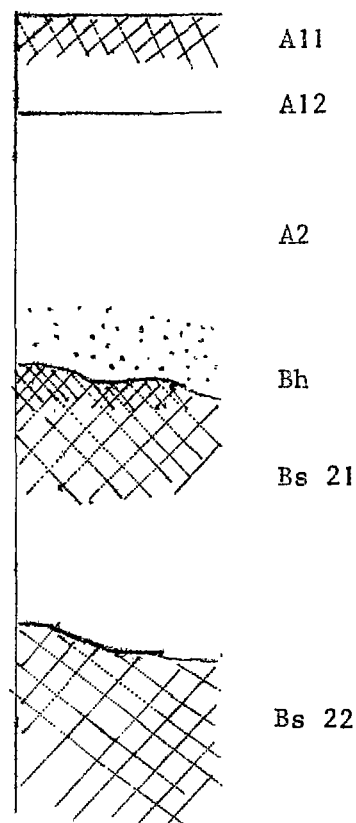
Le fer à l'état ferreux libéré par la nappe acide et transporté, précipite massivement à l'état ferrique, dans la zone de dessèchement relatif, sous des formes variées selon les conditions locales : le plus fréquemment sous forme d'un horizon continu ocre rouille moyennement induré (parfois très induré) proche d'un alios et contenant toujours de gros rognons irréguliers plus bruns ferromanganiques (horizon Bs). Plusieurs niveaux d'accumulations ferrugineuses superposées ont été parfois observés dans les profils et correspondent à un abaissement du niveau des nappes.

La partie supérieure de cet horizon Bs est parfois bordée d'une frange plus sombre correspondant à une accumulation de matière organique (horizon Bh). Cet horizon n'est pas toujours présent (cf. schéma ci-dessous).

Au-dessus de l'horizon d'accumulation (humu)-ferrugineux, il s'est parfois différencié un horizon d'appauvrissement A₂ qui tend à prouver que ces profils ont subi une phase initiale de lessivage de l'argile et du fer grâce au caractère très filtrant du matériau, et aux conditions de pH. Cet horizon A₂ nettement éclairci, blanchâtre est parfois taché d'une fine marmorisation liée aux remontées de la nappe actuelle.

II.1.3. - Interprétation

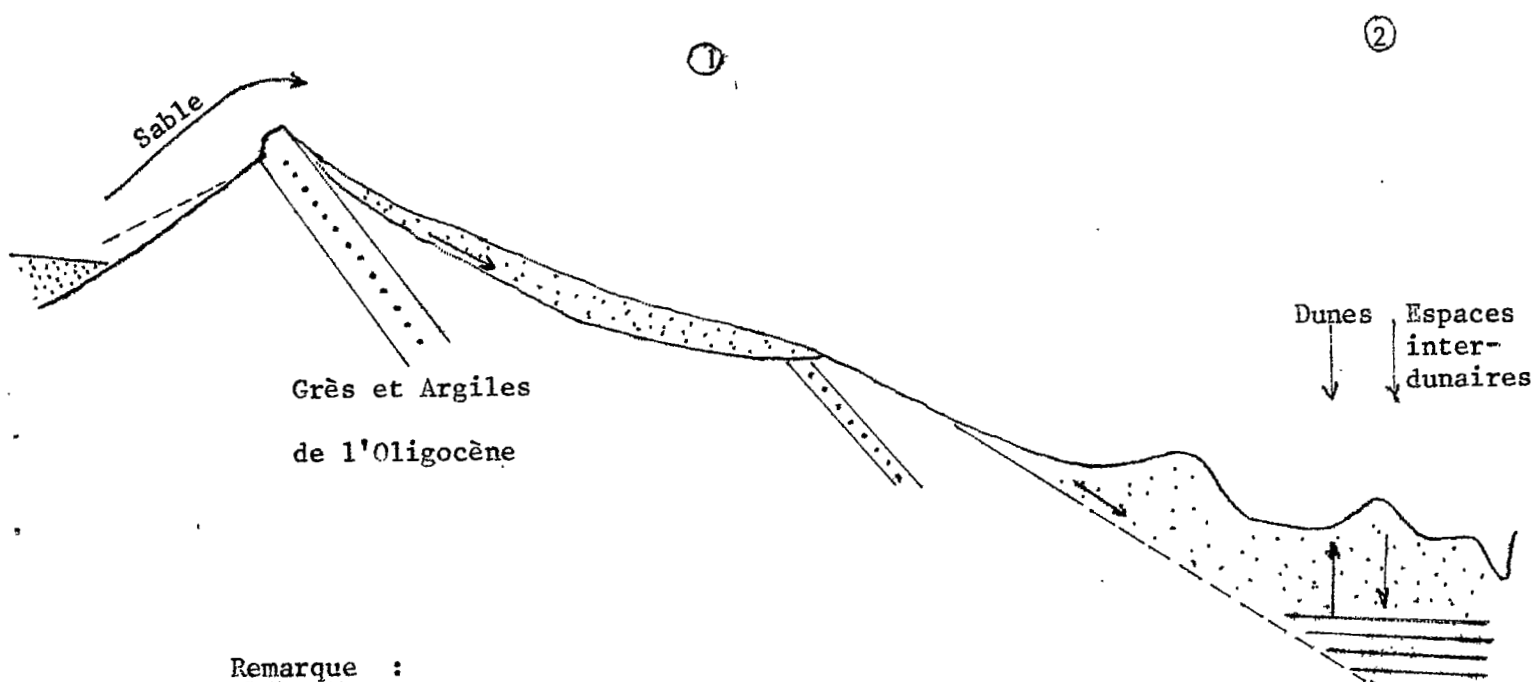
Les sols lessivés dégradés hydromorphes à nappe perchée (II.1.1.) et les sols podzoliques de nappe (II.1.2) sont liés génétiquement et constituent une véritable chaîne de sols (cf. schéma p. 9) :



- Les premiers ① se différencient sur les versants en pente et sont sous des conditions favorables à la mobilisation du Fer, du manganèse et probablement de matière organique, (nappe latérale circulant rapidement sur un plancher

argileux, pH acide, et phases de réduction temporaire). Les profils sont peu épais, les horizons éluviaux marqués, les horizons d'accumulation peu marqués et toujours discontinus (taches - petites concrétions), imprégnant plus ou moins des horizons anciens, polycycliques.

- Les seconds ②, toujours différenciés à l'aval dans les zones à topographie plus douce (avec épuisement latéral lent des nappes ou seulement vertical) constituent des zones d'accumulation des éléments mobilisés, dont les niveaux de précipitation relatifs du fer, du manganèse et de la matière organique seraient à étudier finement.



Remarque :

Les manifestations hydromorphes des sables à nappe ne sont pas considérées comme un facteur limitant majeur pour les plantations forestières ; ces matériaux offrent même de bonnes potentialités à condition d'adapter les espèces et de contrôler le niveau du plan d'eau.

Par contre les manifestations liées à la superposition des deux matériaux sableux et argileux sont généralement moins favorables et la potentialité dépend de l'épaisseur du matériau sus-jacent, et de la discontinuité granulométrique plus ou moins tranchée du sable et du substrat hydromorphe. Il faut souligner également le fait que le défrichement de ces sols pour la mise en culture ou le reboisement sans précaution est la principale cause de leur dégradation vers l'hydromorphie.

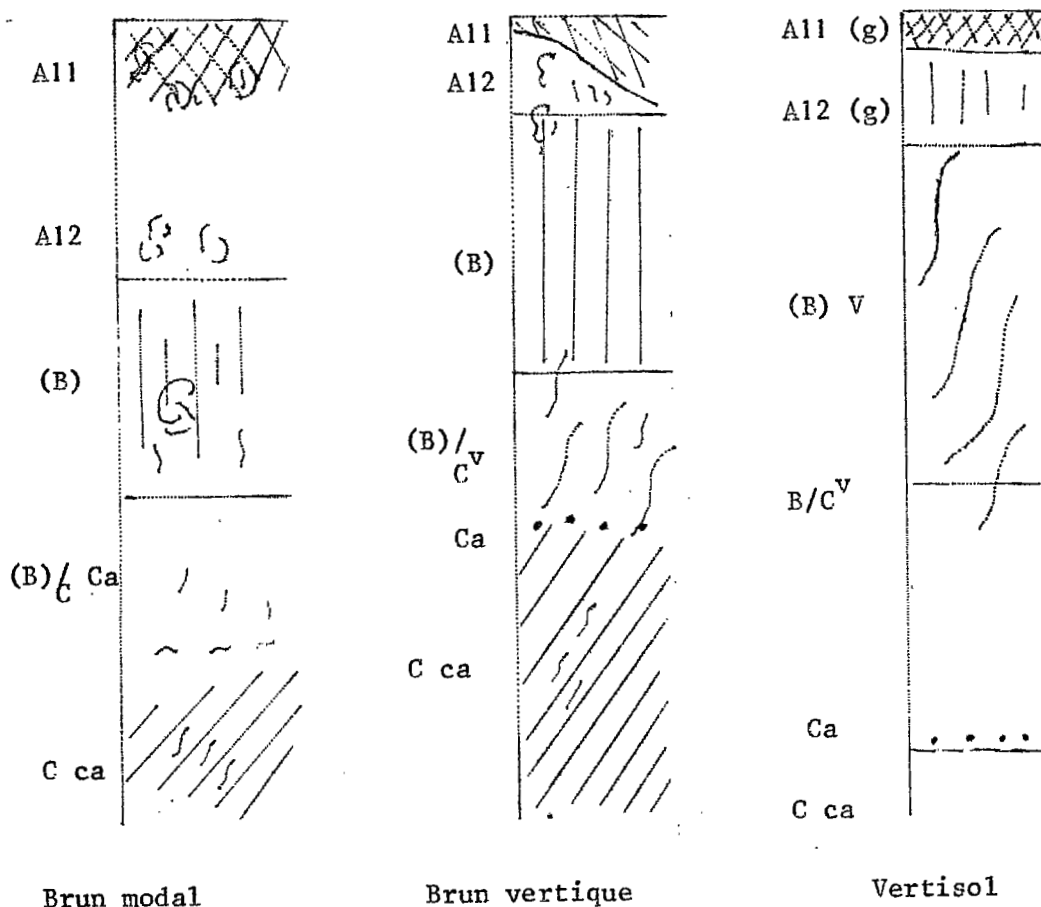
II.2. - HYDROMORPHIE DE TYPE VERTIQUE

Ce type de manifestation est lié à l'affleurement sur les versants d'argiles faiblement calcaires de la série oligocène dont la proportion de CaCO₃ total est inférieure à 10 % et qui sont largement dominantes par rapport aux grès et interstratifications argiles acides et grès dans la partie Est du flysch (Mogods) ; dans la partie ouest (Kroumirie), les grès et argiles acides étant mieux représentés.

Du point de vue occupation, ces matériaux sont, soit défrichés et couverts d'une prairie surpâturée, épisodiquement travaillée pour les cultures annuelles (céréales - fèves), soit encore occupés par un maquis à oléo-lentisques plus dégradé.

