

VII - ASSOCIATIONS VEGETALES RENCONTREES

Il n'a pas été entrepris une étude floristique proprement dite. Néanmoins à chaque sondage il était noté ;

Le type de peuplement et la composition de la strate herbacée, au moins les espèces essentielles, ce qui permet de donner un aperçu des associations végétales rencontrées (Prospection Juillet-Août).

a/ Association acidiphile à Deschampsia Flexuosa

Cette association comprend par ordre de fréquence :

Deschampsia flexuosa
Luzula albida
Lonicera periclymenum
Prenanthes purpurea
Ilex aquifolium
Polytrichum formosum
Pteris aquilina
Oxalis acetosella
Hedera Helix
Melamyrum pratense
Poa sylvatica
Vinca minor.

Cet ensemble comprend donc en majorité des espèces appartenant au groupement écologique, caractéristique des "moder" acides, et quelques espèces appartenant à celui du "mull" forestier acide. L'humus correspondant à cette association est d'ailleurs très généralement de type intermédiaire entre le mull forestier et le moder ; il est le plus souvent de type mull-moder.

Les trois premières espèces sont presque constamment présentes, les autres présentes ou non.

Cette association couvre les neuf dixièmes du massif et se rencontre sur un grand nombre de types de sols.

sols bruns
sols bruns lessivés
sols lessivés
sols lessivés marmorisés
sols lessivés à pseudogley profond.

Malgré cette disparité génétique tous ces sols ont en commun un certain nombre de caractères, que traduit justement cette association acidiphile.

Ces caractères communs sont la pauvreté en éléments minéraux assimilables et l'acidité ; le Ph est en effet partout inférieur à 5.

Par contre ces sols diffèrent par leurs propriétés physiques, surtout dans les horizons profonds.

Or, la végétation ligneuse prospecte ces horizons profonds et il est par conséquent indispensable de déterminer leurs propriétés.

Il ne semble pas qu'il soit possible ici de mettre en évidence les propriétés des horizons profonds uniquement par l'examen de la végétation herbacée.

Cette végétation herbacée ne prospecte que les 10 ou 20 premiers centimètres, dont les propriétés chimiques sont d'ailleurs modifiées par le jeu du cycle biologique.

Dans les premiers centimètres, la teneur en potassium est multipliée par 3-5, la teneur en phosphore assimilable par 1,5-2, la teneur en calcium par 15 - 20 et même 50.

b/ Association acidiphile à Vaccinium myrtillus

Très localement l'association précédente peut passer à un type plus acidiphile qui comprend :

Vaccinium myrtillus
Calluna vulgaris
Dicranum scoparium
Hypnum schreberi

Cette association, caractéristique de l'humus brut, correspond à un sol de la série podzolique, si la texture est suffisamment grossière.

Si la proportion d'éléments fins est suffisante, le type de sol ne sera pas différent de ceux observés sous l'association à canche flexueuse.

Trois ou quatre autres associations peuvent être observées et correspondent cette fois à des unités pédologiques bien définies.

c/ association à molinie

L'association à canche flexueuse se modifie assez profondément lorsque l'hydromorphie temporaire affecte les horizons supérieurs.

Il y a apparition de la bourdaine, Rhamnus frangula, et surtout de la molinie, molinia coerulea qui peut former un tapis dense lorsque le couvert n'est pas trop important.

La présence de ces deux plantes coïncide souvent parfaitement avec l'existence d'un plancher imperméable situé à 40 cm ou moins et avec celle d'un moder hydromorphe.

d/ Association à aulne et à Carex

L'hydromorphie permanente se traduit par l'existence d'un ensemble d'espèces hygrophiles dont quelques une sont facilement reconnaissables.

La végétation arborescente comprend surtout

Alnus glutinosa
Coryllus avellana.

La strate herbacée comprend un très grand nombre d'espèces dont

Carex maxima
Ranunculus repens
Spiraea Ulmaria
Deschampsia coespitosa
Polysticum Felix mas

L'humus correspondant est un anmoor.

e/ Association à Sphagnum

Le passage aux zones tourbeuses se traduit par la disparition progressive de ces espèces au profit de Sphagnum sp.

Corrélativement l'humus passe progressivement d'un anmoor à une tourbe véritable.

f/ Association du Muschelkalk

) - Association mésophile

Sur le muschelkalk marneux on rencontre une association totalement différente des associations acidiphiles précédemment décrites.

Le peuplement est un taillis sous futaie à réserves de hêtres et surtout de chênes. Le taillis est surtout composé de hêtres, de charmes, de salix et de cornus mas.

La strate herbacée est principalement composée de :

Rubus sp.
Rubus idaeus
Stachys sylvatica
Geranium robertianum
Ficaria ranunculoides
Glechoma hederacea
Miliun effusum
Epilobium durieaei
Hypnum pulchrum
Ranunculus repens.

Ces espèces appartiennent pour la plupart au groupement écologique caractéristique du mull actif.

Toutes les espèces acidiphiles , sauf *Malampyrum pratense*, rencontrées sur les autres formations ont disparu, quoique les sols soient génétiquement très semblables dans les deux cas.

Les différences de Ph sont très faibles . En surface le Ph ne dépasse guère 5 sur muschelkalk, alors que sur les autres formations il est légèrement inférieur à 5.

Par contre la teneur en bases échangeables (Ca, K, Mg) est nettement plus élevée sur muschelkalk.

) Association hygrophile

Lorsque l'horizon de pseudogley est très proche de la surface il y a apparition de :

Spiraea ulmaria
Circaea lutetiana
puis de :
Juncus effusus

Corrélativement l'humus devient un hydromull.

On notera que la molinie est presque toujours absente, comme d'ailleurs la bourdaine, alors que l'hydromorphie temporaire atteint la même intensité que celle qui existe sur les sols identiques développés sur limons.

CONCLUSION

Dans le cadre de ce massif une étude très sommaire de la végétation permet donc de différencier les différents états de l'humus : Mor, mull-moder, mull actif, moder hydromorphe, hydromull, anmoor et tourbe.

Ces différents états de l'humus sont en corrélation avec la richesse en éléments minéraux du sol et avec la nature et l'intensité de l'hydromorphie, quand elle affecte les horizons de surface.

Par contre la végétation herbacée ne reflète pas la nature des horizons profonds. Par exemple il ne semble pas que l'on puisse mettre en évidence un horizon de pseudogley situé à plus de 50 cm, ou un niveau compact d'alluvions anciennes impénétrables aux racines, même proche de la surface.

Ce sont pourtant des facteurs qui doivent avoir une grande influence sur les possibilités de la station.

VIII - RAISONS DU CHOIX DE LA METHODE EMPLOYEE

On peut se demander, pourquoi nous n'avons pas utilisé la méthode française de cartographie des stations qui permet un gain de temps considérable.

Cette méthode exposée dans le Précis de Pédologie de Ph DUCHAUFOR consiste à établir au préalable un certain nombre de corrélations :

- Corrélations sol-peuplement

Les différentes essences ayant des exigences différentes, leur répartition est fonction des caractéristiques du sol.

De même, suivant ces mêmes caractéristiques, un essence donnée aura une vitalité variable.

- Corrélation sol-végétation

De nombreuses études ont permis de déterminer différents "groupes écologiques" reflétant certaines caractéristiques du sol en relation avec les types d'humus.

- Corrélations sol-topographie

Ces corrélations étant parfaitement connues, il est ensuite possible de délimiter des zones à potentialité égale de production, appelées stations, en n'effectuant qu'un minimum de sondages.

Dans le massif étudié il était difficile d'établir de telles corrélations, sauf celles concernant le sol et la topographie.

En effet ce massif n'a pas toujours été un unité ; il a appartenu au cours de mêmes époques, à plusieurs propriétaires différents. De ce fait il a été traité de manières différentes et souvent de manière an-archique.

Les différentes modifications apportées par l'homme pendant, plusieurs siècles, font qu'actuellement il est fort difficile, par l'examen du peuplement, qui est aussi variable que possible, de déterminer les zones d'égaies potentialité.

De même nous pouvons supposer que ces dégradations anciennes, sont une des causes de l'uniformation de la végétation herbacée et du type humus.

En effet, s'il est possible, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, de distinguer différents états de l'humus et autant d'associations végétales, les neuf dixièmes du massif correspondent à un mull-moder acide, malgré l'extrême diversité des sols.

Ces faits, sont analogues à ceux observés, par Ph DUCHAUFOR, dans les chênaies dégradées de l'Ouest de la France.

Dans ces sonditions il était nécessaire ici de procéder à une étude par sondages systématiques, qui seule pouvait permettre la mise en évidence des différentes unités pédologiques, d'autant plus que différents phases de pédogénèses anciennes ont joué un rôle fondamental, comme nous le verrons dans la deuxième partie.

DEUXIEME PARTIE

- ESSAI D'INTERPRETATION

DES FAITS OBSERVES -

CHAPITRE I - GENESE DES SOLS A HORIZON DE PSEUDOGLEY

L'importance des sols à hydromorphie temporaire et l'adoption d'une représentation cartographique à caractères génétiques, ont nécessité une étude approfondie de la genèse des sols à horizon de pseudogley.

Les sols à pseudogley ont été étudiés par de nombreux Auteurs étrangers. En France, plusieurs travaux récents sont consacrés à leur étude.

- DESAUNETTES a proposé en 1958 une classification pratique des sols hydromorphes.

-- DEJOU en 1963 dans son étude des sols du Centre Nivernais, a étudié des sols hydromorphes sur limons.

- Mme PERIGAUD, en 1963, s'est attachée plus particulièrement à leurs propriétés et leurs possibilités d'amélioration (Brenne).

- PLAISANCE en forêt de CHAUX (Jura) a étudié des sols semblables et leurs aptitudes forestières.

1 - CAUSES POSSIBLES D'HYDROMORPHIE TEMPORAIRE

Dans le Massif, il est possible de distinguer trois causes principales d'hydromorphie temporaire.

Dans la zone de fluctuation de la nappe permanente, pouvant exister dans une cuvette déprimée et mal drainée, l'hydromorphie, en un point donné, est temporaire, et devient de plus en plus accentuée vers le centre de la dépression, pour devenir permanente dans les parties les plus basses.

Une seconde cause possible est l'accumulation simultanée, dans le sol, des eaux de ruissellement, et des eaux infiltrées, dans les alluvions, qui réapparaissent en bas de pente.

Ces deux causes sont externes au sol lui-même.

Il en existe une troisième, de beaucoup la plus fréquente, indépendante de la position topographique et inhérente au sol lui-même ; cette cause d'hydromorphie temporaire est l'existence à plus ou moins grande profondeur d'un niveau argileux imperméable.

II - CONSEQUENCES ET ORIGINES POSSIBLES DE L'EXISTENCE D'UN NIVEAU IMPERMEABLE

Tous les sols développés sur limons sont caractérisés par l'existence d'un tel niveau imperméable, limono-argileux, ocre-rouille, parcouru par un réseau de marbrures blanchâtres décolorées, caractéristiques des horizons de pseudogley et constituant le plancher de la nappe temporaire. Cette nappe apparaît immédiatement après une pluie et disparaît plus ou moins rapidement.

Cet horizon imperméable est situé à une profondeur variable, comprise entre 30 et 120 cm.

Lorsqu'il est situé à 30 cm de profondeur, les caractéristiques du profil sont essentiellement dominés par l'hydromorphie. Que l'horizon imperméable soit dû à l'existence de deux couches géologiquement différentes ou qu'il soit secondaire et résulte d'un processus pédologique, le sol appartient aux pseudogleys à nappe perchée.

Par contre, lorsque cet horizon argileux se trouve à 1 mètre de profondeur, les caractères d'hydromorphie ne sont plus que secondaires et, génétiquement, le sol appartient à une classe différente suivant que l'horizon d'accumulation d'argile, est ou n'est pas, la conséquence d'un processus de lessivage.

Pour les sols de la Brenne dont l'hydromorphie est liée aux sols eux-mêmes, Mme PERIGAUD estime sans être affirmative que cette hydromorphie s'est superposée à une évolution antérieure, en l'occurrence, un lessivage ancien intense.

Pour les sols de la forêt de CHAUX, PLAISANCE estime également que le lessivage est intervenu dans leur formation, et que ces sols sont au moins en partie d'origine ancienne.

A Sainte Hélène, la cartographie détaillée a montré que sur tout le placage limoneux, existaient deux "couches" superposées, l'une limoneuse claire (2 5Y 7/4), l'autre limono-argileuse plus foncée (2 5Y 7/8), toujours située sous la précédente.

Jamais la couche inférieure n'apparaît seule, et jamais la couche supérieure ne dépasse 1 mètre. Une telle constance fait immédiatement penser à la possibilité d'une liaison entre ces deux couches.

C'est pour ces raisons, qu'en première approximation, dans les descriptions qui vont suivre, ces couches ont été respectivement appelées horizon A₂ et B.

Deux profils situés dans des conditions analogues, sous futaie de hêtres et de chênes en mélange, ont été étudiés d'une manière détaillée afin de déterminer si une telle liaison pédologique existe et, dans cette hypothèse de préciser la nature de cette liaison.

Le profil n° 1 est situé en bordure de la route forestière allant de la pépinière au village de Sainte Hélène (H4). Le profil n° 2 est situé près de la route forestière centrale au lieu dit "la croix du soldat" (F5).