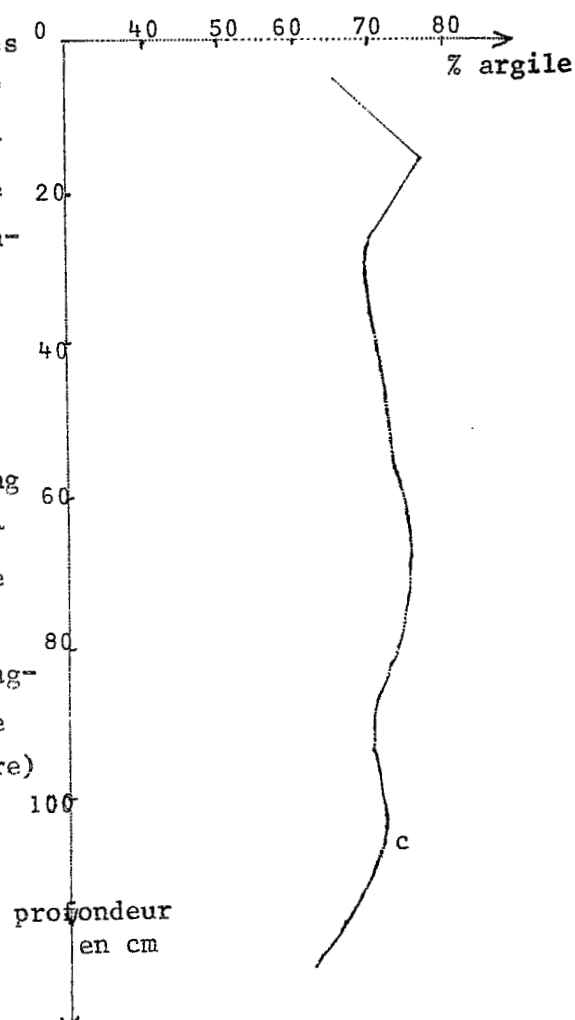
La séquence évolutive des sols sur ces matériaux peut-être ainsi reconstituée (cf. schéma page 11) :

- a) Sous végétation naturelle pas trop dégradée, lorsque la colluvion argilo-gréseuse est peu épaisse et même discontinue l'argile calcaire apparaissant à faible profondeur, se différencie un sol Brun modal à mull, décalcarifié, mais à complexe restant saturé en calcium, à pH légèrement supérieur à la neutralité (7 à 8), finement calcaire par points dans l'horizon d'altération. Ce sol climax en équilibre avec la végétation naturelle forestière est actuellement en voie d'évolution vers un faciès de dégradation de type Brun verticale consécutif à la surexploitation du maquis (érosion des horizons humifères, tassement et diminution de l'ETP sous maquis par rapport à la forêt).
- b) Le stade ultime d'évolution est atteint après défrichement pour la mise en culture de ces argiles. La disparition des horizons humifères, le remplacement du maquis arbustif par une strate herbacée à faible ETP, le piétinement par les troupeaux amène un tassement et une phase d'engorgement par les eaux pluviales de ces matériaux déjà très argileux (70 % d'argile) et gonflants, qui deviennent totalement imperméables ; il lui succède une phase de dessèchement intense en été, avec fissuration profonde et structuration très large. Les caractères du Vertisol sont plus ou moins accentués selon la position topographique.



II.2.1. - Principaux caractères morphologiques du sol vertique :
(profil type BVN.1, pages 12 et 13)

a) Le matériau originel argileux est très homogène; les rapports SF/LG et SG/SF sont très constants. Les profils présentent une courbe de distribution de l'argile très homogène avec la profondeur avec des taux très importants allant de 60 à 70 %. Un léger ventre d'argile peut affecter les horizons intermédiaires: il est probablement dû à un entraînement mécanique le long des fissures de retrait lors des premières pluies. La diminution d'argile souvent constatée en profondeur est due à une mauvaise dispersion des fragments d'argile géologique à l'analyse granulométrique. (cf. schéma ci-contre)



DESCRIPTION DU PROFIL

- 121 -

GROUPE SOUS-GROUPE Famille Série	Vertisol litomorphe à caractères moyennement accentués sur argiles finement calcaires.	PROFIL BVN.1 LOYER - TUNIS -11-10-73.
---	--	--

Croquis du profil	Prélèvements numéro du sac	Profondeur en cm et nomenclature des horizons	Description
	A11	0 - 10/15	Horizon brun olive (Munsell frais 10 YR 4/3) - moyennement humifère - très argileux - structure polyédrique moyenne nette - finement désagrégée en surface - peu friable - bon enracinement, racines fines bien réparties, saines - porosité d'agrégat très fine - volume intéragrégat faible, transition graduelle.
	A12	10/15-55/60	Horizon olive brunâtre (10 YR 3/4 - frais) - très argileux - structure polyédrique fine à moyenne bien développée - très fine sous-structure polyédrique et surstructure prismatique très large, avec fentes de retrait - non friable - ensemble compact - racines bien réparties - quelques cailloux grès, émoussés < 3% - porosité d'agrégats très fine - transition distincte.
	(B) _v	55-60 - 80	Horizon olive (10 YR 4/3 - frais) - fines tâches grisâtres et ocres mal définies - très argileux - structure très grossière à tendance prismatique avec faces gauchies obliques, peu lissées (pas très grandes et pas très abondantes) - sous-structure polyédrique moyenne - ensemble très compact - porosité d'agrégat très fine. - quelques cailloux émoussés (grès) < 3% - peu de racines - transition distincte.
	(B)/C _v	80 - 115	Horizon olive, légèrement marbré - structure à tendance polyédrique grossière mal définie avec quelques faces verticales - fragments d'argile en voie d'altération - petits granules calcaires - transition distincte.
	C	< 115	Horizon de fragmentation de l'argile en bancs subhorizontaux - gris bleuté avec des tâches blanches jaunâtres interstratifiées (calcaires), et passées ocres irrégulières fragmentation de plus en plus grossière de l'argile oligocène.

Fer libre DEB/Fer Total (Hcl) %	59	59	53	55	58
Si O2/Al ₂ O ₃	3	2,9	3	2,8	2,7
Si O ₂ /R ₂ O ₃	2,5	2,4	25	2,5	2,4
Matière organique totale 10 ⁻²	3,1	1,8	1,5	1,3	0,8
C/N	7,9	6,5	5,7	4,9	3,3
S	26	27	27	27	23
S/T = V %	81	85	87	83	-

- b) Le profil est décalcarifié jusqu'au matériau d'altération qui est finement calcaire par points, le matériau géologique semblant calcaire par strates. L'hydromorphie de ces sols se traduit par une légère remise en mouvement et précipitation localisée du CO_3Ca en profondeur sous forme de petits granules (contact B/C et C). La partie supérieure, à pH légèrement acide (6 à 7) étant très discrètement marmorisée ($A_{11}(g)$ et $A_{12}(g)$).
- c) La structure est de type polyédrique moyenne, s'élargissant progressivement en profondeur pour atteindre le stade verticale avec des faces gauchies, luisantes, obliques, dont la dimension et l'expression sont liées à l'épaisseur des profils au-dessus de l'argile et à la position topographique. Ces caractères verticaux sont moins bien définis que dans les Vertisols sur marnes des régions à saison sèche plus marquée, la période d'humectation plus longue dans le cas présent tendant à rapprocher ces sols des Pélosols de la classification allemande (Pélosol verticale).
- d) La couleur de fond des profils est uniforme, olive (planche 10 YR) plus ou moins foncé, sur l'ensemble du profil avec des traces de marmorisation sur les éléments de la structure.

II.2.2. - Principaux caractères analytiques

- a) Le pH très légèrement acide (6,5) dans l'horizon de surface augmente progressivement pour atteindre 8 dans le matériau originel. La différence pH eau - pH KCl est constante (voisine de une unité) sur tout le profil ce qui n'est pas le cas des sols à pseudogley.
- b) Le taux de saturation en bases est supérieur à 80 % avec une dominance du calcium échangeable dont le taux est toujours supérieur à celui du magnésium, (contrairement aux sols à pseudogley).
La capacité d'échange est de l'ordre de 30 méq. pour 100 g de sol, qui rapportée au taux d'argile correspond à une capacité d'échange d'argile de l'ordre de 40 à 50 méq. pour 100 g. d'argile.
- c) L'argile dominante est une Illite interstratifiée irrégulière dont la cristallisation est fonction des conditions locales et moins bonne de la profondeur vers la surface des profils. La faible cristallisation de cette Illite expliquerait les taux importants de potassium extrait à l'analyse triacide ($\text{K}^+ > 30$ méq/100 g. d'argile).

- d) La matière organique est de type mull presque saturé (pH 6,5), à C/N inférieur à 10 sous prairie, avec des taux de 2 à 3 % en surface tombant brutalement à un taux de 1 % qui se maintient constant assez profondément. Les acides humiques sont très polymérisés et le taux d'humification élevé est caractérisé par une nette dominance des acides humiques sur les acides fulviques et des AHG sur les AHB (AHG % de AHT > 60 %).

II.3. - HYDROMORPHIE DE TYPE PSEUDOGLEY DES ARGILES ET GRES

Ce type d'hydromorphie est très répandu dans le Nord de la Tunisie et particulièrement dans les Mogods où il est lié à la dégradation de la couverture végétale, celle-ci étant mieux conservée en Kroumirie.

Le matériau originel de la plupart des sols des deux régions considérées est constitué par les matériaux du Flysch Oligocène qui recouvrent les versants d'une nappe colluviale argilo-gréseuse plus ou moins épaisse, plus ou moins caillouteuse, au-dessus des argiles calcaires ; les grès formant relief.

La mise en place de cette nappe détritique s'est faite en plusieurs épisodes depuis la fin du Tertiaire, et les sols observés actuellement ont subi plusieurs pédogenèses successives qu'il est difficile d'interpréter actuellement:

II.3.1. - Evolution ancienne

Les nappes colluviales ont subi des conditions bioclimatiques diverses déclenchant des processus pédogenétiques variés dont le plus visible actuellement est une rubéfaction qui affecte les horizons intermédiaires des profils au-dessus de l'argile géologique. Les horizons de surface correspondant aux épandages les plus récents ne sont jamais rouges.

Les conditions favorables à cette rubéfaction sont prabablement un climat de type méditerranéen mais plus contrasté que l'actuel et qui a régné sur le Nord au quaternaire ancien ; des sols témoins rubéfiés ont été observés en Tunisie septentrionale sur toutes sortes de matériaux :

- sables dunaires anciens d'âge villafranchien (Cap Serrat - LE COCQ 1967 - LOYER 1973).
- hautes terrasses alluviales anciennes et fossilisées de l'Oued Sedjenane (DELHUMEAU - LOYER 1973)

- matériaux riches en fer de la région de Tamera (LE COCQ 1967 - DELHOUME 1975)
- trias de la région d'Aïn Draham et de Teskraïa (DIMANCHE - DELHUMEAU LOYER).
- Terra Rossa sur calcaire à la limite du flysch oligocène.

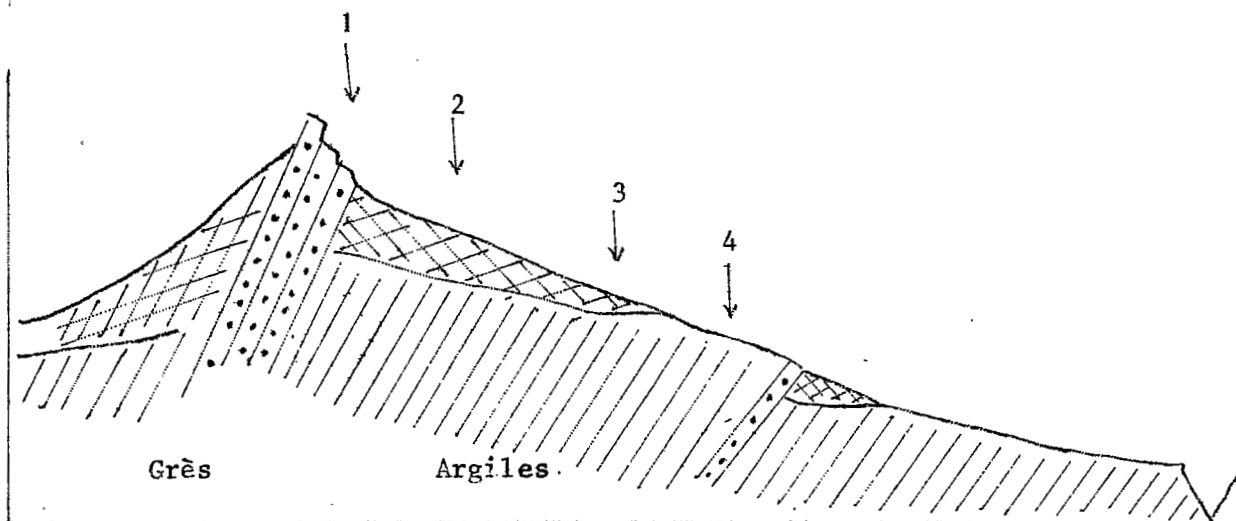
Les conditions de pH nécessaires à cette rubéfaction seraient supérieures à celles des profils actuels qui auraient subi depuis une phase d'acidification importante puisque leur pH descend jusqu'à 4,5 dans l'horizon rouge.

II.3.2. - Evolution actuelle

Sous les conditions climatiques actuelles, le sol type de la région est un sol Brun à mull caractéristique des pays tempérés et méditerranéens humides, et différencié dans les épandages détritiques au-dessus de l'argile. Deux séries de facteurs principaux interviennent dans son évolution :

- la position topographique
- les facteurs anthropiques.

a) Toposéquence type, non ou peu dégradée



La nature et l'épaisseur de la nappe colluviale sont fonction de la position sur le versant et plus particulièrement de la proximité du banc gréseux : En haut de versant le manteau détritique est grossier très caillouteux et épais au-dessus de l'argile ; il s'amincit et s'enrichit relativement en argile de haut en bas de la pente, quelques bancs gréseux intercalés peuvent apporter des irrégularités dans la

toposéquence qui peut comporter également des affleurements d'argile calcaire. Une toposéquence classique s'organise comme suit (cf. schéma page 16) :

- 1 - sur le banc gréseux, le sol Brun lessivé typique peut présenter dans les conditions les plus humides de Kroumirie une évolution légèrement podzolique sous l'effet de la matière organique (Moder à C/N > 20) et grâce à la nature très filtrante de la roche-mère.
- 2 - sol Brun plus ou moins lessivé obliquement sur colluvions gréso-argileuses (profil type BVN.E pages 18-19).
- 3 - sol Brun modal sur colluvions argilo-gréseuses.
- 4 - sol Brun hydromorphe à pseudogley sur argile colluvionnée.

b) Séquence de dégradation sous l'action des facteurs anthropiques

L'évolution et la conservation de la toposéquence précédente sont étroitement liées à la végétation naturelle (forêt à base de chêne-liège sur les sommets, maquis sur les versants), qui dans son état naturel lui assure une protection efficace.

L'abattage de la forêt par l'homme a dans un premier temps amené la disparition presque totale du chêne-liège dans les Mogods. L'exploitation inconsidérée du maquis secondaire par dessouchage pour la fabrication du charbon, puis le pâturage par les trop nombreux troupeaux caprins ont abouti à un faciès de dégradation accentué représenté par une strate basse à base de Ciste de Montpellier qui a remplacé les espèces ligneuses intéressantes : (Bruyère, Arbousier, Filaire, Lentisque).

Ces processus entraînent l'érosion des horizons humifères qui actuellement sont conservés seulement au pied des touffes de végétation, l'enrichissement relatif en éléments grossiers en surface, le tassement du sol, la remontée relative du matériau argileux et l'accentuation des manifestations hydromorphes. Les deux séquences de dégradation correspondant à des matériaux d'épandages plus ou moins argileux seraient les suivantes :

- Sur colluvions argilo-gréseuses

Brun lessivé obliquement - lessivé dégradé hydromorphe à pseudogley par nappe perchée (profil type BVN.E) - Hydromorphe à pseudogley (et gley de profondeur).

- Sur argiles acides

Brun modal - Brun acide - Brun hydromorphe - Hydromorphe à pseudogley.

DESCRIPTION DU PROFIL

GROUPE	Brun faiblement lessivé obliquement, dégradé hydromorphe à pseudogley sur colluvions complexes argilo-gréseuses rubéfiées. légèrement salé en profondeur
SOUS-GROUPE	
Famille	
Série	
Faciès	

PROFIL
BVN.E.
LOYER - TUNIS - 22-6-74

Croquis du profil	Prélèvements numéro du sac	Profondeur en cm et nomenclature des horizons	
	A11	0 - 10	Horizon brun - couleur hétérogène tâches plus brunes de matière organique mal décomposée - texture équilibrée - très bon enracinement - cailloux 10 % - très poreux - structure polyédrique émoussée à tendance nuciforme assez bien développée - fragile.
	A12	10-25/30	Horizon brunâtre, couleur hétérogène, blanchi par tâches irrégulières - texture équilibrée - caillouteux 10 % - très poreux (pores grossiers interagrégats) bon enracinement - structure à tendance polyédrique mal définie - plus cohérent - sain - limite nette.
	(A2)g	25/30-40/45	Horizon finement marbré ocre jaune éclairci - peu structuré - porosité plus fine cailloux idem - enracinement sub-horizontale - équilibré - consistance assez forte à sec - limite brutale.
	Btg	40/45-80	Horizon bariolé de fines tâches grises et ocres sur fond rougeâtre - légers revêtements argilo-humiques grisâtres dans la partie supérieure de l'horizon - argileux à très argileux - humide-plastique - structure polyédrique moyenne à sous-structure très fine - porosité très fine peu visible. cailloux 3 % - quelques racines manchonnées de gley.
	(B)gr	80-140	Horizon bariolé gris et rouge très hydromorphe - racines manchonnées de gley - mouillé, très-plastique - structure peu développée - tendance polyédrique avec quelques faces obliques lissées - compact. très argileux cailloux < 3 %.
	(B)gr	140-160	Horizon plus rouge moins gris moins hydromorphe - plus sec très argileux.
	B/C	< 160	Horizon d'altération de l'argile - ocre jaune et gris non rouge - très compact. petits fragments d'argile oligocène peu altérés.

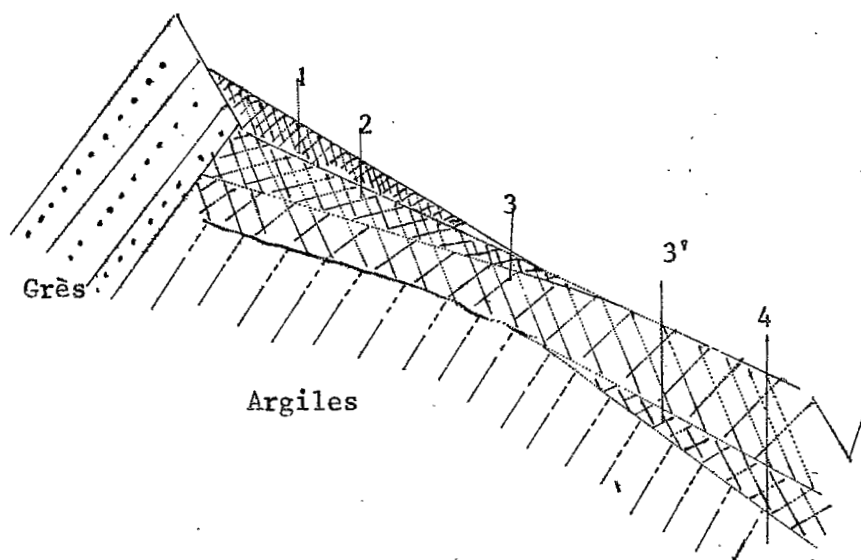
Matière organique totale 10⁻²	5,8	1,3	1,0	1,3		
C/N	21,2					

II.3.3. - Principales caractéristiques morphologiques des sols à pseudogley

Les sols à pseudogley sont différenciés soit sur colluvions argilo-gréseuses plus ou moins épaisses au-dessus de l'argile, soit directement sur l'argile mais plus rarement ; les premiers les plus répandus sont caractérisés par la présence de trois niveaux colluviaux superposés au-dessus de l'argile altérée (cf. schéma page 21) :

- 1 - le niveau supérieur (1), très caillouteux, de texture équilibrée, correspond à une phase de colluvionnement récent à partir des grès ; il a probablement subi en outre une phase d'appauvrissement latéral qui a abouti à un enrichissement relatif en éléments grossiers ; il est très temporairement engorgé par les eaux pluviales qui créent une nappe superficielle à circulation oblique, différenciant à sa partie inférieure un horizon nettement blanchi (horizon albique), appauvri en fer, argile et bases. En bas de versant cet horizon est plus ou moins marmorisé (A_{2g}) ou même parsemé de petites concrétions.
- 2 - Le deuxième niveau (2) est encore très caillouteux mais nettement plus argileux ; il crée une discontinuité granulométrique brutale avec l'horizon supérieur et constitue le plancher de la nappe oblique. Il est bariolé, à dominance ocre, parfois légèrement enrichi en argile à sa partie supérieure. Cet horizon est bien structuré et aéré (pseudogley poreux).
- 3 - Il passe assez brutalement à un horizon rouge (3) plus ou moins taché de gris, très bariolé, très argileux, peu caillouteux, compact à structuration plus large, peu aéré (pseudogley non poreux), qui a subi l'évolution la plus ancienne et s'apparente à un horizon fragipan.
- 4 - En profondeur passage progressif par l'intermédiaire d'un horizon d'altération ocre jaune, non rouge, à l'argile fragmentée.

Les variations latérales sur le versant sont importantes et portent d'une part sur l'épaisseur des différents niveaux colluviaux, le niveau 3 argileux bariolé rouge et grise étant le plus constant et pouvant dans certains cas affleurer, d'autre part sur les manifestations hydromorphes plus ou moins accentuées au sein de ces différents niveaux (blanchiment, marmorisation, présence de concrétions, proportions des taches grises par rapport aux taches rouges, qui dans les cas extrêmes peuvent passer à un gley de profondeur 3').



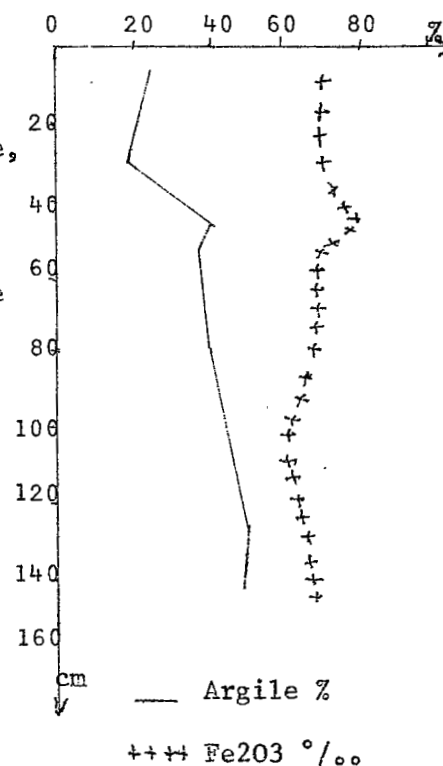
II.3.4. - Principales caractéristiques analytiques des sols à pseudogley

a) La matière organique

Caractéristique de la forêt feuillue ou du maquis sur matériau non calcaire, est de type mull forestier, à pH variant de 5,5 à 6, C/N de 12 à 15 et taux de saturation en bases variant de 20 à 60 %. Elle est bien humifiée avec une nette dominance des ANG sur les AHB (60 %).

b) Le lessivage

Morphologiquement les profils à pseudogley présentent un horizon intermédiaire plus ou moins blanchi qui rappelle un horizon A₂ de sol lessivé, la partie supérieure de l'horizon (B) sous jacent étant parfois nettement marquée par des revêtements argilo-humiques.



Courbes de répartition du Fer total et de l'argile dans les sols à pseudogley lessivés (BVN.B)

A l'analyse granulométrique, seuls les profils situés en haut de versant sur les colluvions les plus épaisses et les plus grossières présentent un léger creux dans la courbe de distribution de l'argile avec un enrichissement peu ou pas marqué en B.

Le blanchiment de cet horizon appauvri étant probablement plus dû au passage de la nappe latérale provoquant un appauvrissement en bases, fer et éléments fins qu'à un véritable lessivage sensu stricto (horizon albique). Une tendance planosolique se manifeste au contact avec le niveau inférieur dans lequel un léger ventre d'accumulation d'argile est parfois constaté correspondant à un entraînement vertical faible.

La légère augmentation du taux de matière organique presque toujours constatée au niveau du plancher argileux étant probablement due à un effet racinaire au niveau de la rupture granulométrique entre les deux horizons.