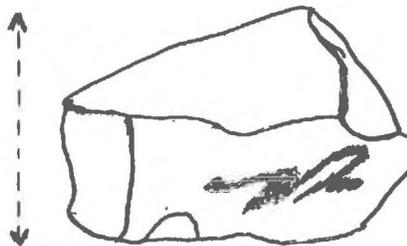
III - ETUDE ET COMPARAISON DE DEUX PROFILS

A - Description

P R O F I L n° 1

- | | | |
|-------------------------|---|---|
| Horizon A ₁ | : | Mull-moder, structure à peine différenciée, agrégats extrêmement fins. |
| 0 - 5 cm | | Transition peu nette avec l'horizon inférieur. Enracinement abondant de la strate herbacée. |
| Horizon A ₁₂ | : | Horizon nettement influencé par la matière organique. Structure grumeleuse irrégulière : grumeaux anguleux de 3 à 5 mm. Très meuble. Enracinement très abondant. |
| 5 - 30 cm | | 2 5Y 6/4 (jaune gris) |
| Horizon A ₂ | : | Absence de structure. Canalicules très fins et nombreux, devenant encore plus abondants à la partie inférieure de l'horizon. Forte compacité en période de sécheresse. Enracinement abondant. |
| 30 - 70 cm | | 2 5 Y 7/4 (jaune pâle) |

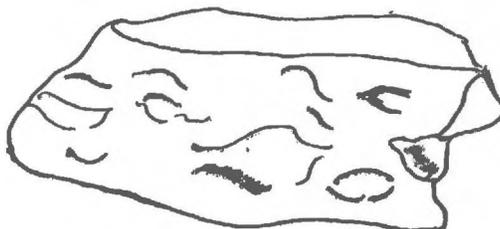
- Horizon A_{2g} : de 70 à 90 cm : Structure fondue ayant une légère tendance à devenir polyédrique.
2 5 Y 7/4 avec 10 à 15 % de plages 10 YR 7/6 (jaune)
70 - 120 cm
- de 90 à 120 cm : structure polyédrique peu nette. Juxtaposition de 4 couleurs.
Matrice 2 5Y 7/4, 10 à 20 % de plages gris clair
2 5Y 7/2, 10 à 20 % de plages ocre
10 YR 7/6, 2 à 3 % de concrétions rouille 7 5YR 7/2.
- Transition diffuse avec l'horizon sous-jacent. Enracinement peu abondant.
- Horizon B_g : De 120 à 150 cm, traversé par des bandes décolorées verticales blanchâtres pulvérulentes.
120 à 170 cm Très compact. Structure polyédrique remarquable. Gros polyèdres de 3 à 4 cm de longueur, souvent aplatis.



Les faces des polyèdres sont souvent décolorées et pulvérulentes, surtout celles de ceux bordant les bandes blanches. Nombreuses concrétions d'oxyde de fer et de manganèse sur les faces des polyèdres. Présence constante de clay-skins très nets. L'intérieur des polyèdres de couleur 2 5Y 7/8 (jaune gris) est traversé par un réseau de canalicules dont les parois sont rouille foncé.

La partie inférieure de ce niveau tend à avoir une structure lamellaire.

De 150 à 170 cm, structure polyédrique ayant tendance à devenir indurée. Transition brutale avec l'horizon inférieur.



Horizon II B : Prélèvement à la tarière. Structure impossible à déterminer. Trainées blanchâtres verticales.
170 - 200 cm 7 5 YR 5/8 (jaune rougeâtre) à la partie supérieure, puis 5 YR 5/8 (rouge jaune) entre 150 et 200 cm, à nouveau 7 5 YR 5/8.

A partir de 210 cm , nombreux cailloux roulés empêchant le prélèvement.

P R O F I L 2

Horizon A₀
1 à 2 cm
Horizon A₁
5 à 10 cm : Moder légèrement hydromorphe, très noir. Structure très finement grumelleuse à particulaire. Transition nette avec horizon inférieur.

Horizon A₁₂ : Structure grumelleuse; grumeaux de 1 à 5 mm en moyenne, parfois 1 cm, de forme angulaire. Enracinement dense. 2 5Y 7/4 (jaune pâle)

Horizon A₂
10 à 20 cm : Structure fondue. Nombreux canalicules. Enracinement abondant. 2 5Y 7/4 (jaune pâle)

Horizon A_{2g}
20 - 45 cm : De 20 à 30 cm : identique à A₂ , mais 1 à 2 % de taches rouilles 10 YR 7/6. Structure fondue
De 30 à 45 cm : Structure fondue à légère tendance polyédrique. Enracinement peu abondant. Juxtaposition de 4 couleurs. Matrice 2 5Y 7/4 ; 10 à 20 % de plages claires ; 2 5Y 7/2 - 20 à 25 % de plages rouilles ; 10 YR 7/6 ; 2 à 3 % de taches rouille foncé 7 5Y 6/6. Transition nette avec l'horizon sous-jacent.

Horizon B
g
45 à 180 cm : Structure polyédrique à grosses unités de 3 à 5 cm de longueur, ayant tendance à devenir lamellaire vers 80 cm. Clay skins. Nombreuses bandes décolorées verticales, surtout à la partie supérieure. Couleur dominante 10 YR 6/6 (jaune) ; quelques rares taches rouilles 7 5Y 6/8. Abondantes concrétions d'oxydes de fer et de manganèse.
- de 90 à 180 cm : prélèvement à la tarière. Couleur identique. Absence presque totale de bandes décolorées verticales.

Horizon B/C : Teinte générale 2 5Y 7/6 (jaune). 30 % de plages 10 YR 6/6
180 - 200 cm

Horizon II B : Transition très brutale. Couleur générale 7 5YR 6/8 (jaune rouge)
210 à 260 cm traces d'hydromorphie importante dans la zone de transition

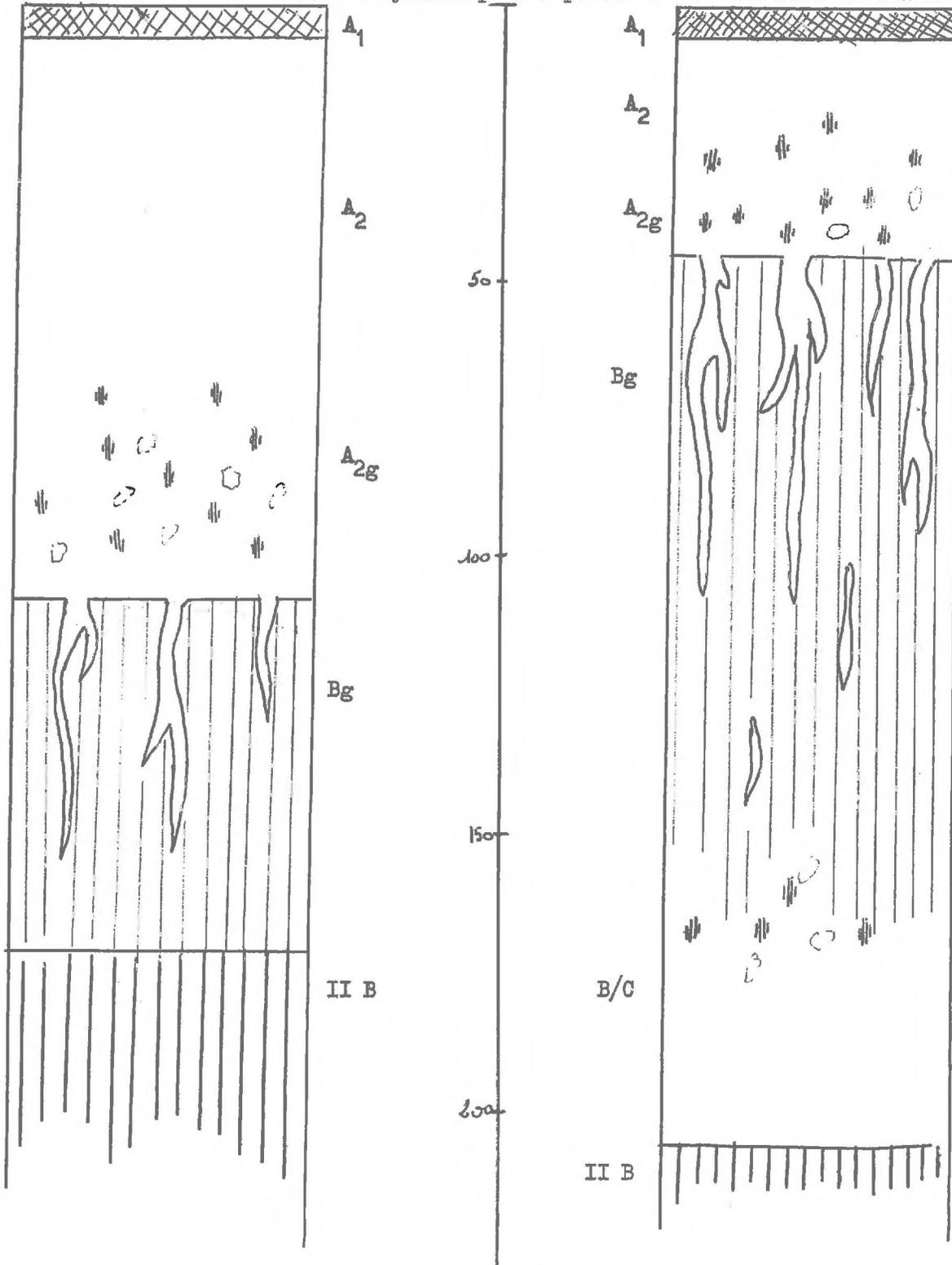


FIG. XIV

Morphologiquement ces 2 profils distants de 1 800 m diffèrent essentiellement par la profondeur d'apparition de l'horizon limono-argileux (B) 120 cm pour le profil I, 45 cm pour le profil II.

Deux autres différences peuvent être remarquées ; l'horizon limono argileux du profil II présente un aspect plus bigarré que celui du profil I.

D'autre part, l'humus dans un cas est un moder légèrement hydro-morphe et dans l'autre cas, un mull moder.

Sous l'horizon limono-argileux, apparaît brutalement dans les 2 cas, respectivement à 170 et 210 cm, un horizon rubéfié jaune rouge (II B) Une étude ultérieure le confirmera ; nous sommes en présence des restes d'un ancien sol.

Dans ce chapitre, nous ne tiendrons compte que de la partie située au-dessus du limon rubéfié.

B - Etude du fer et de l'argile

Des prélèvements ont été faits tous les 10 cm et sur chaque échantillon, le dosage du fer libre ainsi qu'une analyse granulométrique ont été effectués, ce qui a permis de dresser les graphiques de répartition du fer libre et de l'argile en fonction de la profondeur.

I - PROFIL I

Nous ne tiendrons compte que des 170 premiers centimètres. A partir de cette profondeur, on passe en effet au limon ancien plus riche en fer et en argile.

Les deux courbes du fer et de l'argile sont concordantes et permettent de penser à un lessivage (Fig. XV et XVI)

On peut en effet distinguer un horizon A₂ de 100 cm environ et un horizon B beaucoup moins épais de 60 cm. Cette disproportion entre les 2 horizons s'explique aisément si l'on admet que l'accumulation du fer et de l'argile a dû s'effectuer sur une plus grande épaisseur. Du fait de l'hétérogénéité de la roche mère, il est impossible de le mettre en évidence.

Nous sommes en présence d'un profil incomplet par sa partie inférieure, que se confond avec l'horizon II B du sol fossile.

Si nous calculons les indices d'entraînement du fer et de l'argile en prenant les valeurs maxima et minima, nous obtenons respectivement 2,37 et 2,1, ce qui permet de classer ce sol dans la classe des sols lessivés, en admettant que la roche mère soit bien homogène.

L'examen des couches cumulatives des prélèvements effectués à 35 cm (A_2), 135 cm (B_g) et 185 cm (limon ancien) permet de conclure en faveur de l'homogénéité du matériel initial jusqu'à 170 cm (fig. XVII)

Les courbes des horizons A_2 et B_g sont constamment situées l'une au-dessus de l'autre, leur décalage correspondant à la quantité d'argile ayant migré par lessivage.

On peut comparer les éléments supérieurs à 2 microns des horizons A_2 et B_g en les ramenant à 100 % de façon à éliminer l'argile.

Tableau comparatif des limons et des sables

Horizons A_2 et B_g

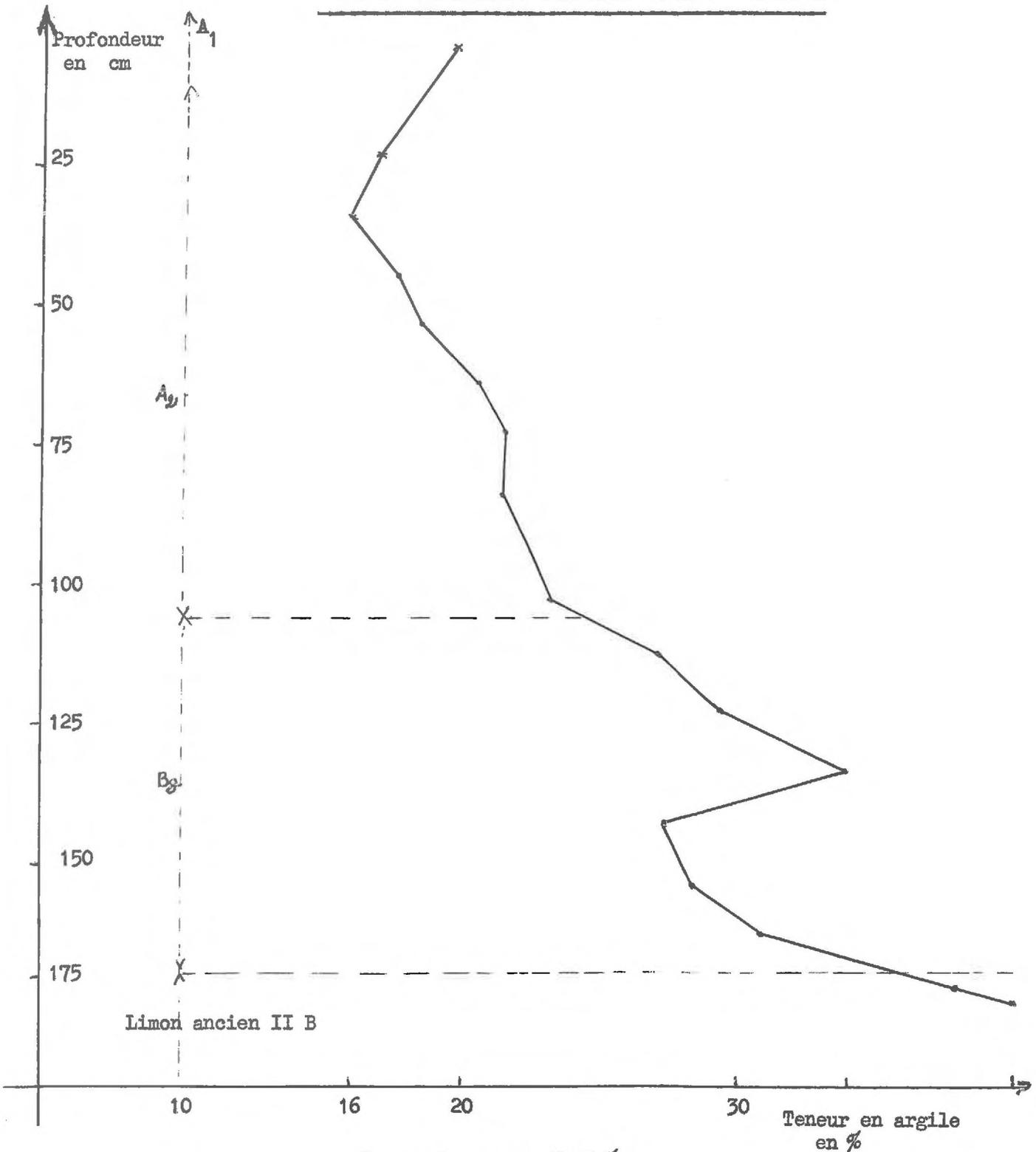
	Lf	Lg	Sf	Sg	
A_2	49	23	6,5	7,1	Pourcentage réel
B_g	35	17	4,7	4,7	
A_2	57,6	27	7,6	8,3	Pourcentage corrigé
B_g	57,3	28	7,7	7,7	
Différence	+ 0,3	- 1	- 0,1	+ 0,6	

TABEAU XI

La concordance est à peu près parfaite sauf pour les limons grossiers, pour lesquels on observe une légère différence de 1,0 %.