Ces sols à pseudogley peuvent à priori être considérés comme d'anciens sols lessivés obliques en voie de dégradation et dont la conservation actuelle est conditionnée par le facteur végétation.

- c) Le pH de ces sols est nettement acide, diminuant régulièrement avec la profondeur (6,2 à 4,5). La différence pH eau - pH KCl est globalement constante avec la profondeur dans les sols à pseudogley (comme dans les sols vertiques), sauf au niveau de l'argile bariolée très hydromorphe qui présente une différence plus importante de l'ordre de deux unités pH.

d) Capacité d'échange et éléments échangeables

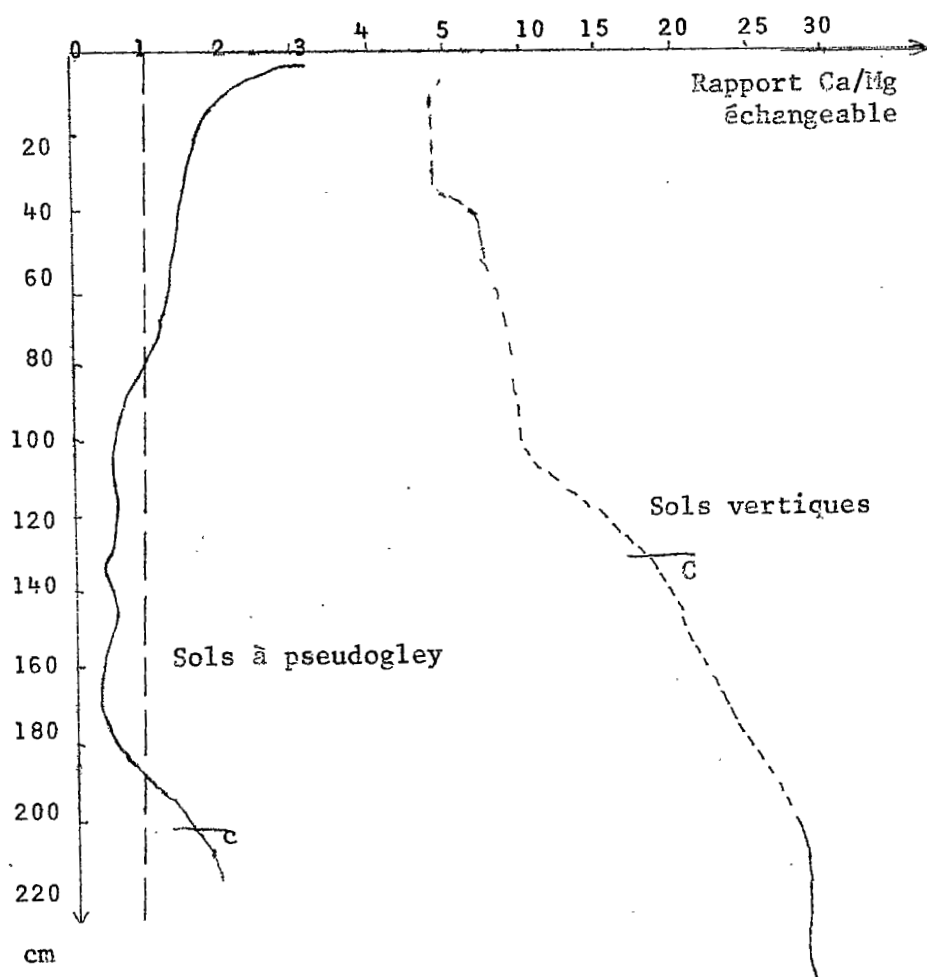
Les capacités totales d'échange sont de l'ordre de 10 méq. pour 100 g. de sol, dans les horizons colluviaux de surface passant à 20 dans les niveaux plus argileux.

Dans les sols à pseudogley, le taux de saturation est nettement inférieur à celui du sol sur argile calcaire et suit la diminution de pH avec la profondeur : 60 à 70 % dans les horizons très humifères, 50 % dans les argiles bariolées ainsi que dans l'horizon A_{2g} .

Les bases échangeables sont dominées par le calcium et le Magnésium dont le rapport Ca/Mg est > 1 dans la nappe colluviale la plus superficielle, et s'inverse avec une nette dominance du magnésium sur le calcium dans les horizons profonds argileux. Ce caractère semble indiquer une dégradation

des argiles liée à la forte acidité (cf. schéma ci-dessous).

Le taux de calcium échangeable est nettement plus élevé dans les sols vertiques et toujours supérieur à celui du Magnésium (rapport Ca/Mg en méq/100 g. > 30 dans les argiles calcaires).



Les mesures saisonnières en cours devraient permettre de mettre en évidence des "mouvements" de certains ions échangeables en relation avec l'état hydrique du sol en particulier au sein des horizons argileux hydromorphes.

e) Fer et Aluminium

- On note un léger ventre d'alumine libre dans les horizons intermédiaires dont une petite quantité (0,3 à 0,5 %) serait amorphe selon M.LAMOUREUX ; elle est probablement due à une désorganisation partielle des réseaux argileux avec libération d'alumine et de fer.

Les rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de l'ordre de 3 dans la roche argileuse originelle passent à 2,7 dans les argiles bariolées et à 2,4 dans les horizons de surface plus gréseux. Ils sont toujours > 2 dans ces sols, et caractéristiques d'un milieu peu lessivé.

- Les analyses de fer mettent en évidence une proportion importante de fer total dans les horizons argileux bariolés rouges et gris par rapport aux argiles originelles et aux colluvions de surface. Les proportions de fer libre DEB, toujours très fortes par rapport au fer total (70 %), ne sont pas significatives même au niveau des horizons rubéfiés. Quelques analyses fines ont été effectuées par M. LAMOUREUX dans les différentes taches rouges et grises de ces horizons bariolés :

" Les analyses de fer total mettent en évidence un très important départ du fer des taches grises presque totalement déferrifiées. Le fer total des taches rouges (18 %) paraît fort, d'où deux hypothèses a priori :

- . le fer des taches grises est venu se concentrer dans les taches rouges essentiellement,
- . le fer des taches grises a été évacué du profil avec un premier départ de fer dans les taches brunes, puis un départ beaucoup plus fort ensuite".

" Que ce soit par la méthode DEB ou par la méthode ENDREY, les taux de fer libre varient comme ceux du fer total. Ils sont plus faibles pour le fer libre UV que pour le fer DEB et sont relativement élevés.

Les taux de fer facilement extractible (F.F.E.) à HCl/8N, suivent les variations des autres formes de fer, mais on constate que les rapports $\frac{\text{FFE } 8\text{N}}{\text{F.T.}} \%$ diminuent considérablement de l'échantillon rouge (64%), au gris : (21,5%)

L'extraction à HCl/4N montre qu'il ne s'agit pas d'un produit réellement amorphe : les courbes d'extraction croissent régulièrement et vite ; (les premières extractions sont nettement plus faibles que les suivantes, d'où des courbes sigmoïdes).

Les courbes cinétiques avec 4N croissent puis décroissent".

	Granulométrie %					pH	Fer total	Fer libre
	A	L	STF	SF	SG		HCl Fe ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ % DEB UV
Taches rouges	53	18	12	8	6	4,7	18	15,2 12
Taches grises	67	16	5	6	5	4,1	3,5	1,7 1,9

- Du point de vue granulométrie la différence porte essentiellement sur la fraction 20 - 50 μ.

III - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES LIEES A L'HYDROMORPHIE

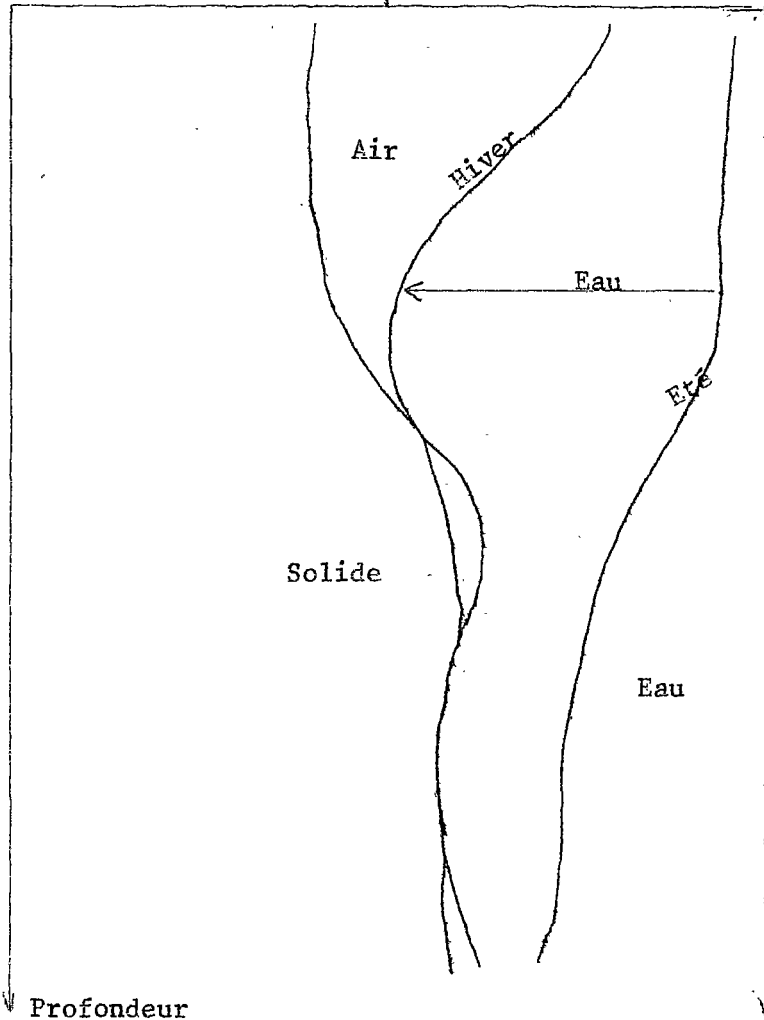
DES SOLS HYDROMORPHES A PSEUDOGLEY ET VERTIQUES

III.1. - DENSITE APPARENTE - DENSITE REELLE - POROSITE

Les premières mesures ont été effectuées par la méthode cylindre (250 cm³). Si son application est aisée au niveau des éléments structuraux dans les sols argileux vertiques, la limite de cette méthode est vite apparue dans les niveaux caillouteux des sols à pseudogley pour lesquels la méthode au densitomètre à membrane est mieux adaptée.

Les mesures ci-contre correspondent à des profils humides :	Sols à pseudogley sur colluvions complexes		Sols vertiques sur argile calcaire	
Si dans les horizons	A 11	1,3	A 11	1,4
supérieurs des sols à	A 12	1,3	A 12	1,45
pseudogley on peut con-	A 2g	1,3	(B) v	1,5
sidérer ces valeurs	A 2 / Bg	1,5	(B) / Cv	1,6
stables aux différents	Bg 21	1,5	C	1,7
états hydriques, il	Bgr 22	1,6		
en est autrement pour	B / C	1,7		
les sols vertiques et	C	1,7		

les horizons de profondeur très argileux dont la densité apparente subit d'importantes variations saisonnières dues au gonflement (jusqu'à 20 % de variation). Ceci détermine des proportions volumiques de solide, de liquide et de gaz très variables avec l'état hydrique (cf. schéma page 27). Des mesures ont été entreprises depuis Octobre 1974 pour apprécier ces variations saisonnières.



Allure du diagramme de porosité (été-hiver) non compte tenu du phénomène de gonflement en profondeur, dans un sol à pseudogley.

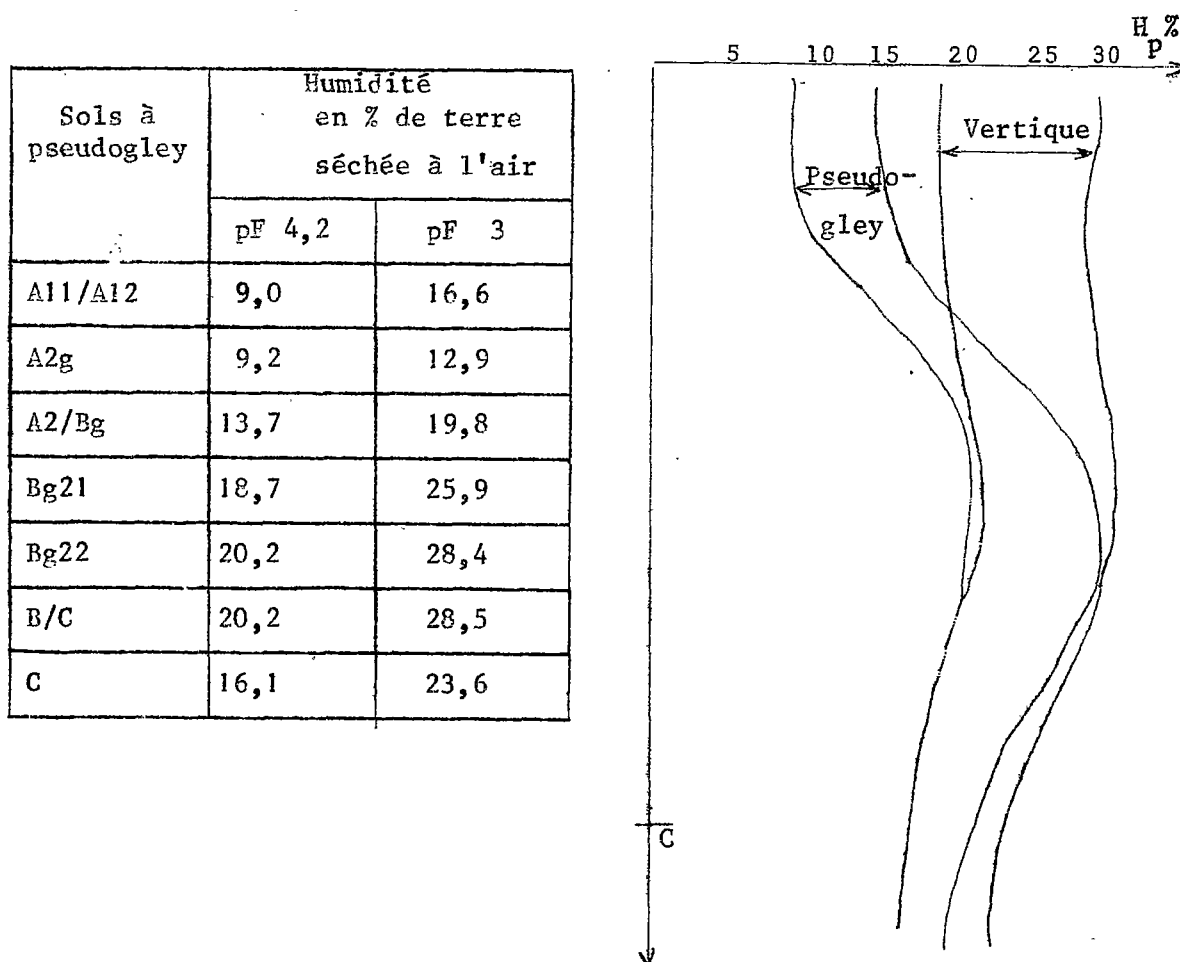
Les mesures répétées de densité réelle effectuées au pycnomètre sur la terre fine sont reproductibles ($dR = 2,5$).

Un point délicat à appréhender est l'intervention de la phase caillouteuse dans l'expression volumique des résultats. Il s'agit de grès parfois durs et inertes, mais parfois altérés (dA - Variable) dont le comportement vis-à-vis de l'eau sera à considérer (stockage d'eau probable au niveau du pseudogley poreux).

III.2. - POTENTIELS MATRICIELS

La détermination du pF effectuées* sur terre fine par la méthode conventionnelle (humectation, puis mesure en régime de dessèchement) donnent une première approche des phénomènes malgré les limites de la méthode dans les horizons argileux gonflants.

* Laboratoire de physique des sols - BONDY - A.COMBEAU



Les courbes ci-dessus soulignent la différence de comportement des horizons de surface des sols à pseudogley par rapport aux horizons profonds dont la réaction est comparable aux sols vertiques, et pour lesquels la saturation serait atteinte pour des valeurs de l'ordre de 45 % d'humidité volumique alors qu'elle l'est pour des valeurs de l'ordre de 20 % pour les horizons de surface. Ces horizons argileux à faible porosité capillaire, sont probablement une partie de l'année à une humidité supérieure à l'humidité équivalente, la partie supérieure colluviale limitant les pertes par évaporation ; les deux modes d'épuisement de cette eau étant la consommation par les plantes et en particulier les arbres forestiers, et les mouvements latéraux très lents au sein de ce matériau très argileux.

Une approche plus précise des courbes d'humidité aux différents pF sera effectuée par des mesures sur échantillons non perturbés.

III.3. - PERMEABILITE

Les premiers tests effectués par la méthode HENIN sur échantillons remaniés (2 mm), apportent des renseignements assez contradictoires avec les observations de terrain :

- Dans les sols à pseudogley, les horizons humifères et A11 lorsqu'ils existent, sont très perméables, mais les horizons A2g sont curieusement très peu filtrants et moins perméables que les horizons B argileux hydromorphes. L'argile est probablement déferrifiée, très dispersée sur la terre fine de A2 alors que les horizons Bg les oxydes de fer maintiennent une structure très agrégée, plus filtrante.
- Dans les sols vertiques la vitesse de filtration est très faible et constante sur l'ensemble du profil.

Sols vertiques	
A11	K = 0,9 cm/h
A12	0,9
(B) v	0,9
(B) / Cv	1,0
C	0,9

Vitesse de filtration des sols vertiques et à pseudogley.

Sols à Pseudogley	
A11 humifère	K = 33,4 cm/h
A12	3,3
A2g	1,1
Q2Bg	2,1
Bg 21	2,1
Bg 22	2,1
B/C	1,2
C	1,1

III.4. - REGIME HYDRIQUE

L'évolution du profil hydrique des sols vertiques et à pseudogley a été régulièrement suivi à la tarière sur différents sites depuis Octobre 1973 jusqu'à Juin 1974. Diverses difficultés au niveau de la méthode de prélèvements puis de l'interprétation des résultats sont très vite apparues :

- difficultés de pénétration dans les sols caillouteux
- impossibilité de prélever en épisode très humide en raison du remplissage du trou de tarière par la nappe d'eau oblique
- comparaisons délicates des différentes répétitions saisonnières du fait de la grande hétérogénéité du sol.

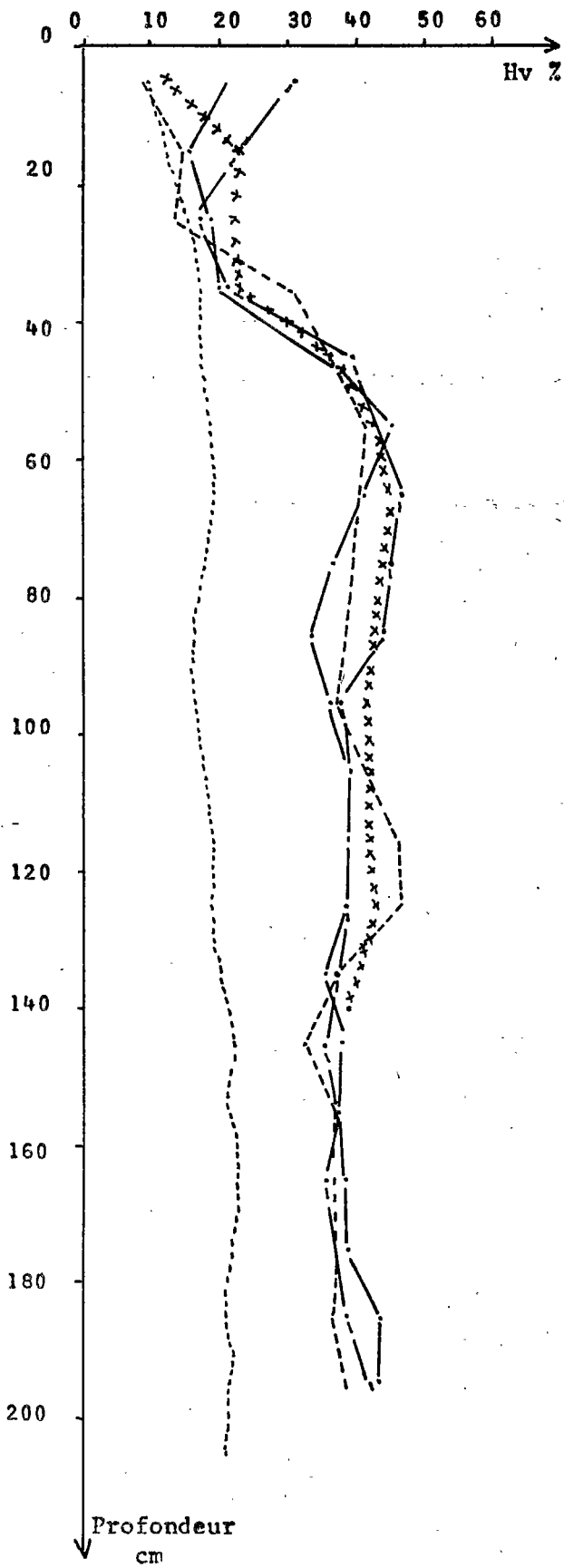
Néanmoins malgré ses imperfections et ses limites, la méthode gravimétrique a permis d'utiles comparaisons entre les régimes hydriques des sols à pseudogley et des sols vertiques d'une part, et entre les différents types de sols à pseudogley d'autre part pour lesquels les deux principaux facteurs influençant le régime de l'eau sont le reboisement et la position sur le versant qui elle-même conditionne l'organisation des horizons et les circulations au sein de ces horizons.

Nous avons représenté l'allure des profils hydriques en régime d'humectation, des sols à pseudogley et des sols vertiques, ainsi que l'allure du phénomène de haut en bas de la séquence à pseudogley. On n'a pas tenu compte dans la représentation volumique des résultats de la teneur en éléments grossiers inertes, si bien que les chiffres d'humidités volumiques des horizons supérieurs des sols à pseudogley sont probablement surestimés.