PROFIL I

TENEUR EN ARGILE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



Pourcentage max. 33,5 %
Pourcentage min. 16 %
Indice d'entraînement 2,1

FIG. XV

PROFIL I
Teneur en fer libre en fonction de
la profondeur

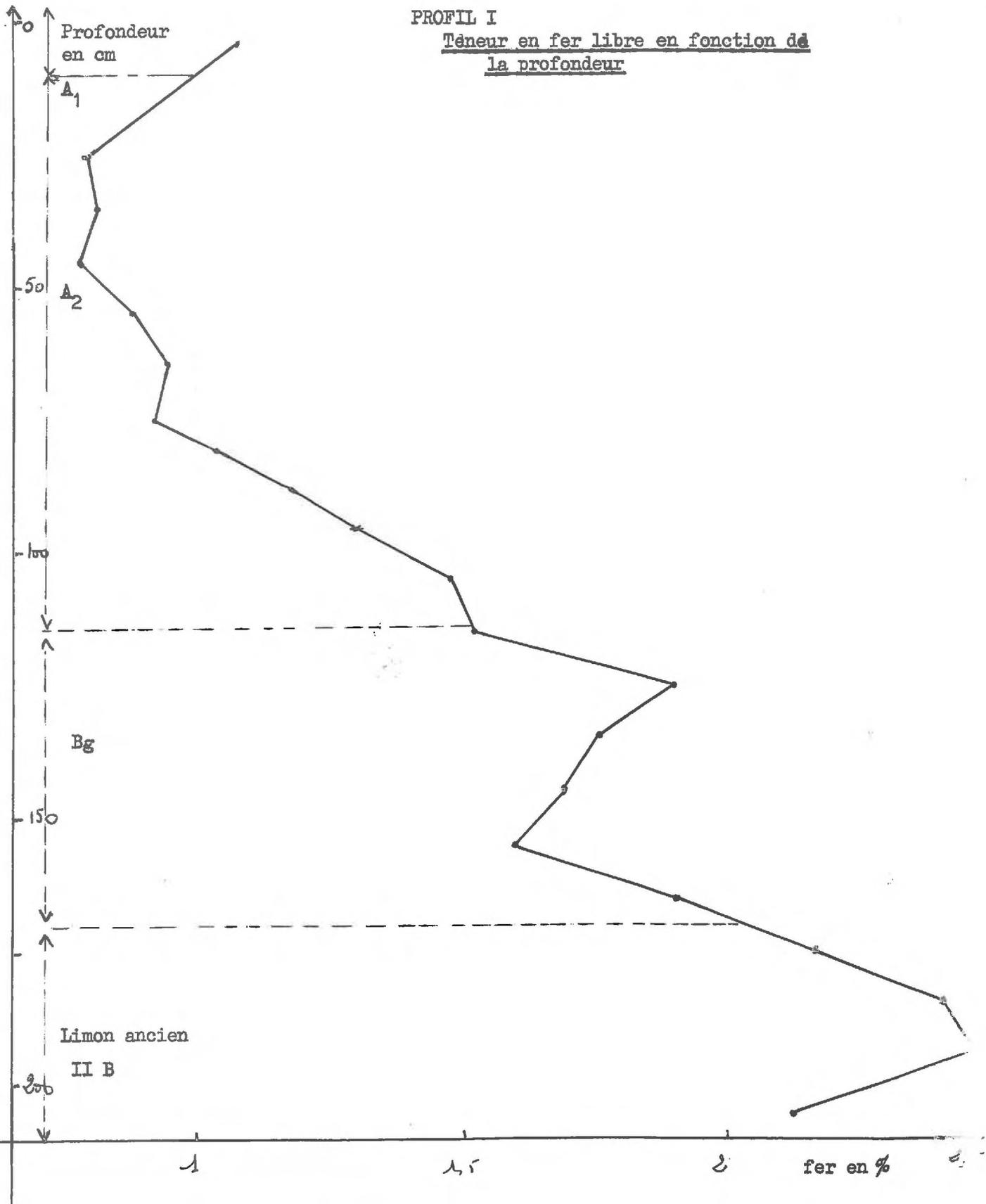
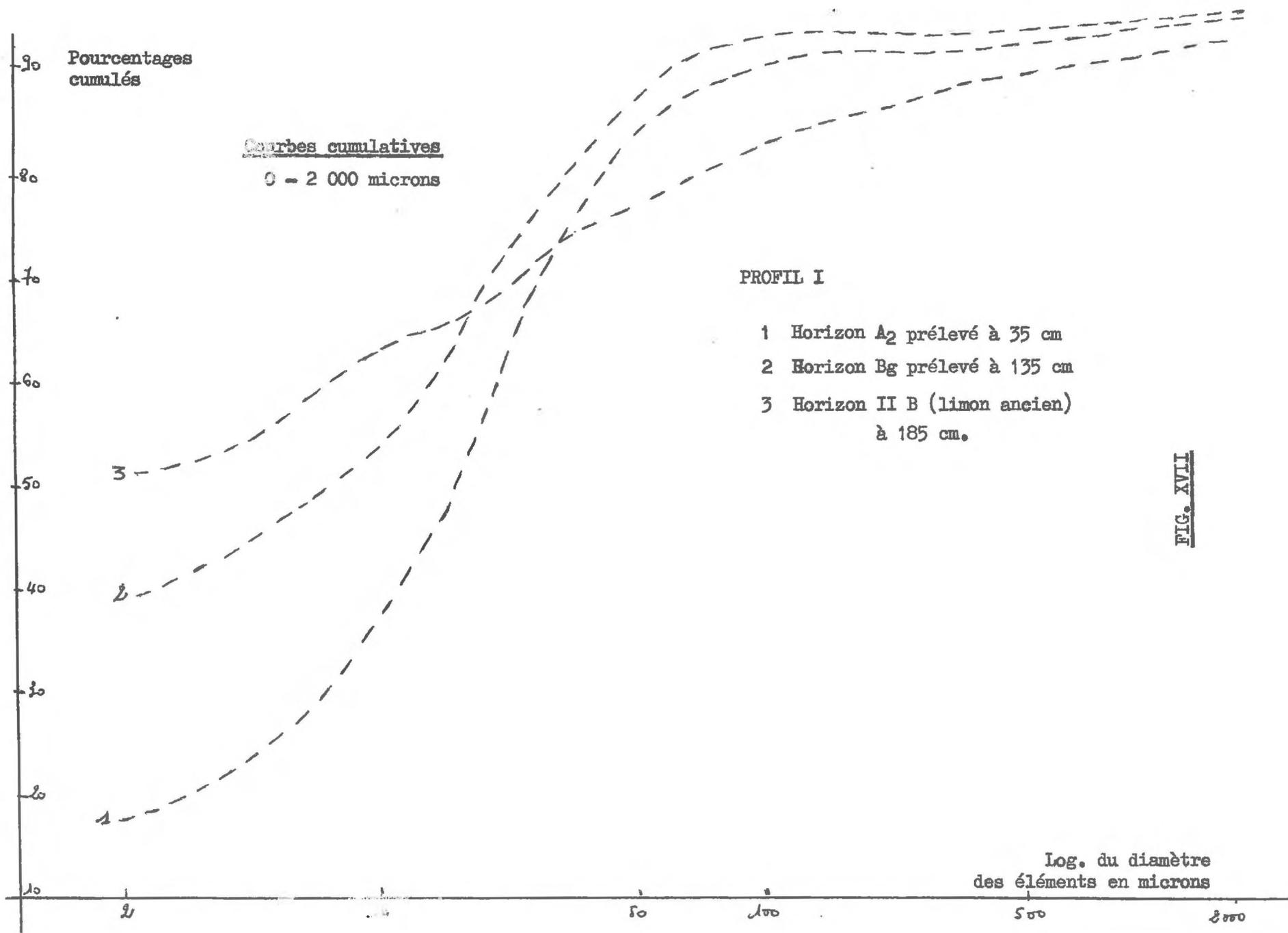


FIG. XVI



Pourcentages cumulés

Courbes cumulatives
0 - 2 000 microns

PROFIL I

- 1 Horizon A₂ prélevé à 35 cm
- 2 Horizon B_g prélevé à 135 cm
- 3 Horizon II B (limon ancien) à 185 cm.

FIG. XVII

Log. du diamètre des éléments en microns

La courbe cumulative du limon ancien recoupe les courbes des 2 horizons A_2 et B_g , ce qui semble indiquer un matériel différent (fig. XVII).

Une nouvelle confirmation de cette interprétation peut être obtenue en utilisant les 3 courbes cumulatives précédentes.

On peut en effet construire 3 nouvelles courbes cumulatives en ne tenant compte que des fractions comprises entre 2 et 2 000 microns. De cette façon on élimine l'argile.

Par ce procédé (fig. XVIII) on obtient la superposition presque parfaite des courbes des horizons A_2 et B_g . Par contre la courbe de l'horizon II B du limon rubéfié, ne se superpose pas aux 2 premières.

Il semble donc bien que les différences granulométriques observées entre les horizons A_2 et B_g soient uniquement dues au lessivage.

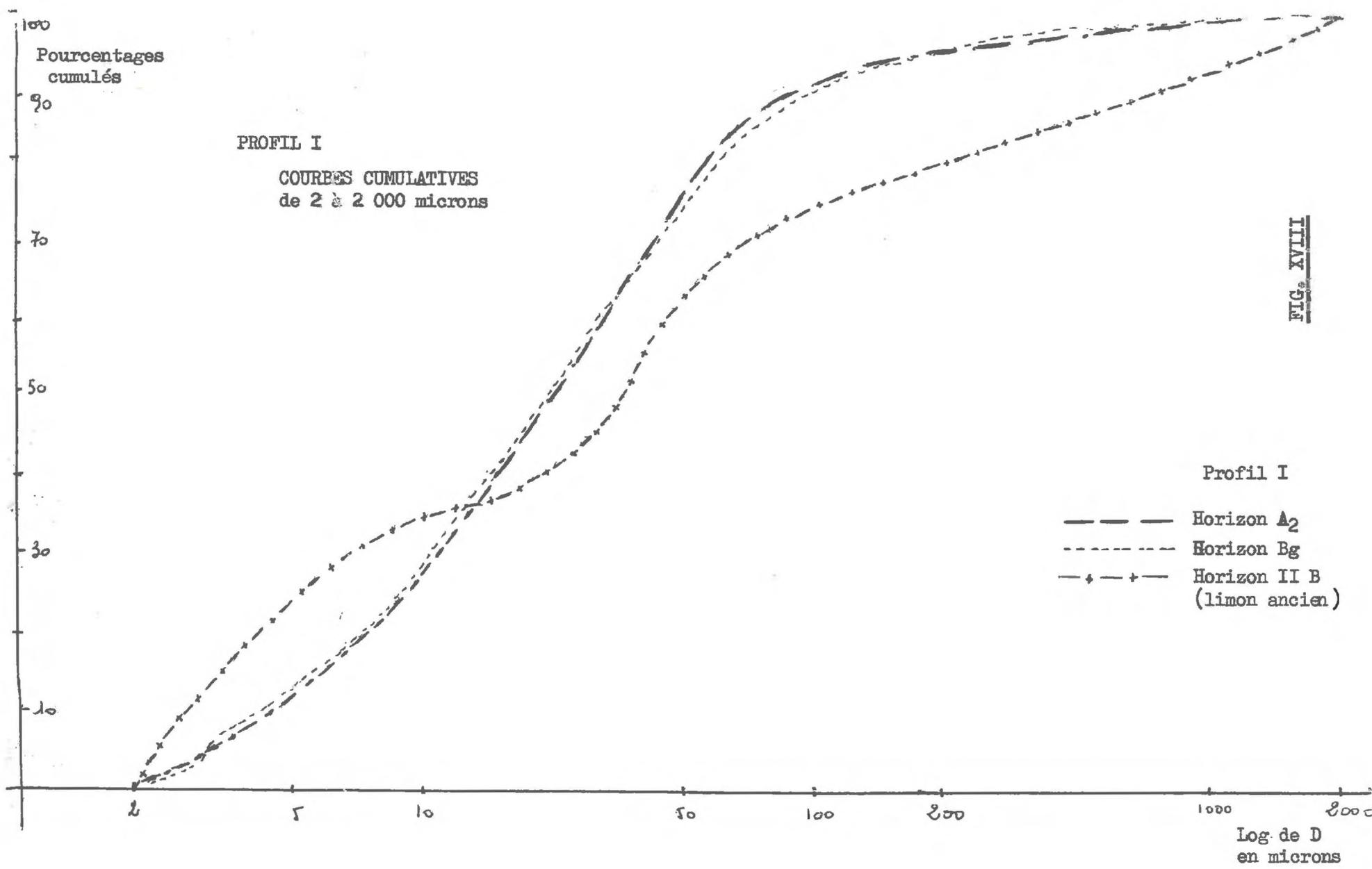


FIG. XVIII

II - PROFIL II

Ici, le limon ancien apparaît à une profondeur plus importante ce qui permet d'effectuer un bilan sur 210 cm.