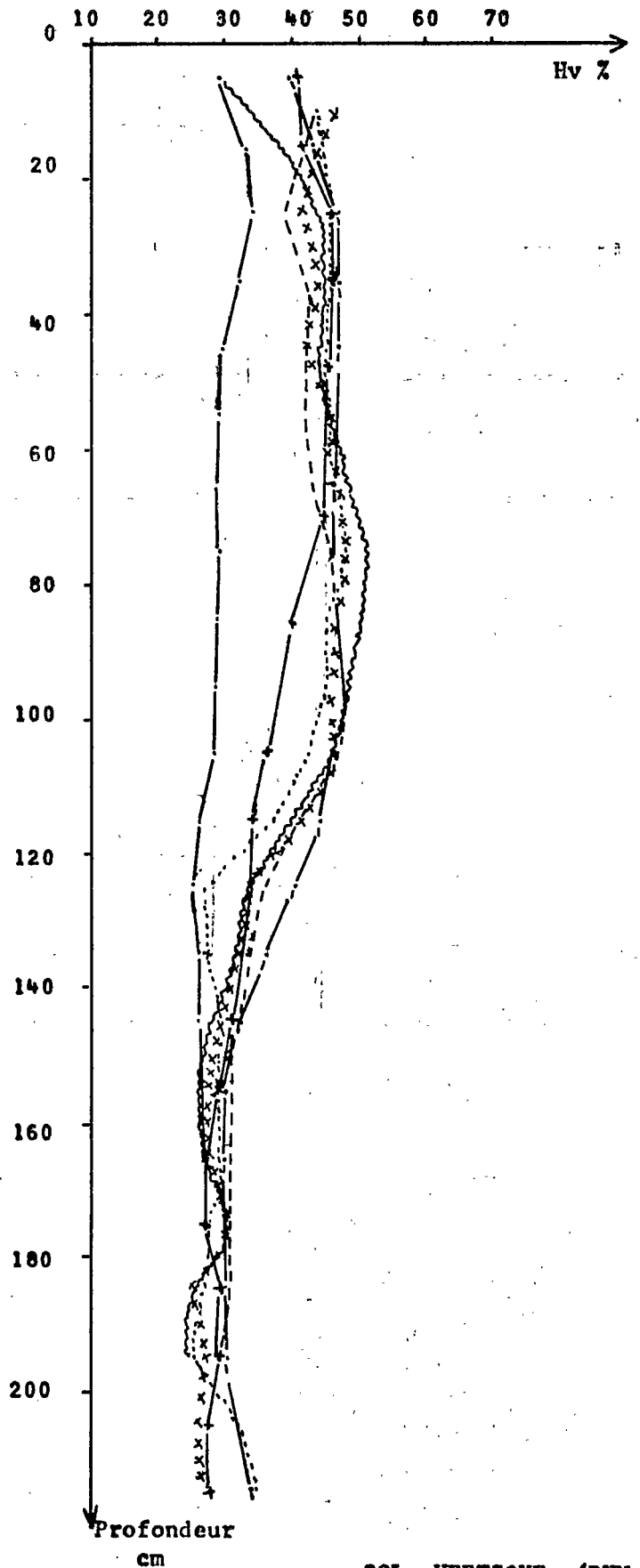
Inversement dans les horizons profonds très argileux l'erreur due au gonflement est certainement importante, et les chiffres d'humidités volumiques sous-estimés, les densités apparentes ayant été effectuées sur sol humide. L'allure sigmoïde des profils hydriques des sols à pseudogley est probablement encore plus accentuée, en particulier dans les profils du bas de versant qui semblent envahis très profondément par la nappe (BVN.G).

Des microfosses ERLO non isolées de l'amont ont en outre été installées en trois points échelonnés du versant ; elles ont permis dans un premier temps de mettre en évidence sur le plan qualitatif l'allure des mouvements de l'eau dans les sols à l'échelle de l'unité dynamique que constitue le versant :

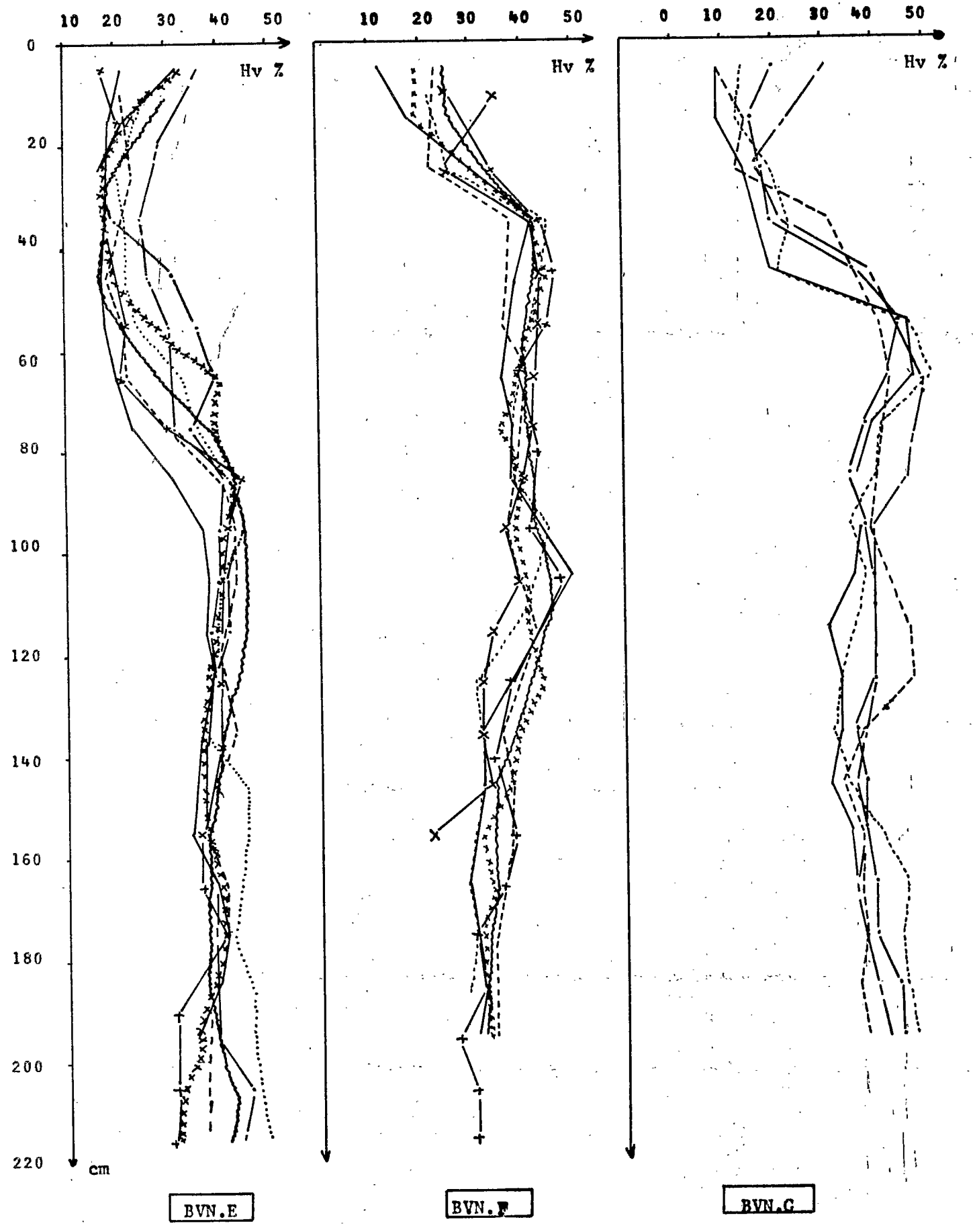
ALLURE DES PROFILS D'HUMECTATION DES SOLS A PSEUDOGLEY
 ET DES SOLS VERTIQUES



SOL A PSEUDOGLEY (BVN.G)
 sur colluvions complexes.



SOL VERTIQUE (BVN.1)
 sur argile calcaire



Allure de la variation des profils hydriques
du haut en bas du versant (E, F, G)
dans les sols à pseudogley.

- En surface l'eau ruisselle pratiquement uniquement dans les rigoles constituées par le cheminement des animaux avec effet cumulatif le long de la pente.
- Dans les interfluves là où les horizons de surface sont conservés, l'eau s'infiltré jusqu'au plancher argileux et constitue une nappe oblique perchée à circulation rapide et engorgeant plus ou moins les horizons de surface selon l'importance des pluies et la position sur le versant.
- Dans les horizons argileux de profondeur une nappe à dynamique beaucoup plus lente se constitue, affectant surtout les parties basses de la séquence, où les horizons bariolés sont nettement plus profonds qu'à l'amont et maintenant une humidité beaucoup plus durable que dans les horizons de surface soumis à d'importantes phases de dessèchement.

La toposéquence a été équipée cette année de tubes pour mesures neutroniques sur 5 points échelonnés, à des profondeurs de 4 mètres en haut de séquence et de 6 mètres en bas de séquence ; les mesures sont faites périodiquement depuis Octobre 1974 ; elles devraient permettre d'affiner les mesures de la méthode gravimétrique en suivant les cinétiques d'humectation et de dessèchement de façon précise et d'estimer la durée de saturation des différents horizons des sols à pseudogley en liaison avec la variation des autres paramètres tels que la densité apparente.

III.5. - MESURE DES pH

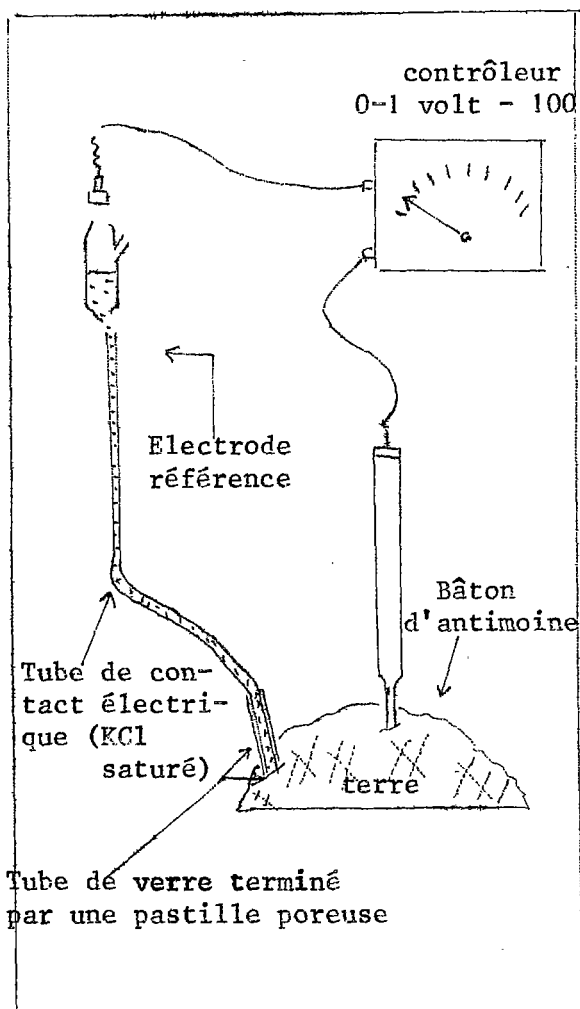
Dans les travaux suivis, il est bien certain que les mesures de pH ne prennent leur pleine signification que si au moins une partie de ces mesures est faite "in situ" ; de par sa fragilité, l'électrode de verre n'est pas praticable, nous avons alors pensé utiliser une électrode d'antimoine ; depuis longtemps (A.Vlès), cette électrode est conseillée et présente de nombreux avantages : robustesse, résistance intérieure très faible ; les appareils de mesure seront de ce fait simples et aisément transportables.

Avec une électrode bâtonnet soigneusement polie, la variation de la f. é. m. est une fonction linéaire des pH entre pH_1 et pH_{11} , à condition que le milieu ne soit pas très réducteur ($< \text{à } 28 \text{ mV}$), cette variation est de la forme :

$$E = ApH + B$$

avec A voisin de 0,0485 volts et B environ 0,1 volt.

Dans les conditions où nous avons opéré, on peut espérer une précision de 0,15 à 0,20 pH. Il faut veiller à ce que l'électrode soit toujours très propre et brillante.



Montage employé (cf. ci-contre)

L'électrode d'antimoine est une électrode bâton (1) ; elle constitue une demi-pile, l'autre étant une électrode au calomel KCl saturé ; pour éviter une souillure par la terre du poreux de diffusion de l'électrode de référence, nous l'avons muni d'un tube souple rempli de solution saturée de KCl et terminé par un poreux aisément remplaçable et qui pourra être fiché en terre sans difficulté.

Les électrodes sont raccordées à un contrôleur Métrix de forte résistance d'entrée (100 MΩ), et il est possible de lire mieux que ± 10 mv.

Ce montage a été contrôlé avec des solutions tampons de pH connu, ce qui nous a permis de construire la courbe de réponse de notre électrode (cf. courbe d'étalonnage p. 35).

Ce montage nous a permis de faire avec facilité des mesures ponctuelles. En outre, cette électrode se prêterait très bien à des mesures en continu avec l'emploi d'un enregistreur simple, peu coûteux.

(1) Référence TACUSSEL Sb3.