Comme le précédent profil, on peut distinguer deux horizons : un horizon A_2 de 35 à 40 cm et un horizon B_g de 130 à 140 cm. Comme pour le profil 1, nous observons une disproportion entre les horizons lessivés et d'accumulation, mais cette fois au bénéfice de l'horizon B_g (fig. XIV et XX)

En effet, le limon ancien est suffisamment profond pour que l'horizon B_g puisse être mis en évidence sur toute son épaisseur.

Par contre, le très faible développement de l'horizon A_2 ne peut s'expliquer que par sa disparition partielle du fait de l'érosion

Enfin, si l'on compare les courbes du fer et de l'argile, il n'y a correspondance que dans leur partie supérieure.

A partir de 1 m et jusqu'à 2,30 m, le taux d'argile est constant en dépit de petites variations.

Le taux d'argile de l'horizon B_g proprement dit est identique à celui de l'horizon B/C. Il n'y a pas de "ventre" d'accumulation. Il est donc impossible de dire d'après la courbe de l'argile si la différence entre A_2 et B_g est due au lessivage.

Par contre, la courbe du fer libre montre ce "ventre" d'accumulation et, par conséquent, une différence entre B_g et B/C.

On peut attribuer l'absence de différence entre le taux d'argile des horizons B_g et B/C, soit à une accumulation diffuse sur une plus grande épaisseur que dans le cas du fer, soit à une légère hétérogénéité en profondeur du matériel initial. On peut également penser à une destruction d'argile en B_g mais le taux d'alumine libre étant constant dans tout le profil, il ne semble pas que ce fait ait pu jouer ici.

L'existence de ce "ventre" d'accumulation du fer libre permet cependant de penser que seul le lessivage intervient dans la différenciation des deux horizons A_2 et B_g .

Les courbes cumulatives correspondant à des prélèvements effectués à 15 cm (A_2) et 140 cm (B), le confirment.

Nous obtenons comme pour le précédent deux courbes superposées qui ne se chevauchent jamais. (fig. XXI)

Le bilan effectué en faisant abstraction de l'argile se traduit par le tableau suivant :

Tableau comparatif des limons et des sables

Horizons A₂ et B_g

	Lf	Lg	Sf	Sg	
A ₂	52	22	5,2	5,8	Pourcentage réel
B _g	39	15,5	2,9	3,1	
A ₂	60,1	25,9	6,1	6,8	Pourcentage corrigé
B _g	64,4	25	4,7	5	
Différence	+ 4,3	+ 0,9	+ 1,4	+ 1,2	

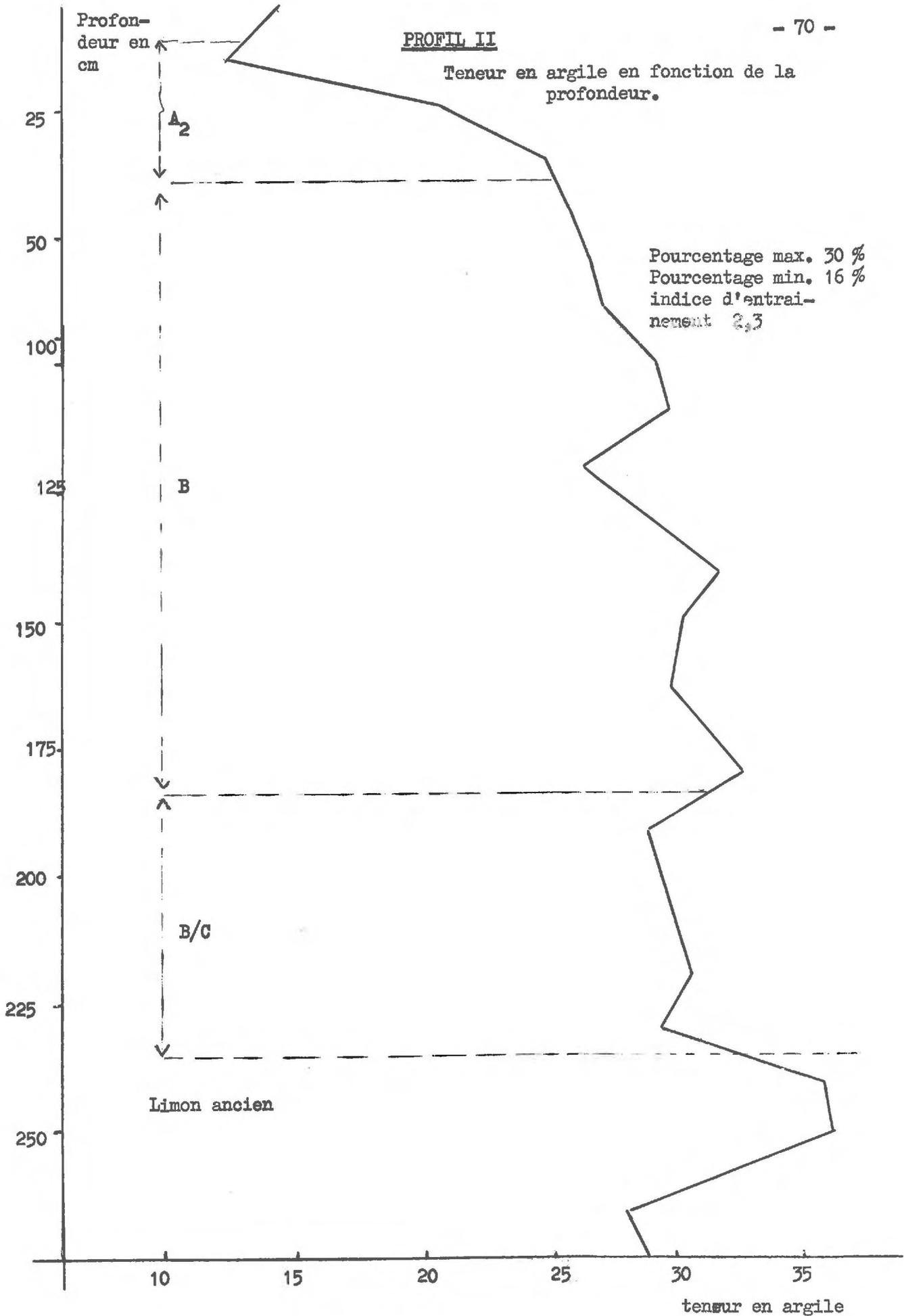
TABLEAU XII

La concordance est légèrement moins bonne que pour le profil I mais, néanmoins, elle est suffisante pour penser à l'identité initiale de la texture des 2 horizons*

De même, comme pour le profil n° I, les courbes cumulatives des horizons A₂ et B_g, effectuées de 2 à 2 000 microns donc sans tenir compte de l'argile, se superposent (fig. XXII) et permettent de conclure dans le même sens.

PROFIL II

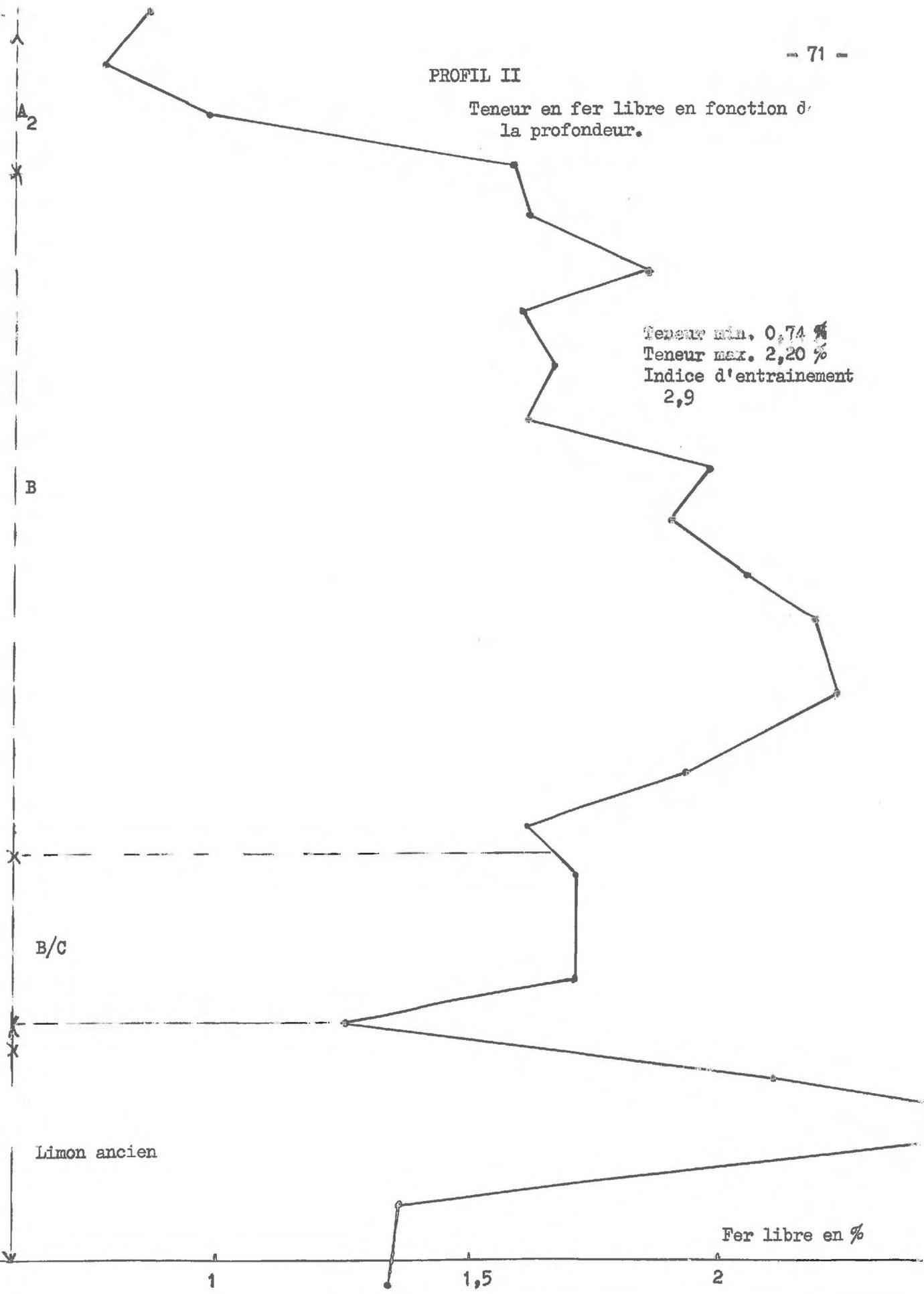
Teneur en argile en fonction de la profondeur.



PROFIL II

Teneur en fer libre en fonction de la profondeur.

Teneur min. 0,74 %
Teneur max. 2,20 %
Indice d'entrainement
2,9



Limon ancien

Fer libre en %

1

1,5

2

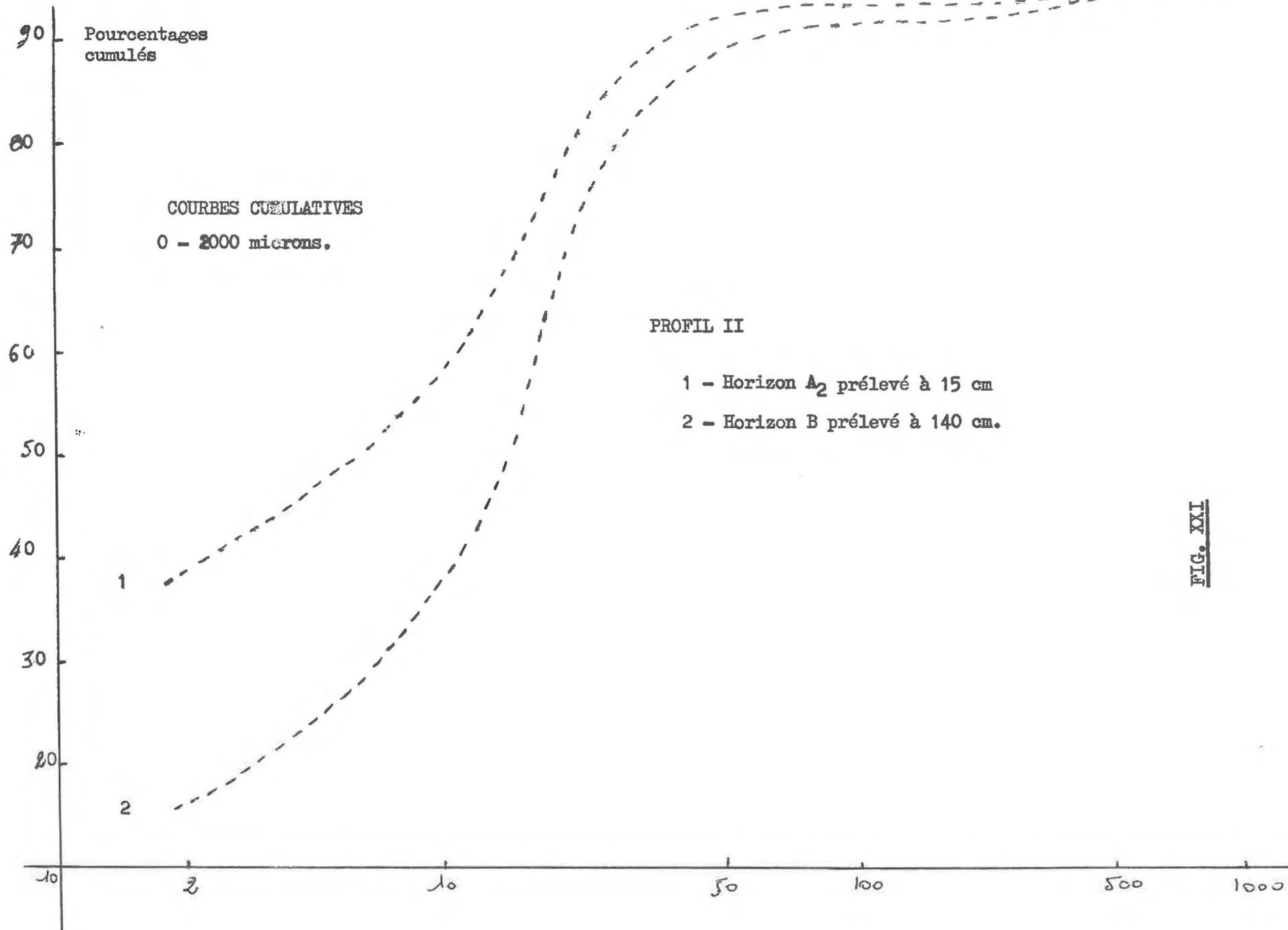


FIG. XXI

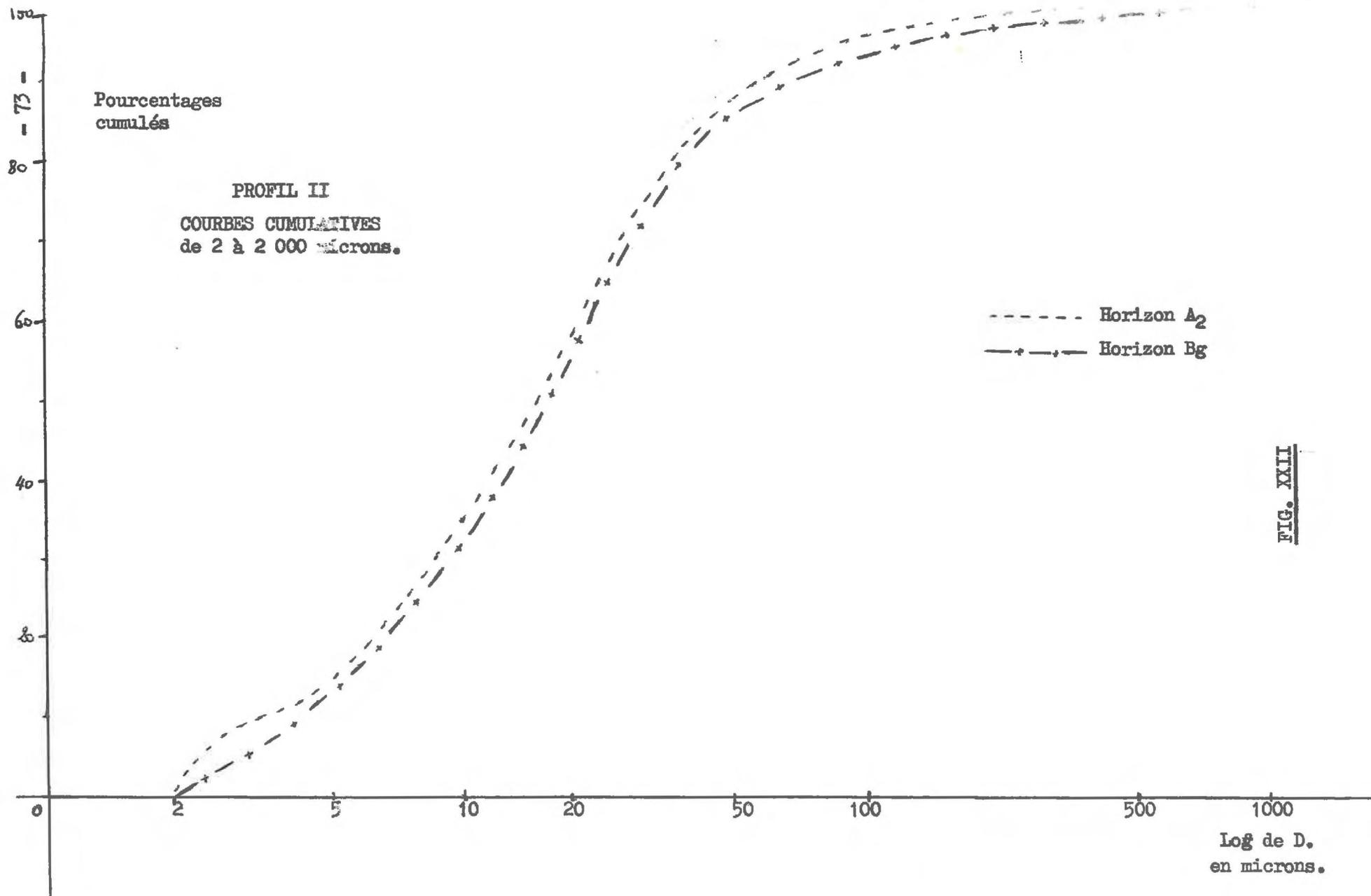


FIG. XXII

C - Superposition des Profils I et II

L'examen des courbes cumulatives des deux horizons A_2 et B_g des profils I et II montre qu'elles sont presque superposables deux à deux. Le matériel initial était donc identique au départ, et le lessivage a été égal en intensité dans les deux cas.

cependant, le résultat a été la différenciation de 2 profils dissemblables par l'absence de la partie inférieure en I, due à l'insuffisance d'épaisseur du limon, et par l'absence en II de la partie supérieure due à l'érosion.

Pour obtenir un profil complet, on peut donc essayer de superposer les profils I et II ;

L'utilisation des courbes de lessivage de l'argile ne donne guère de résultats, probablement du fait de la microhétérogénéité du limon initial.

Par contre, on peut supposer que la teneur en fer libre était initialement indépendante de la microhétérogénéité de la texture et constante sur toute l'épaisseur du limon.

La superposition des courbes du fer libre a été effectuée en faisant coïncider les parties correspondant aux horizons B et qui sont seules communes (fig. XXIII).
g

On obtient ainsi une courbe complète presque parfaitement symétrique par rapport à un axe correspondant à la teneur initiale en fer libre. On peut estimer cette teneur à 1,5 % en faisant la moyenne des teneurs maxima et minima observées en A_2 et B. Les 2 surfaces S_1 et S_2 sont ainsi presque égales.

On peut estimer aussi que la teneur initiale en fer libre était proche de la teneur minimum observée en B/C, c'est à dire 1,27 %.

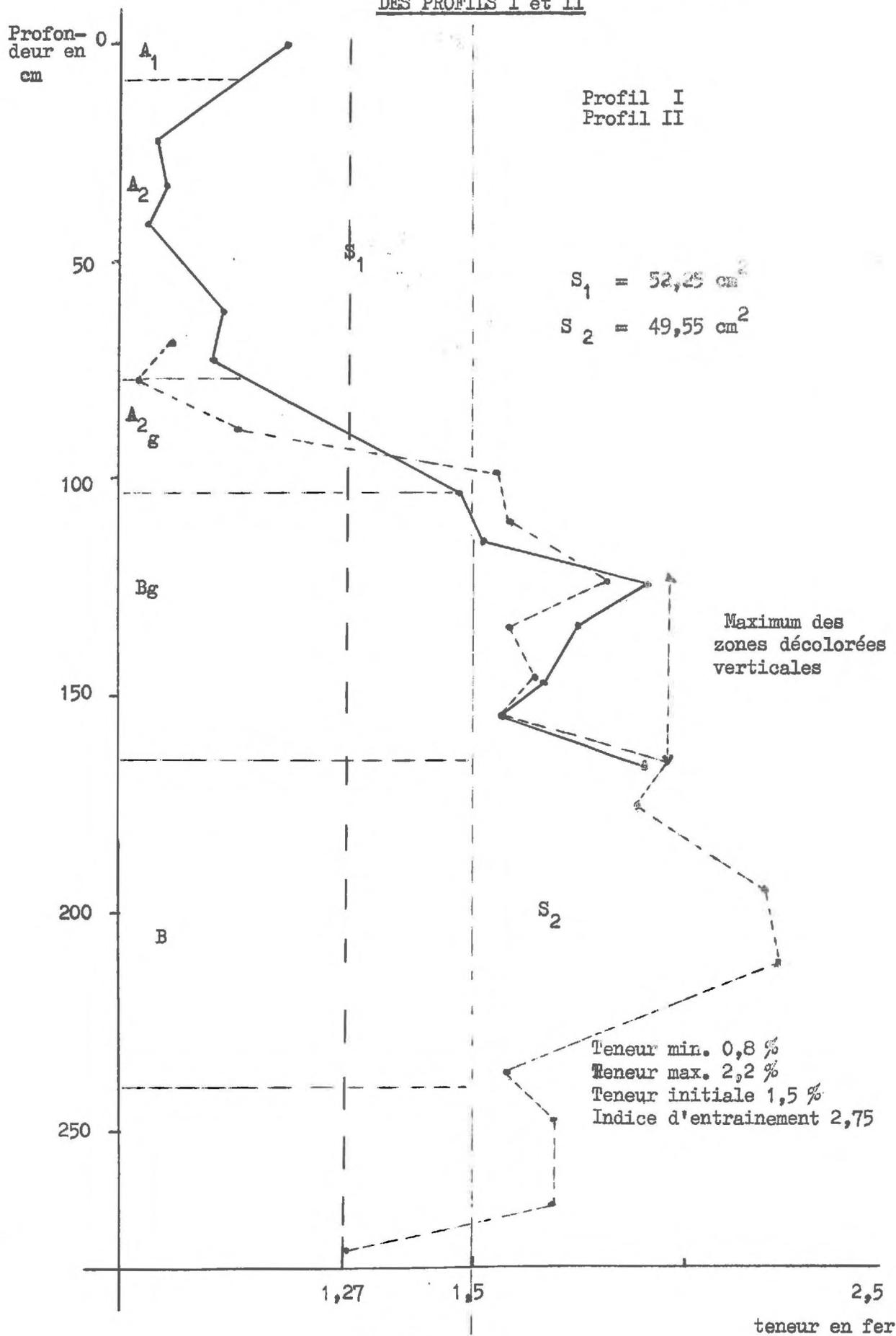
Dans ce cas, S_1 est très nettement inférieur à S_2 . Cette hypothèse peut être aussi valable que la première. En effet, si $S_1 = S_2$, il faut admettre que la pédogénèse s'est traduite uniquement par un lessivage du fer libre initial, sans libération nouvelle de fer libre.

Par contre, l'hypothèse $S_1 < S_2$ traduit un lessivage du fer libre initial, et du fer libre libéré secondairement, par altération des silicates dans les horizons supérieurs.

Cette courbe théorique du fer permet de concevoir un profil complet qui se serait ainsi développé sur 2,70m d'épaisseur, ce qui semble considérable. L'horizon A_2 aurait environ 1,20 m et l'horizon B 1,30 m à 1,40 m. L'indice d'entraînement du fer serait de 2,75 et celui de l'argile de 2,1 à 2,3.

Ce profil semble donc bien être celui d'un sol lessivé.

DES PROFILS I et II



D - Etude d'autres critères de lessivage

1 - Alumine libre

Un travail récent de DUCHAUFOR et SOUCHIER a montré que le critère de l'alumine libre pouvait servir à caractériser l'évolution physicochimique des profils.

Ces Auteurs admettent les teneurs moyennes suivantes en alumine libre :

- moins de 2 ‰ dans les sols bruns lessivés,
- 3 à 6 ‰ dans les sols bruns acides et les sols ocre-podzoliques,
- plus de 10 ‰ dans l'horizon B des podzols.

Pour les 2 profils étudiés, nous obtenons une teneur de 3 ‰ en alumine libre, ce qui place exactement ces sols entre les sols bruns lessivés caractérisés par une faible altération des silicates et un entrainement modéré de l'argile et de fer, et les sols ocre-podzoliques ou bruns acides caractérisés par une forte altération, véritable podzolisation chimique sans entrainement.

Dans les 2 profils I et II, la teneur en alumine libre étant constante dans tous les horizons, l'entrainement de cet élément est nul et la destruction d'argile observée dans certains cas par des Auteurs étrangers, inexistante.

2 - Enrobements

Dans les horizons B, les enrobements argileux sont très visibles. Les faces des polyèdres ont été prélevées par grattage et les pellicules ainsi obtenues soumises à l'analyse granulométrique.

A l'endroit du prélèvement, le taux d'argile moyen était de 30 ‰ environ, celui des pellicules obtenues par grattage de 48 ‰. La différence, bien que significative, est faible car les enrobements semblaient uniquement constitués d'argile. Malgré la grosseur des unités structurales à chaque grattage, on devait enlever non seulement les enrobements mais aussi une partie du limon non enrichi.

Il est également possible qu'il y ait eu un entrainement purement mécanique, des limons fins, dans les fentes de dessiccation.

3 - Humus

L'humus de ces deux sols est en accord avec les caractères de lessivage intense.

Il est du type mull moder pour le profil I, avec un C/N élevé de 17,8 et un Ph de 4,4.

Le cas du profil II est un peu différent. L'hydromorphie plus proche de la surface a modifié l'horizon organique en augmentant le C/N qui est de 22,3 et en abaissant le Ph qui est de 3,8.

IV - MODIFICATIONS DUES A L'HYDROMORPHIE

Il semble donc que la différenciation d'un horizon limoneux reposant sur un horizon limono argileux soit la conséquence d'un lessivage particulièrement important.

Actuellement, le caractère de sol lessivé est masqué par l'hydromorphie qui a provoqué des modifications importantes dans le profil. La partie supérieure de l'horizon B présente un réseau de bandes verticales blanches, diminuant de densité avec la profondeur, pour disparaître à peu près complètement en B/C.

Le fer a à peu près entièrement disparu de ces bandes, par migration latérale.

Indice d'entraînement local	:	12
partie blanche	:	0,30
partie rouille de bordure	:	3,40

Chiffres empruntés à Ph. DUCHAUFOR : "Description et Analyse du Pseudogley - Tableaux analytiques des sols".

Ces caractères d'hydromorphie, décrits par PLAISANCE sous le nom de marmorisation contrastée, caractérisent l'horizon B_g.

Si des migrations latérales du fer se produisent au niveau des bandes verticales, on peut penser que l'hydromorphie provoque également des migrations verticales secondaires surimposées aux migrations antérieures dues au lessivage.

Examinons en effet la courbe théorique de lessivage du fer obtenue par superposition des courbes des profils I et II.