ETALONNAGE D'UNE ELECTRODE D'ANTIMOINE

LECTURES SUR CONTROLEUR METREX - 100 MΩ

Pente = 51 mV Δ pH

Départ de la courbe à 14 mV

pH

10

25

9

8

20

7

6

15

5

4

10

3

2

5

1

100

5

200

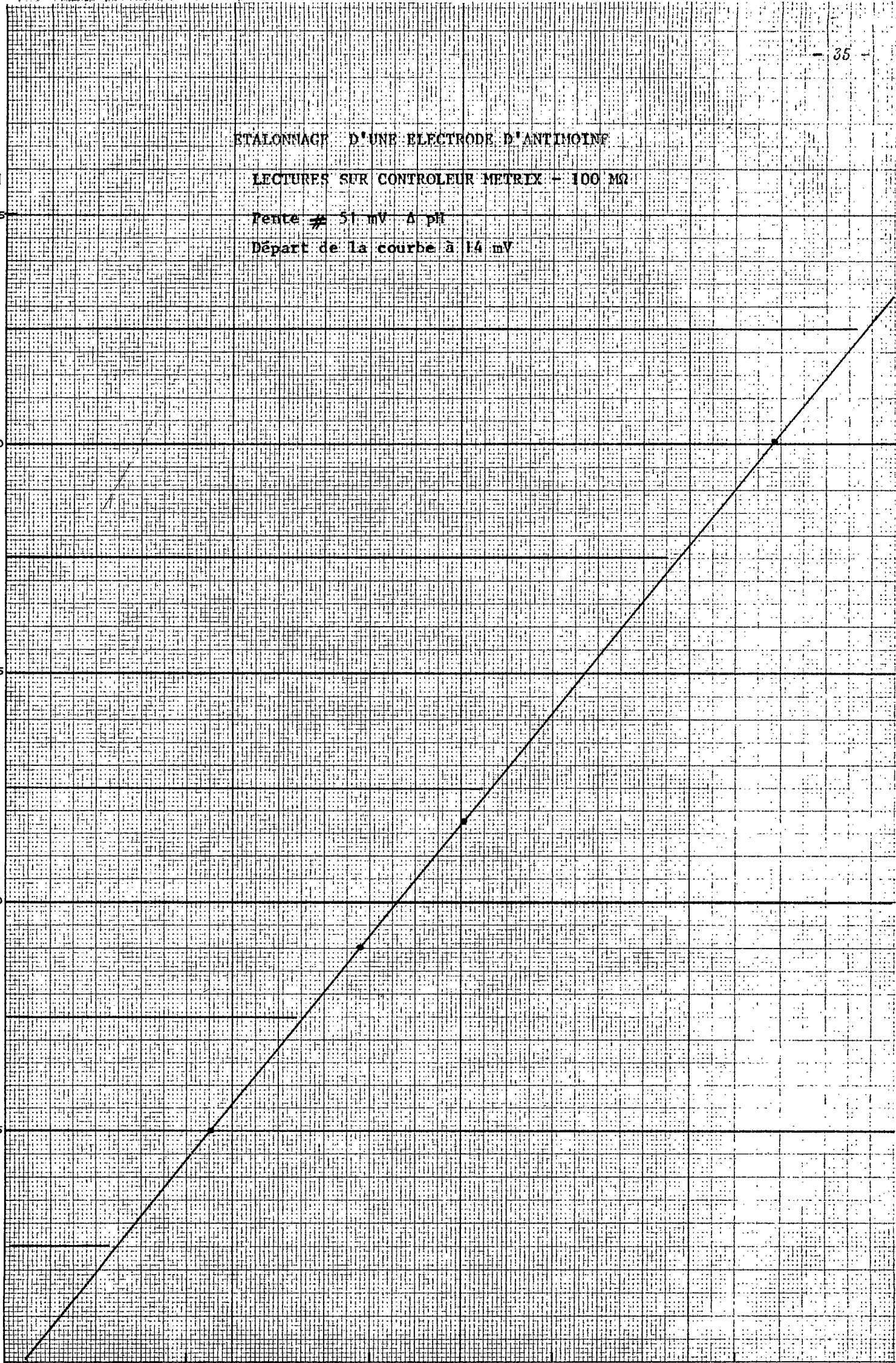
10

300

15

400

mV



Technique de mesure

Sur le terrain et au laboratoire, l'électrode d'antimoine est enfoncée dans le sol légèrement humide en veillant à ce que le contact soit bon ; à un ou deux centimètres, est enfoncé le tube poreux communiquant avec l'électrode de référence.

La lecture est immédiate et stable.

Avant une nouvelle mesure on nettoie soigneusement le poreux de diffusion et l'électrode d'antimoine. A la longue l'électrode d'antimoine se ternit ; on en ravive le brillant en la frottant avec une bouillie de kaolin très fin, ou une toile émeri très fine.

La méthode permet des mesures de terrain aisées qui sont régulièrement suivies depuis Octobre 1974 ; elle permet en particulier des mesures au niveau des différentes taches du pseudogley bariolé qui semblent avoir un comportement différent ; la différence pH terrain, actuellement notée (hiver), est de l'ordre de 0,5 unité pH entre les taches grises et rouges.

BVN E : sol lessivé à pseudogley				BVN G : sol hydromorphe à pseudogley			
Profond ^r	Horizon	f.é.m.	pH	Profond ^r	Horizon	f.é.m.	pH
10 cm	A11	321 mV	6,1	20 cm	A11	325 mV	6,1
30	A11	290	5,5	35	A2g	310	5,8
40	A2g	280	5,3	60	Bg21	290	5,5
60	Bg21	285	5,4	80	Bg21	295	5,6
80	Bg21	260	4,9	110	Bg22	275	5,2
130	Bg22 gris rouge	240	4,5	130	Bg22	260	4,9
		260	4,9			275	5,2
150	B/C	245	4,6	150	Bg22 gris rouge	250	4,7
170	B/C	245	4,6	180	B/C	240	4,5

III.6. - DETERMINATION DES BASES ECHANGEABLES ET DES SELS SOLUBLES

Nous avons à faire de nombreux prélèvements se répétant sur les mêmes parcelles ; pour des raisons faciles à comprendre ils ne peuvent être importants, il s'en suit que nous avons de nombreuses mesures à faire sur 20 - 30 g d'échantillon ; les méthodes habituelles d'analyse de sol ne sont pas applicables.

Aussi nous avons dû adapter les techniques classiques :

a) Ca et Mg échangeables :

- 2 g de sol sec à l'air sont mis dans un tube à centrifuger de 100 cm³ de capacité
- on ajoute 50 cm³ de solution d'acétate d'ammonium N (77 g/litre) ajustée à pH 8,2
- agiter soigneusement pour mettre la terre en suspension, laisser en contact 24 heures.
- centrifuger, recueillir le liquide clair surnageant
- sur ce liquide on dose Ca et Mg
remettre le culot de terre en suspension dans 20 cm³ d'alcool, centrifuger, éliminer le liquide surnageant
- faire plusieurs lavages de ce genre jusqu'à disparition dans le liquide surnageant de la réaction positive au réactif de NESSLER (disparition des NH_4^+)
- après le dernier lavage, ajouter 50 cm³ de solution de chlorure de sodium à 10 %, bien mettre la terre en suspension, laisser en contact 24 heures
- centrifuger, recueillir le liquide surnageant et sur une prise d'essai doser les ions NH_4^+ déplacés (méthode au phenate-hypochlorite); la valeur trouvée donne la capacité totale d'échange.

b) Ca et Mg solubles :

Il est bien sûr impossible d'envisager de pouvoir faire un extrait de saturation avec des échantillons très faibles. En conséquence nous avons adopté une extraction avec le rapport 1/5 comme étant reconnu fournissant les chiffres les plus voisins de ceux de l'extrait de saturation.

Toute l'opération s'effectue en tube à centrifuger sur une prise de terre de 2 g.

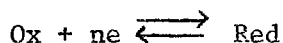
Le calcium et le magnésium dosés par photométrie de flamme et complexométrie adaptées au micro dosage, servent à corriger les bases échangeables "brutes".

III.7. - MESURE DE L'OXYGENE DISSOUS

Application stricte de la méthode de Winkler pour le dosage. La méthode de prélèvement au niveau de la nappe de drainage oblique dans les sols à pseudogley n'est pas satisfaisante, les tubes crépinés enfoncés latéralement n'ayant pas apporté les résultats escomptés.

III.8. - MESURE DE POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION

Dans un milieu contenant un mélange des formes oxydées et des formes réduites, il s'établit un état d'équilibre plus ou moins stable



Si on plonge un fil conducteur inattaquable (platine) dans un tel système, en l'associant avec une électrode de référence, l'équilibre s'établira au bout d'un temps plus ou moins long et prendra le potentiel :

$$E = E_0 + \frac{RT}{nf} \log \frac{|\text{Ox}|}{|\text{Red}|}$$

Ce potentiel est le potentiel du couple oxydo-réducteur. Si dans les sols de nombreux facteurs entrent en jeu pour créer un milieu plus ou moins réducteur, on peut néanmoins considérer, dans le cas qui nous concerne l'action principale du fer, on a alors :

$$E \text{ volt} = 0,780 + 0,06 \log \frac{\text{Fe}^{+++}}{\text{Fe}^{++}}$$

Ce potentiel sera influencé par le pH du sol, la relation E_h/pH est linéaire (1) si les conditions d'aération ne changent pas, les corrections apportées sont de ce fait difficiles à appliquer.

La température a une influence négligeable.

Principe et technique de mesure

Nous avons retenu la méthode potentiométrique qui ne pose aucun problème d'application.

L'électrode de platine employée est un fil de 1 cm de long et 0,6 mm de \emptyset , soigneusement poli. Le traitement préalable de cette électrode influence énormément les résultats obtenus et la littérature est abondante et contradictoire sur ce sujet ; nous avons adopté la technique préconisée par DEIBNER et MOURGUES⁽²⁾

(1) - 59 mv par unité pH

(2) Chimie analytique vol. 49 N° 5 Mai 1967 page 258

- séjour de 15 minutes dans l'eau oxygénée à 110 volumes, rinçage à l'eau distillée
- ensuite séjour dans l'acide nitrique, densité 1,37, 15 minutes, rinçage à l'eau distillée
- séjour dans l'acide **chlorydrique** densité 1,19, 15 minutes et finalement rinçage 2 heures dans l'eau distillée.

Il faut signaler que c'est peut-être le point le plus important de la mesure, tous les résultats seront rapportés à ce traitement.

L'appareillage électrique consiste en un contrôleur Métrix (type VX 313 B) de 100 M Ω sur la gamme 1000 mV, la résolution est de \pm 5 mV ; ces caractéristiques sont largement suffisantes.

L'électrode référence est la même que celle employée pour les mesures de pH, calomel - KCl saturé.

La chaîne de mesure est étalonnée avec l'emploi d'un tampon de Michaelis :

Solution 0,003 M de ferrocyanure de potassium et de 0,003 M de ferricyanure de potassium dans le chlorure de potassium 0,1 M ; à 25° ce tampon à un potentiel de 428 mV par rapport à l'électrode de référence hydrogène.

Remarque

Les potentiels red/ox sont exprimés en valeurs de mV par rapport à l'électrode de référence hydrogène ; comme nous opérons par rapport à l'électrode calomel qui est positive de + 245 mV par rapport à l'électrode d'hydrogène les chiffres lus sur l'appareil de mesure doivent être majorés de 245 mV.

Mesure in situ

Dès le prélèvement de sol fait, les électrodes sont enfoncées dans celui-ci (même technique que pour les mesures de pH). On observe une variation rapide du potentiel, puis on tend vers un ralentissement important, la stabilisation peut être longue (variation \pm 5 mV).

On peut objecter que pendant cette période les conditions d'aération se modifient ; nous envisageons de mettre dès le prélèvement, l'échantillon dans un liquide inerte (Acétone ?), la mesure pouvant se prolonger.

Remarque sur les premiers résultats

Les différentes mesures faites jusqu'à présent sont certainement difficiles à interpréter d'autant que lorsque l'on lit la littérature sur ce sujet, les contradictions, les contre-indications, les techniques diverses compliquent le problème.

Nous avons quand même observé des mesures qui ne paraissent pas incohérentes par le fait qu'elles se regroupent autour de valeurs de l'ordre de $+450$ à $+600$ mV par rapport à l'électrode d'hydrogène, et qui pourraient représenter un milieu peu réducteur.