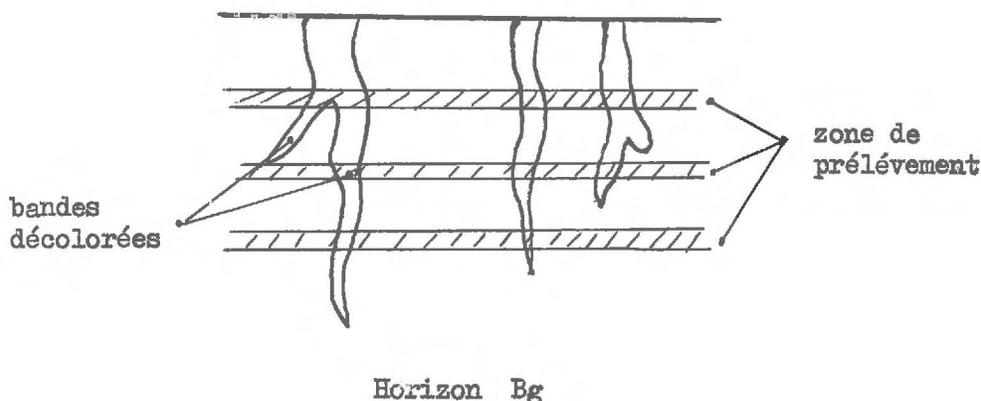
On constate, aussi bien pour les profils I et II, au niveau maximum des bandes décolorées, une diminution de la teneur en fer libre sur 40 cm environ. Cette diminution peut s'expliquer de différentes manières.

- On peut supposer qu'il y a eu, soit migration ascendante, soit migration descendante du fer. L'allure de la courbe ne permet pas de trancher.

- D'autre part au niveau du plancher imperméable, les oxydes de fer et de manganèse précipitent mutuellement, et constituent de petites concrétions. Le fer immobilisé dans ces concrétions n'est probablement pas extrait lors de l'extraction par la méthode DEB. On peut donc estimer, que cette diminution de la teneur en fer libre au niveau du plancher de la nappe peut être due à la formation de concrétions d'oxydes de fer et de manganèse.

- Enfin on peut avancer une troisième explication. Au niveau où l'on observe cette diminution de la teneur en fer libre, du fait de la présence de nombreuses bandes décolorées, cette teneur en fer libre est très variable. On peut supposer qu'à ce niveau donc, les échantillons n'étaient pas représentatifs et qu'accidentellement pour les 2 profils les parties décolorées ont été prélevées en quantité supérieure à la réalité.

Cependant comme les prélèvements ont été effectués dans un plan horizontal sur une faible épaisseur, et comme d'autre part six échantillons accusent cette diminution de la teneur en fer libre, on peut en grande partie éliminer cette dernière explication.



Enfin l'hydromorphie provoque dans l'horizon A_2 , qui devient alors A_{2g} , des migrations et des reprecipitations de fer très localisées. En A_{2g} on observe en effet une couleur générale de plages pâle, identique à celle de l'horizon A_2 initial et parsemée de plages gris clair (10 à 20 %) d'où le fer a en partie disparu, de plages jaune rouille (20 à 25 %), où le fer a migré et de taches franchement rouille (2 à 5 %), surtout à la partie inférieure de l'horizon A_{2g} . Par opposition à la marmorisation contrstrée de l'horizon E, PLAISANCE a appelé ce phénomène "marmorisation fine".

V - GENESE DES SOLS A PSEUDOGLEY

En utilisant les résultats obtenus par cette étude, et les données des différents auteurs ayant étudié les pseudogleys, données exposées dans le Précis de Pédologie de P. DUCHAUFOUR, nous pouvons essayer de décrire les différents processus qui ont abouti à la formation de ces sols à pseudogley observés dans le massif.

Dans un premier temps le lessivage provoque la formation d'un horizon d'accumulation, qui devient progressivement imperméable.

En période de pluie, au dessus de cet horizon imperméable, se forme une nappe perchée temporaire.

En période de sécheresse, elle disparaît. L'horizon B, du fait de sa forte teneur en argile doit présenter des fentes de dessiccation.

L'eau de la nappe perchée pénètre préférentiellement en B par ces fentes de dessiccation, puis à partir de ces fentes, réhumecte la masse de l'horizon B entraînant le fer par l'intermédiaire de matières organiques réductrices (Etude de BETREMIEUX, HENIN, BLOOMFIELD, LOSSAINT), le fer reprecipitant en bordure des fentes.

En effet, si l'on observe en plan horizontal le système des bandes décolorées verticales de l'horizon B_g , on s'aperçoit qu'elles constituent un réseau polygonal tout à fait semblable à celui formé par les fentes de dessiccation dans un matériel argileux asséché, d'où cette idée que les veines décolorées correspondent à des fentes de dessiccation.

On observe souvent la présence de racines dans ces zones décolorées. Il est fort probable qu'elles n'ont pas de rôle dans la formation de ces bandes verticales et que leur présence est simplement dûe au fait que les fentes de dessiccation constituent des zones de passage préférentielles pour les racines.

L'existence d'une nappe perchée temporaire doit également être la cause de la marmorisation floue de l'horizon A_{2g} . Dans cet horizon non structuré, donc parfaitement homogène, l'eau chargée de matières organiques réductrices se répartit de manière uniforme et provoque des migrations localisées de fer sans direction préférentielle.

Ainsi, pour les sols de Sainte-Hélène, on peut admettre que la marmorisation de l'horizon B et celle de l'horizon A_2 sont les conséquences d'un seul et même phénomène, l'imperméabilisation de l'horizon B par lessivage.

Ces deux types de marmorisation ne sont donc pas d'âge différent.

On peut d'autre part estimer que l'intensité de marmorisation est sous la dépendance de 2 facteurs : l'érosion et la végétation.

Dans la quasi totalité du Massif, l'érosion a enlevé une grande partie de l'horizon A_2 ce qui a pour conséquence.

- de rapprocher le niveau de la nappe de la surface,
- d'augmenter sa durée et sa hauteur, le volume du sol où se répartit l'eau étant moindre.

Si l'on compare les profils I et II, on constate que dans le 1er cas la marmorisation, aussi bien de B_g que celle de A_{2g} , est moins marquée que dans le cas du profil II.

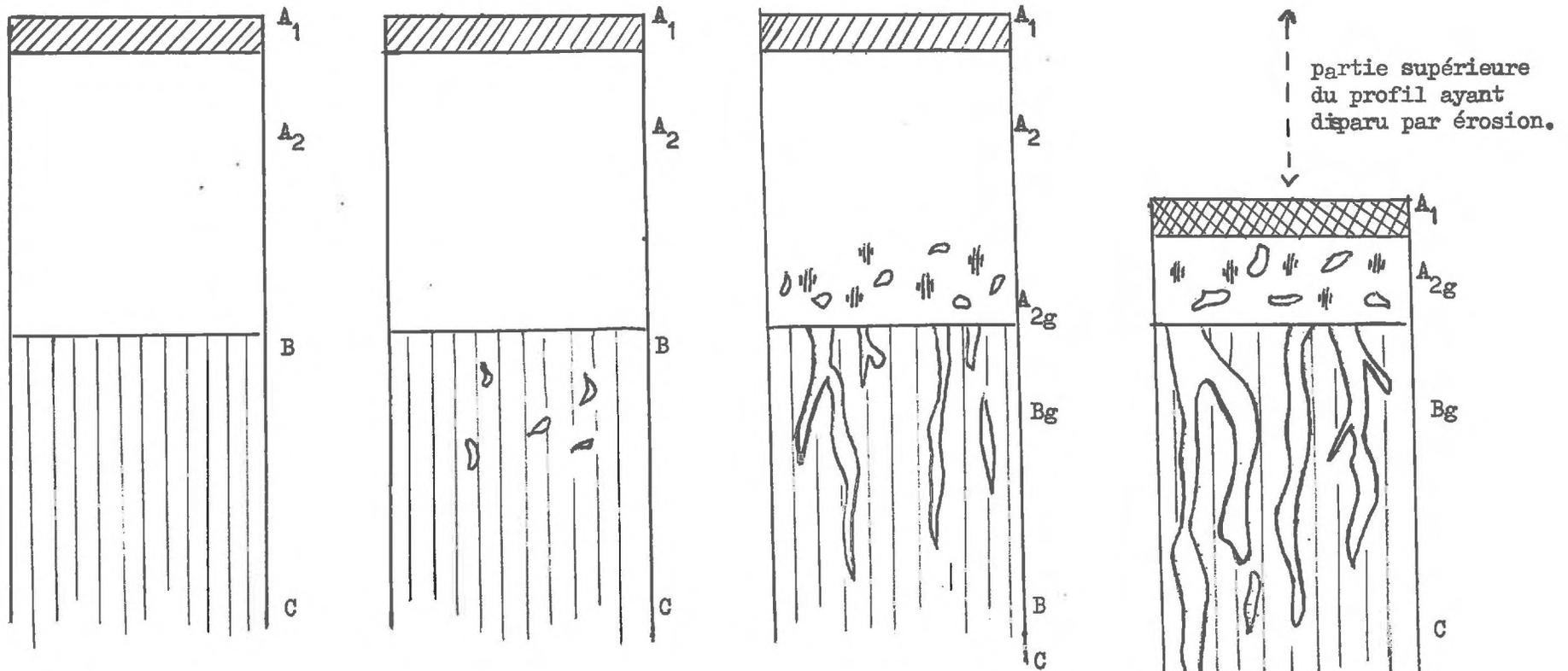
Il existe des profils où l'horizon B_g est situé à 30 cm de la surface et où, par conséquent, l'érosion a été plus important. La marmorisation est nettement plus marquée que dans le cas des profils I et même II ; en B_g , trainées verticales décolorées plus nombreuses et plus profondes, en A_{2g} , migrations et reprécipitations de fer plus abondantes.

La végétation ligneuse intervient en pompant une grande quantité d'eau et en interceptant une partie des eaux de pluies. Son élimination au profit d'une végétation herbacée produira le même effet que l'érosion de l'horizon A_2 , c'est à dire une augmentation de la réduction et de la migration du fer .

Mais il est difficile de penser que la disparition de cette végétation ligneuse puisse provoquer la remontée de l'horizon B_g puisque cet horizon n'existe que du fait de la présence d'un niveau argileux.

EVOLUTION D'UN SOL LESSIVE VERS UN

PSEUDOGLEY A NAPPE PERCHÉE =



sol lessivé

sol lessivé marmorisé
Ségrégation du fer sur
les faces des unités
structurales - Absence
de A_{2g}

sol lessivé à pseudogley
Apparition d'un horizon
A_{2g}

Pseudogley à nappe perchée
Absence de A₂ - hydromorphie
dès la surface.

VI- DIFFICULTES DE CLASSIFICATION

La cartographie a montré l'existence sur tout le placage limoneux de sols lessivés à pseudogley ayant un horizon A_2 d'épaisseur variable, comprise entre 30 et 120 cm. Cette différence ne s'explique que par l'action de l'érosion.

Tous ces sols ont donc subi quel que soit leur aspect actuel, une évolution première identique. Secondairement, ils ont tous acquis des caractères d'hydromorphie dont l'intensité varie avec le degré d'érosion.

Les sols très érodés sont hydromorphes dès la surface :

- l'horizon A_1 est en général un moder hydromorphe ; l'horizon A_{2g} commence immédiatement sous l'horizon A_1 ;
- le profil est $A_1 A_{2g} B_g$.

Les caractères d'hydromorphie apparaissent ensuite de plus en plus profondément, l'horizon A_{2g} étant séparé de l'horizon A_1 par l'horizon A_2 non modifié.

Nous passons donc progressivement d'un sol appartenant à la classe des sols hydromorphes, et au groupe des pseudogleys à nappe perchée, à un sol appartenant à la classe des sols à mull et au groupe des sols lessivés.

La limite entre les 2 classes ne peut être qu'arbitraire. Il a été décidé ici d'utiliser comme critère l'apparition de l'horizon B_g à moins de 40 cm ce qui correspond à peu près à l'existence de phénomènes de réduction directement sous l'horizon A_1 .

On aboutit à mettre deux sols ne présentant que de faibles différences, ayant subi une pédogénèse absolument identique, et ne différant que par une érosion un peu plus intense, dans deux classes différentes.

On arrive à hésiter pour savoir si tel sol appartient à la classe des sols hydromorphes, ou à celle des sols à mull, et même à les changer de classe selon que l'on adopte 30 ou 40 cm pour la profondeur de l'horizon B_g .

Il est néanmoins certain, qu'à partir d'un certain degré, ce sont les caractères d'hydromorphie qui dominent et qui bouleversent, non seulement les propriétés physiques, mais également les propriétés chimiques. Il est intéressant de noter la dégradation du complexe absorbant de l'horizon B avec l'accentuation de l'hydromorphie.

TAUX DE SATURATION EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE L'HORIZON B_g

	B _g à 120 cm A	B _g à 45 cm B	B _g à 30 cm C
A ₁	35	14,2	5,3
A _{2g}	32,5	11,6	5,5
B _g	30	21	12,1
B		38,8	
C		42	

TABLEAU XIII

Initialement, en B le taux de saturation était de 38 à 40 %. Il passe à 30 % quand l'horizon de pseudogley est peu marqué, puis à 20 % environ quand l'hydromorphie se rapproche de la surface, alors qu'en B il est toujours élevé. Enfin, dans le cas du pseudogley véritable, ce taux de saturation est passé à 12 % en B_g.

VII - SOLS A PSEUDOGLEY A DEUX COUCHES GEOLOGIQUES

I. N. R. A.
STATION D'AGRONOMIE
D^{ns} St-Paul - 91140 MONTEAUVET

L'étude des deux profils précédents, et la comparaison des nombreux sondages avec ces 2 profils, permettent d'attribuer au lessivage la formation de la quasi totalité des horizons de pseudogley.

Cependant, si cette conclusion peut être généralisée à 95 % pour le Massif de Sainte Hélène, il existe quelques cas où cette conclusion n'est plus valable.

Nous avons vu, dans l'étude des profils I et II qu'il existait en profondeur un limon rubéfié plus riche en argile que les horizons supérieurs.

En bordure du placage limoneux, les limons récents sont peu épais et soliflués. Du fait de cette faible épaisseur si les limons rubéfiés existent encore, nous allons observer deux horizons superposés, l'un limoneux, l'autre limono-argileux imperméable, présentant des marbrures décolorées verticales.

Morphologiquement le profil a l'aspect de celui d'un sol lessivé à pseudogley, mais génétiquement il est totalement différent.

Un tel sol a été observé en un seul endroit sur un front de carrière (C4 parcelle 4).

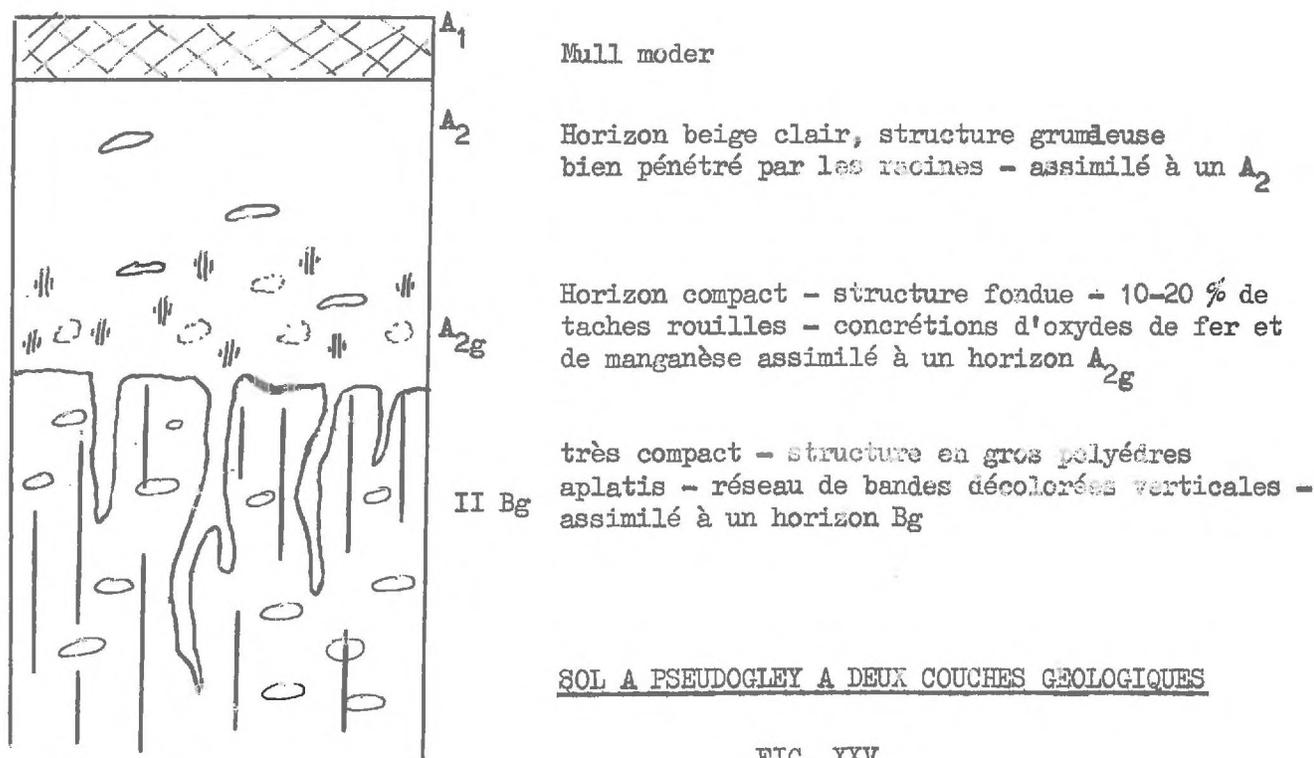


FIG. XXV

Analyse : Sol à pseudogley à deux couches géologiques

	Ph	C %	M.O. %	N %	C/N	K m.e./100g	Ca m.e./100g	P ₂ O ₅ ‰	Fe %
(A ₂)	4,6	0,88	1,50	0,05	17,6	0,12	0,28	0,02	0,99
(A _{2g})	5,4	0,16	0,25			0,12	0,44	0,12	1,15
II B _g	5,3	0,23	0,40			0,20	1,03	0,15	2,60

Diamètre des éléments en microns	A 0-2	Lf 2-20	Lg 20-50	Sf 50-200	Sg 200-2000
(A ₂)	18,4	44,5	24,1	3,6	6,1
(A _{2g})	23,2	45,8	21,3	3,4	4,4
II B _g	51	22,5	15,8	4,0	7,6

TABLEAU XIV

L'analyse ne met pas en évidence l'hétérogénéité de ce profil. Si on considère en effet les teneurs en fer et en argile des différents horizons, on pourrait parfaitement conclure au lessivage.

Cependant jamais dans les limons récents même enrichis en argile par lessivage, une teneur en argile supérieure à 50 % n'a été observée, alors qu'elle est courante dans les limons rubéfiés.

Il en est de même pour la teneur en fer libre qui au maximum atteint 2,2 % dans les horizons B développés sur limons récents alors que dans ce profil la teneur en fer libre est de 2,6 %.

La teneur en P_2O_5 assimilable de 0,15 % est également un indice d'hétérogénéité : la teneur en P_2O_5 assimilable des limons récents ne dépasse que très rarement 0,10 %.

Enfin si nous effectuons les courbes cumulatives de 2 à 2 000 microns (fig. XXVI) donc en éliminant l'argile, nous constatons que les courbes des deux premiers prélèvements coïncident, alors que celle de l'horizon II Bg, diffère notablement des deux premières, au moins dans sa partie supérieure.

C'est surtout l'observation du profil en place qui est l'argument essentiel : il y a manifestement deux couches qui diffèrent par leur degré de solifluxion. La couche ancienne est nettement plus chargée en cailloux que la couche supérieure.

Enfin des traces de rubéfaction sont encore visibles dans la couche inférieure, correspondant à l'horizon II Bg.

À la tarière, il est impossible de distinguer un tel sol d'un véritable sol lessivé à pseudogley, mais il est très probable que ces pseudogleys à deux couches géologiquement différentes, sont peu fréquents. Leur existence n'est possible qu'en bordure du placage limoneux, là où les limons récents sont très peu épais ; d'autre part, les limons anciens ont une faible extension et sont souvent réduits à des poches.

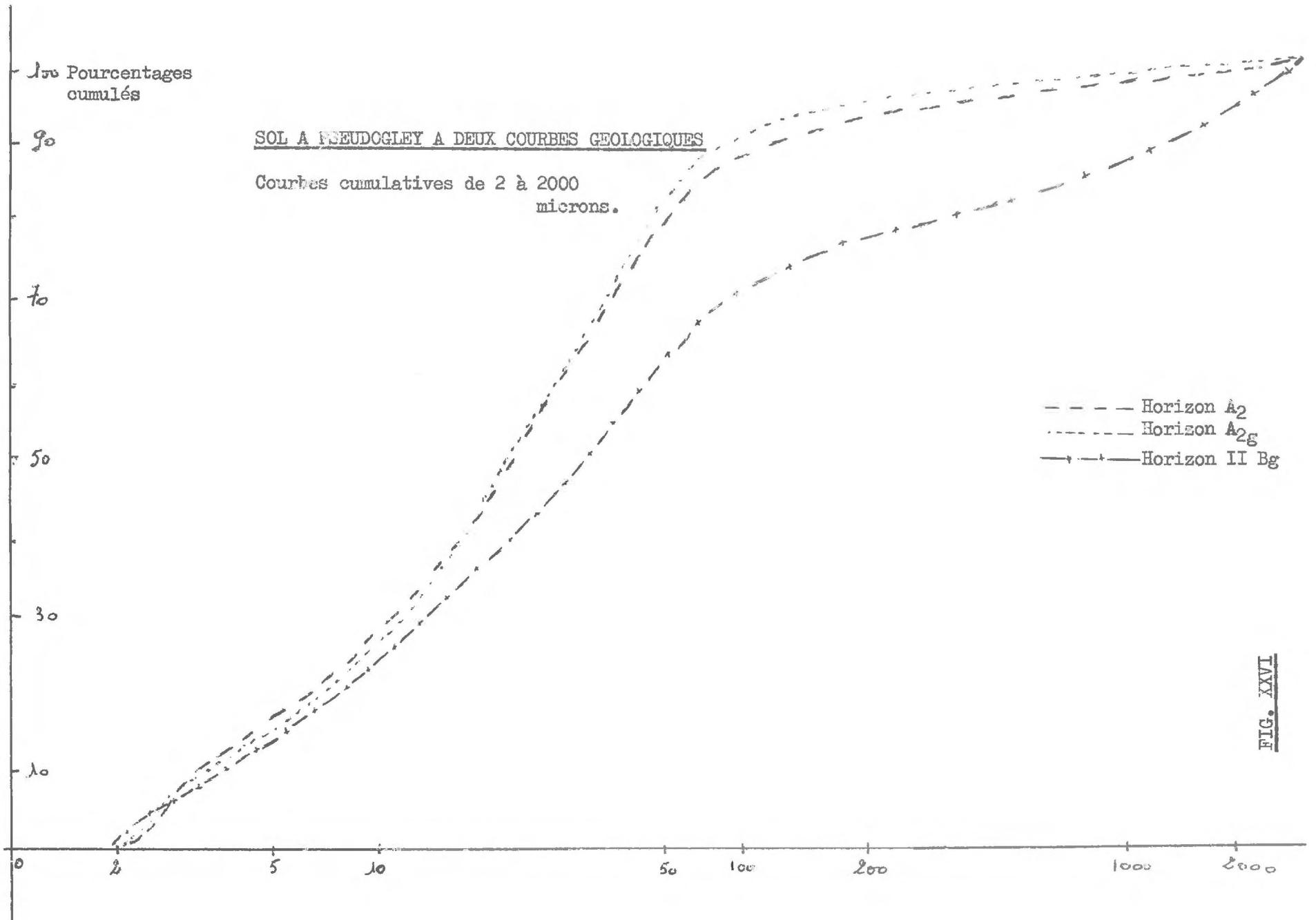


FIG. XXVI

CHAPITRE II - LES PHENOMENES PEDOLOGIQUES DANS LE TEMPS

Très rapidement l'étude systématique du Massif a montré que, seule l'existence de plusieurs pédogénèses successives, pouvoit expliquer certains caractères difficilement compréhensibles, comme par exemple, la fréquence des formations rubéfiées.

Il est possible de distinguer avec certitude 3 périodes précédées probablement par une autre plus ancienne et plus difficilement identifiable.

I - RUBEFACATION DES ALLUVIONS ANCIENNES

L'ensemble des alluvions anciennes présente une couleur rouge brique constante quelle que soit la profondeur. Les cailloux roulés sont souvent enrobés de pellicules d'oxyde de fer qui peuvent aussi cimenter entre eux les éléments de toutes les grosseurs.

Aucun horizon pédologique proprement dit n'est visible dans les différentes carrières, bien qu'il soit peut être possible de distinguer à la partie supérieure de ces alluvions une zone un peu plus rubéfiée.

L'absence de véritables horizons et la présence d'une rubéfaction intense sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur semblent indiquer que ces alluvions n'ont pas été soumises à une pédogénèse de climat chaud après avoir été mises en place. La rubéfaction se serait donc produite antérieurement au dépôt sur un matériel repris ensuite par un cours d'eau.

Rien ne permet de dater ces alluvions. Cependant, en France, des dépôts identiques rubéfiés sont fréquents et sont habituellement attribués à la fin du pliocène.

II - SOLS ROUGES SUR LIMONS ANCIENS

Le placage limoneux recouvrant les alluvions anciennes s'est constitué en deux temps. On peut en effet distinguer deux couches superposées ayant chacune été soumises à l'action de deux climats différents.

La couche la plus ancienne n'existe plus que par lambeaux et le plus souvent ne s'est conservée que dans des poches assez localisées. Elle se distingue facilement par sa couleur rouge brique très semblable à celle des alluvions, alors que le limon supérieur est de couleur ocre.

Dans la carrière de Saint-Gorgon, une poche de limons anciens est bien conservée ainsi qu'un sol à peu près complet développé à la partie supérieure de ces limons. Ce sol n'est pas recouvert à cet endroit par le second placage limoneux qui a été enlevé par l'érosion. Il existe seulement, juste au dessus du sol fossile, un colluvium de pente limono-sableux.

Trois horizons sont visibles : un horizon lessivé (II A₂), un horizon d'accumulation rouge brique (II B) et un horizon (B/C) beige rouge. L'horizon organique a disparu et probablement une partie de l'horizon A₂.