Le principal de notre futur travail sera d'essayer de définir un protocole suffisamment rigoureux, pour qu'à défaut de mesures absolues, des variations significatives puissent être mises en évidence, d'une part au niveau des différents horizons des profils et en particulier des différentes taches du pseudogley, d'autre part au niveau des différents points choisis sur la séquence.

C'est certainement dans les déterminations du rH^2 qu'une technique de mesures en continu, avec enregistreur pourrait apporter beaucoup d'indications.

III.9. - EXTRACTION ET DOSAGE DU FER FERREUX DANS LES SOLS

Nous nous sommes directement inspirés des travaux de VIZIER dans sa publication, et nous avons pensé utiliser la solution d'extraction au chlorure d'aluminium à 0,5 %, à un pH ~~de~~ de 3,6, ce qui correspond à une bonne zone de solubilité du Fer ferreux. Mais à l'emploi, avec nos échantillons, nous nous sommes aperçus d'un très faible pouvoir d'extraction, et nous avons mis en évidence des extractions négatives consécutives vraisemblablement à un phénomène de réabsorption du fer par la terre, d'autant plus net que les quantités de fer mises en jeu étaient très faibles (de l'ordre de 2 ou 3 ppm).

La littérature pour des extractifs possibles est importante ; parmi ceux cités, nous avons adopté ceux à base d'acétate d'ammonium. Après quelques essais nous utilisons une solution 0,25 N en acétate d'ammonium tamponnée à pH 3,6 avec de l'acide chlorhydrique. L'extraction du fer ferreux est assez lente et après de nombreux essais il apparaissait que l'extraction pouvait être considérée comme pratiquement terminée après 150 heures (cf. tableau p. 41).

Ech.	Temps d'ext.	95 H	119 H	167 H	191 H
1		2,10	2,14	2,57	2,65
2		2,01	2,01	2,10	2,18
16		17,66	17,37	17,59	16,47
23 ...		10,52	10,32	9,68	10,24

résultats en ppm de Fe⁺⁺

d'autre part nous n'avons pas mis en évidence des phénomènes de réadsorption.

Pendant ces longs temps d'extraction, on pourrait craindre une possibilité de néoformation de fer ferreux ; pour vérifier ceci nous avons choisi des prélèvements de sols suivis depuis 200 heures d'extraction, donc arrivés à stabilisation du taux de fer extrait, et nous avonsensemencé, avec une solution de fer ferrique (375γ de Fe₂O₃ par flacon) et suivi de jour en jour le taux de fer ferreux qui n'a pas varié après une semaine (cf. tableau ci-dessous).

Echantillon	ppm Fe ⁺⁺ à stabilisation	ppm Fe ⁺⁺ après ensemencement et attente 8 jours
1	2,56	2,56
2	6,8	7,4
3	4,9	5,3
4	10,2	9,5

Nous avons bien contrôlé que, lorsque le prélèvement de sol était mis en contact avec la solution d'extraction, le pH se maintenait à 3,6.

Il est difficile de dire si l'extraction est complète, mais la reproductibilité des résultats est bonne et laisse à penser que la méthode est valable, ou tout au moins donne des résultats proportionnels à la réalité.

Il serait quand même nécessaire de préciser ces indications par des mesures conduisant à une "attaque" plus totale de l'échantillon, notamment par la méthode de BANERJEE (1).

(1) Direct détermination of ferrous iron in silicate rocks and minerals by iodine monochloride, Analytical - Chemistry Vol. 46 N° 6 1974 page 782.

DOSAGE DU FER FERREUX

Colorimètre photovolt Filtre 490 nm

Tube échantillon Ø 18 mm

10 cm³ prise d'essai

0,5 cm³ Acétate de Na 2 M

0,5 cm³ orthophenantroline à 0,5 %

attente 30 minutes

25

6

50

4

15

3

10

2

5

1

5

10⁵

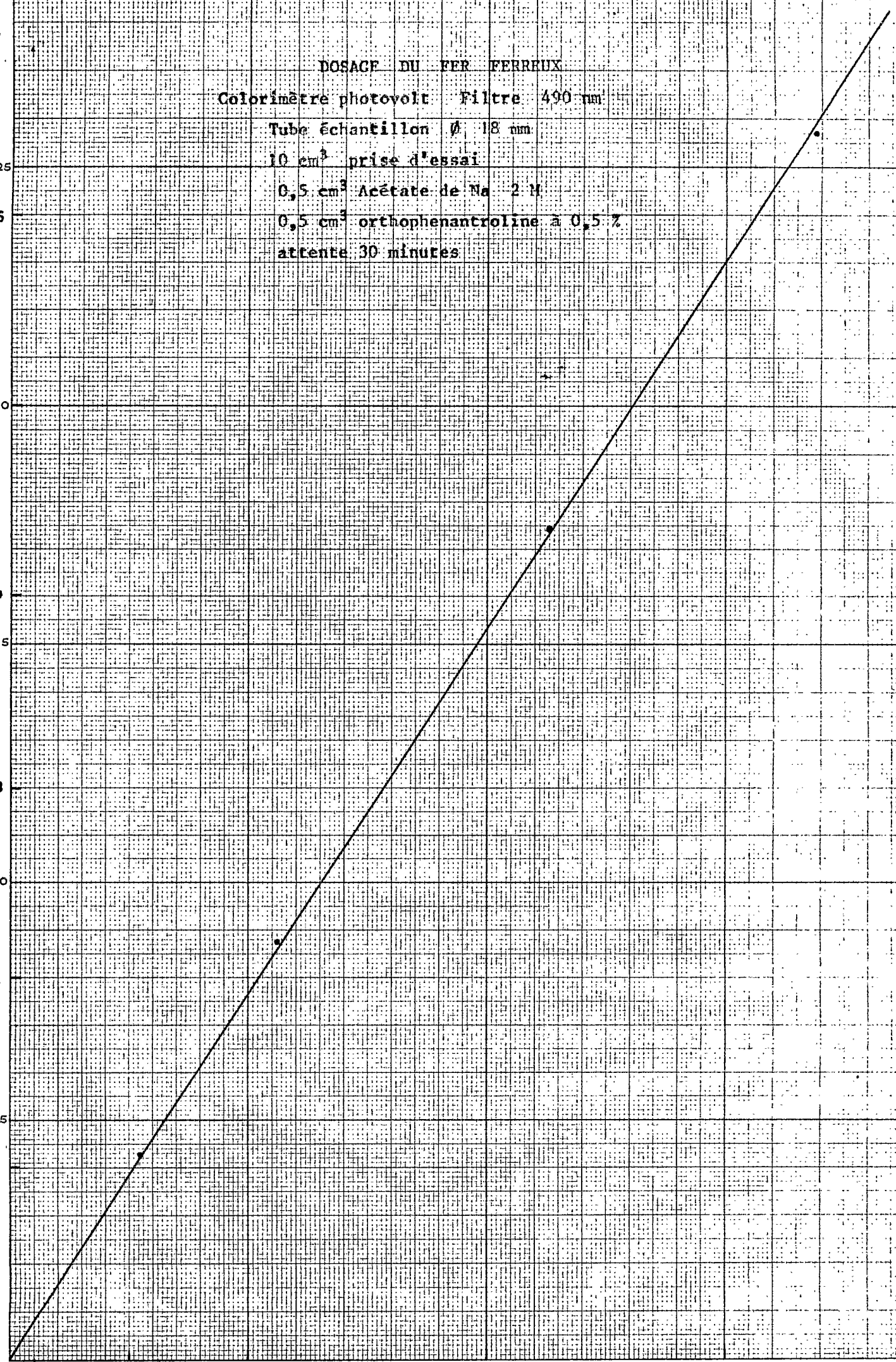
10

20

15

30

γ de Fe⁺⁺ dans prise d'essai de 10 cm³



Méthodologie employée

Prélèvements

Les prises d'échantillons (20 g) dès qu'elles sont faites, sont immergées dans 100 cm³ de la solution d'extraction qui est ramenée au laboratoire. Le rapport des volumes de la solution et du sol semble avoir une influence non négligeable ; elle sera précisée ultérieurement.

Il est prévu une ou deux agitations pour bien disperser l'échantillon dans la solution. temps : 150 heures.

Dosage

Il se fait sur une prise d'essai du liquide d'extraction de 10 cm³, à laquelle on ajoute 0,5 cm³ de solution d'acétate de sodium 2 M, et 0,5 cm³ de solution d'orthophénantroline à 0,5 % dans l'eau distillée.

La lecture est bonne et peut être augmentée en utilisant une cuve d'adsorption plus grande.

On dose ainsi de 1 à 40% de Fe⁺⁺ dans la prise d'essai.

Premiers résultats

Les prélèvements sont effectués périodiquement sur le versant depuis Novembre 74 ; les résultats sont partiels. Néanmoins il semble possible de dire que dans les profils verticaux des sols à pseudogley plus ou moins lessivés, le Fer ferreux semble avoir plusieurs niveaux de concentration (cf. tableau ci-dessous) :

Contact (A2)g/B et contact entre le pseudogley poreux et le pseudogley non poreux. Ces concentrations n'affectent pas la totalité des horizons hydromorphes, mais paraissent limitées à des franges, elles semblent en outre subir d'importantes variations quantitatives dans le temps. Les chiffres mesurés actuellement (Février) étant nettement inférieurs à ceux du début d'hiver (Novembre)

Profondeurs	Horizons	ppm Fe ⁺⁺	
		BVN.E	BVN.G
15 cm	A11	1,38	1,14
35	(A2)g	4,34	6,62
45	(A2)g/B	16,80	11,45
70	(B)g21	1,62	3,55
80	(B)g21	-	20,85
100	(B)g22	28,57	19,36
125	(B)g22	1,60	2,62
150	(B)g22	0,96	5,25
170	B/C g	1,23	2,47
200	B/C g	-	0,56

IV - DIFFERENTS ASPECTS DU PROGRAMME ENVISAGE POUR 1975

La première année d'études expérimentales a mis en évidence un certain nombre de difficultés dans la simple mesure des différents paramètres qui caractérisent le processus d'hydromorphie, et en même temps apporté un certain nombre d'enseignements et d'orientations pour la suite du programme.

La principale difficulté est due à l'hétérogénéité du milieu sur lequel se différencient les sols à pseudogley et qui oblige à un grand nombre de répétitions dans les mesures physiques (densité apparente en particulier) ; la simple réalisation des mesures pose des problèmes et leur interprétation reste malgré tout délicate du fait de la participation des éléments grossiers à la dynamique saisonnière.

- Les régimes hydriques par la méthode gravimétrique, d'une part ne sont pas techniquement réalisables toute l'année (nappe perchée), d'autre part nécessitent de nombreux essais avant pénétration, et enfin obligent à un nombre de répétitions trop important pour obtenir une valeur moyenne dont l'interprétation est aléatoire. Nous avons opté pour la technique neutronique qui permet des mesures directes, d'une part toute l'année, d'autre part comparatives, en ayant conscience de l'hétérogénéité du sol au départ. Nous n'avons pas jugé bon, compte tenu de cette hétérogénéité de multiplier les tubes à chaque point d'observation, mais plutôt d'essayer de cerner des variations latérales relatives en différents points du versant.

- Les mesures de potentiel d'oxydo-réduction in situ par la méthode électrométrique s'avèrent très délicates ; en outre il est probable que la simple mesure ponctuelle à un instant donné ne donne qu'une approche très insuffisante du phénomène qui présente dans ces sols des variations rapides dont la plupart nous échappent. Nous tenterons cette année une approche de ces variations par des mesures le plus possible en continu avec des électrodes en place et si possible par des mesures enregistrées in situ.

- La méthode de fixation à l'acétate d'ammonium semble techniquement au point pour les mesures de Fer ferreux dans les sols ; des recherches sont néanmoins poursuivies pour s'en assurer ; la méthode de fixation au chlorure d'aluminium sera également suivie afin de mieux appréhender le phénomène de rétrogradation.