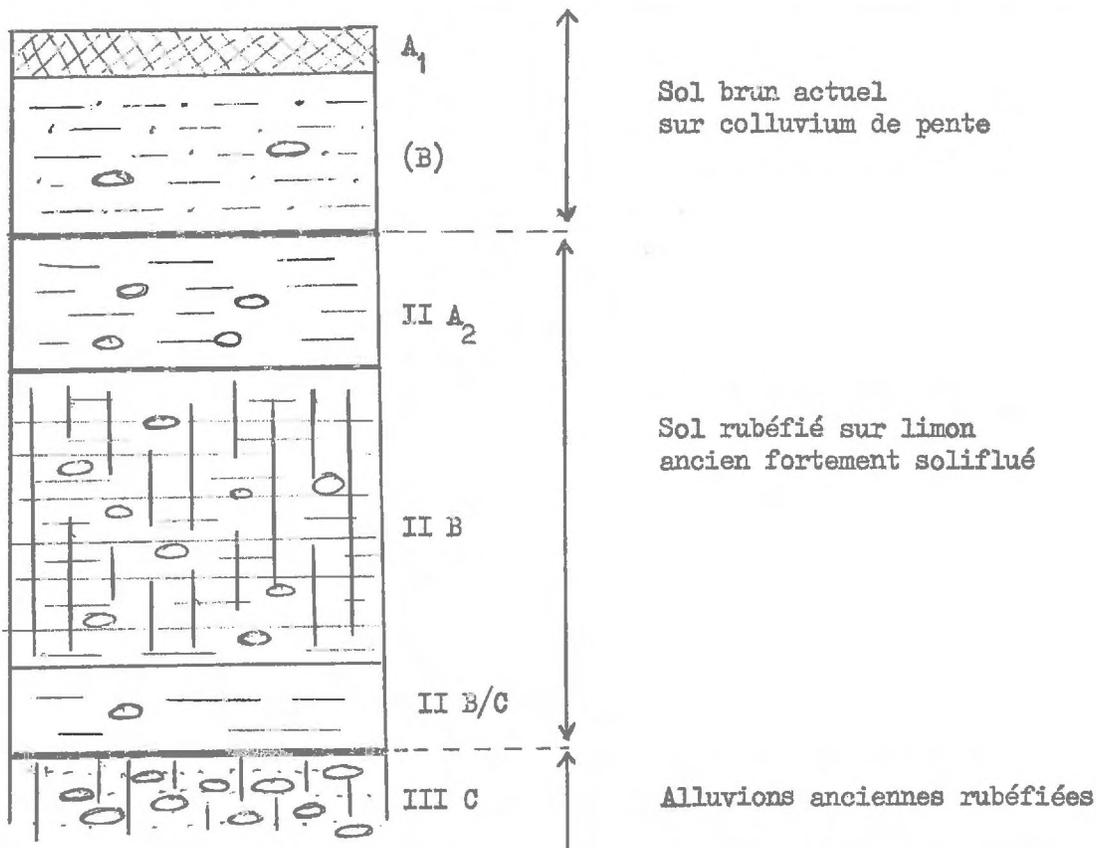


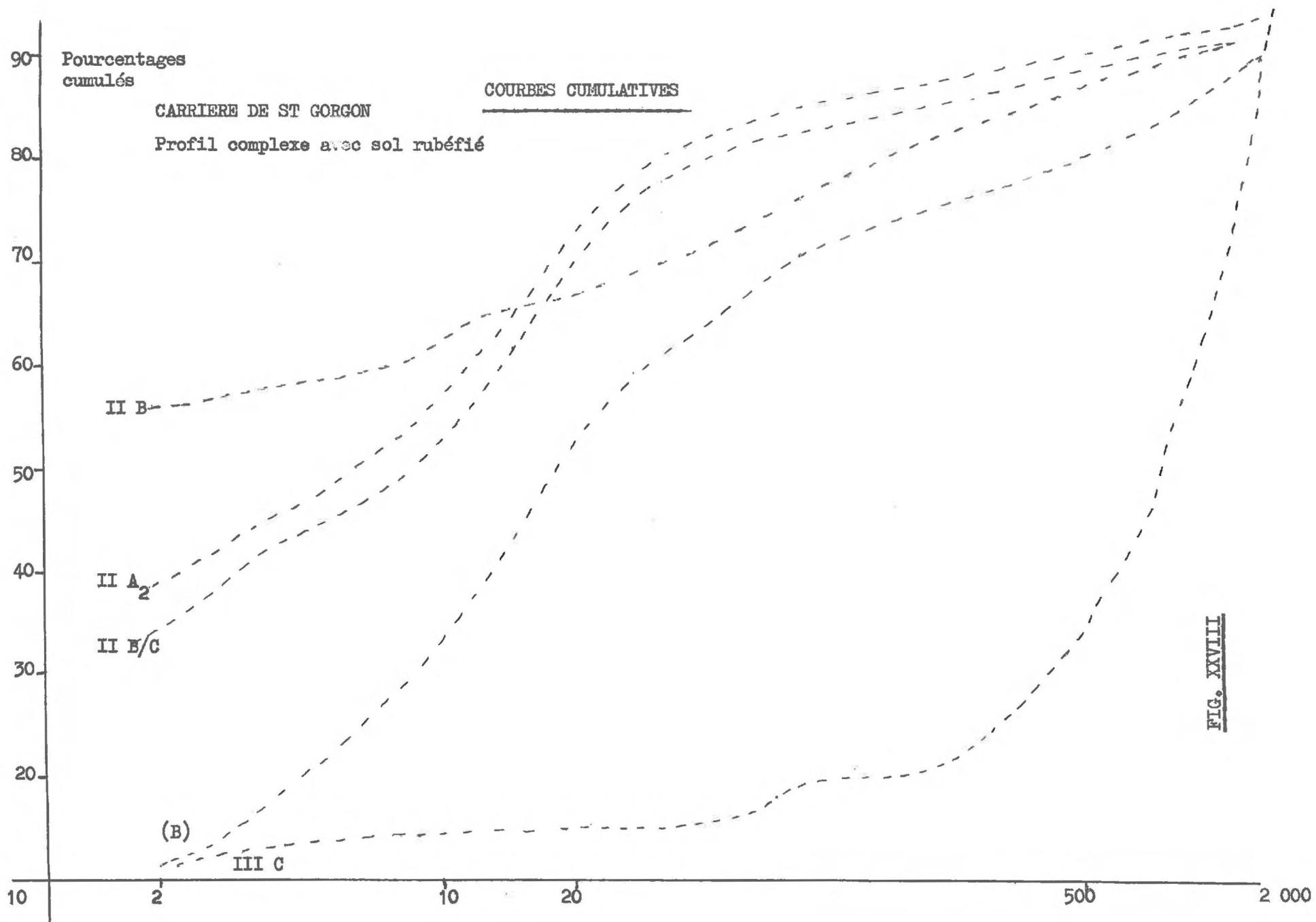
FIG. XXVII

A - Description

A ₁ 0 - 5 cm	:	Mull Moder	} Sol brun actuel sur colluvium de pente
(B) 5 - 45 cm	:	Limons sableux très meubles. Structure finement grumeleuse. Enracinement très abondant. 10 à 15 % de cailloux roulés. 10 YR 6/4 - (brun jaune clair) - <u>Transition brutale</u> avec l'horizon sous-jacent.	
II A ₂ 45 - 85 cm	:	Structure polyédrique très irrégulière unités de 5 à 8 mm. Très compact. Nombreux canalicules. Couleur générale 5 YR 5/8 (rouge jaune) - 40 % de plages plus claires 5 YR 6/8. Pas de clay-skin Rares cailloux roulés	} Sol fossile sur limons anciens
II B 85 - 150 cm	:	Structure polyédrique à tendance lamellaire. 30 % de cailloux présentant une patine ferrugineuse ainsi que des unités structurales. Clay-skins visibles. Rares canalicules. 2 5YR 4/6 (rouge)	
II B/C	:	Structure polyédrique tendant à devenir nuciforme. Quelques enrobements. 1 à 2% de cailloux roulés. Existence de canalicules. Teinte générale 7 5YR 5/8 (brun) 30 % de plages 2 5YR 4/8 (rouge). Transition brutale avec les alluvions	
II C	:	Alternance de lits sableux et de lits sableux à 70 % de cailloux roulés. 5 YR 5/8 (rouge jaune)	} Alluvions rubéfiées.

B - ANALYSE

Voir page suivante



CARRIERE DE St GORGON

Analyse :

Profil complexe avec sol rubéfié

	Ph	T m.e.	K m.e.	Ca m.e.	Mg m.e.	Na m.e.	S/T	Al.libre ‰	Fe libre %	Fe total %	<u>Fe libre</u> <u>Fe total</u>
(B)	4,4	6,25	0,15	0,05	0,02	0,02	0,04	2,7	0,92	1,68	0,54
II A ₂	4,9	13,5	0,16	1,5	1,5	0,05	23,3	3,4	2,14	3,76	0,57
II B	4,9	21,4	0,16	2,65	3,05	0,06	27,6	4,6	3,76	5,64	0,66
II B/C	5,1	16,12	0,14	1,8	1,65	0,05	22,7	4,3	2,10	3,90	0,53
III C	5,0	4,6	0,04	0,07	0,02	0,02	0,03	2,3	1,66	3,30	0,49

Diamètre des éléments en microns	A	Lf	Lg	Sf	Sg	limon f
	0-2	2-20	20-50	50-200	200-2000	argile
(B)	12	36	16,5	7,7	19,7	3
II A ₂	39,5	26	15	4,1	9	0,65
II B	57	11	5	5,4	15,2	0,19
II B/C	36	33	12	3,5	6,4	0,97
III C	12	3	0	3	83,4	

TABLEAU XV

C - Essai de détermination

La discussion qui va suivre ne concerne que les limons rubéfiés, autrement dit les horizons II A₂, II B et II BC.

1) Couleur

La couleur rouge brique de l'horizon II B, probablement due à des oxydes de fer déshydratés comme l'hématite ou peu hydratés comme la goethite, fait immédiatement penser à une pédogénèse sous climat chaud, à période sèche prolongée. Cette couleur se rapproche plus des sols rouges tropicaux (5 à 7 5YR) que des sols beiges tropicaux.

Des couleurs identiques se rencontrent dans les ultisols de la classification américaine.

2) Épaisseur du profil

Elle est faible et ne devait guère dépasser 1,50 m. Seuls les sols ferrugineux tropicaux auxquels appartiennent les sols beiges ont un aussi faible développement. Les sols ferrallitiques atteignent généralement 3 m d'épaisseur au moins.

3) Texture

Les courbes cumulatives de ce profil complexe montrent 3 textures différentes, correspondant aux 3 matériaux superposés.

La courbe du colluvium limono-sableux est intermédiaire entre les 3 couches du limon ancien et celle des alluvions ; en effet, ce colluvium résulte du brassage d'un limon récent, en place à quelques dizaines de mètres de là, et des alluvions.

Les 3 courbes du sol fossile présentent deux anomalies :

- l'horizon A₂ lessivé est aussi riche en argile que l'horizon B/C d'autre part, la courbe de l'horizon B recoupe celle des 2 autres horizons.

Ces anomalies peuvent s'expliquer soit par une légère hétérogénéité du limon, ce dernier en effet étant très fortement solifié, soit dans le cas de l'horizon B par l'existence de pseudosables formés secondairement.

4) Lessivage

Malgré ces anomalies, on peut estimer que la forte proportion d'argile de l'horizon B est due à l'action du lessivage. En effet, l'enrichissement en argile est corrélatif d'un enrichissement en fer.

La présence de clay-skins est également en faveur de l'existence d'un horizon argillique.

L'indice d'entraînement de l'argile est de 1,47 et celui du fer un peu plus élevé, puisque de 1,7.

5) Rapport limon/argile

Un critère souvent utilisé pour distinguer sols ferrugineux et sols ferrallitiques est le rapport de la fraction comprise entre 92 et 20 microns et la fraction inférieure à 2 microns.

Il est toujours supérieur à 0,15 en sols ferrugineux et inférieur à 0,25 en sols ferrallitiques. Ici, en A₂ et B/C, il est nettement supérieur à 0,15, mais seulement de 0,19 en B.

6) Fer

La teneur en fer libre (2,14 % en A₂ et 3,76 % en B) est très élevée comparativement aux sols plus récents du reste du Massif, même les plus évolués :

Sols lessivés	A ₂	0,8 %
	B	2,2 %
Sols bruns lessivés	A ₂	1,9 %
	B	1,6 %
Sols bruns sur colluvium	(B)	0,70 %
Sols bruns acides ou ocre-podzoliques sur grès		0,55 à 0,60 %
Horizon B ₂ des podzols		1,0 %

Le rapport fer libre sur fer total est élevé dans tout le profil (0,57 en A₂, 0,66 en B et 0,53 en B/C) et indique une forte altération.

Il est intéressant de comparer ces chiffres avec ceux donnés par MAIGNIEN pour les sols du Sénégal.

Ce rapport est de 0,5 à 0,6 pour les sols de type ferrugineux et de 0,4 à 0,7 pour les sols de type ferrallitique.

Dans le premier type, ce rapport diminue légèrement avec la profondeur alors que dans le second, il augmente pour parfois atteindre 0,90 %.

Ici, ce rapport est maximum en B et diminue en B/C, ce qui est également en faveur de l'existence du lessivage. L'accumulation de fer libre en B résulte d'une part de l'altération dans cet horizon et, d'autre part, d'une migration à partir de A₂ d'où un rapport fer libre / fer total plus élevé qu'en A₂.

Enfin, la différence entre fer libre de B et fer libre de A₂ est sensiblement égale à la différence entre fer total de B et fer total de A₂ : 1,62 contre 1,88. En B, l'augmentation du fer libre est donc égale à l'augmentation du fer total, ce qui est une nouvelle confirmation de l'action du lessivage.

7) Alumine libre

La teneur en alumine libre est supérieure à celle des sols bruns lessivés (2 ‰ environ) et lessivés (3 ‰) de la région, mais inférieure à celle existant dans les sols de la série podzolique : 3 à 6 ‰ pour les sols bruns acides et ocres podzoliques, 10 ‰ dans l'horizon B₂ des podzols (chiffres empruntés à Ph. DUCHAUFOR).

Ici, il ne semble donc pas qu'il y ait eu une forte libération d'alumine, ni, par conséquent, de ferralitisations, quoique la méthode TAMM ne permettant pas l'extraction de l'alumine cristallisée sous forme de gibbsite, il soit impossible d'être entièrement affirmatif.

8) Taux de sesquioxydes dans l'horizon B

En B, la teneur en sesquioxydes libres, alumine (Al₂O₃) et fer (Fe₂O₃), est de 6,30 (0,93 + 5,37). Le taux d'argile étant de 57 ‰, le pourcentage de sesquioxydes libres par rapport à l'argile est de 11,05 ‰. Par conséquent, cet horizon B n'est pas un horizon oxisol, le critère de caractérisation d'un tel horizon étant une teneur en sesquioxydes supérieur à 12 ‰ par rapport à l'argile. Cependant nous sommes juste à la limite, des ultisols et oxisols.

9) Complexe absorbant et type d'argile

Dans l'horizon II B, le complexe absorbant est de 21,4 m.e. (acétate d'ammonium à Ph 7) ce qui correspond à 37 m.e. pour 100 g d'argile.

Il est donc possible de définir approximativement le type d'argile qui serait donc à dominante d'illite.

Or, l'illite est considérée comme une argile se formant surtout en climat tempéré ; il est cependant possible d'expliquer cette apparente contradiction par le fait que la majeure partie de cette argile était déjà présente lors de la mise en place de la roche mère, donc avant la pédogénèse. La teneur initiale du limon en argile devait être de 35 à 40 ‰.

10) Taux de saturation

En B, le taux de saturation est de 27,6 %. Généralement dans les sols ferrugineux ce taux est supérieur à 40 % devenant souvent très élevé en profondeur alors que dans les sols ferrallitiques, ce taux de saturation est inférieur à 40 %.

Dans la classification américaine, la distinction entre Alfisols et Ultisols se fait essentiellement par le taux de saturation en B qui est inférieur à 35 % dans les ultisols. Dans la classification américaine, ce sol fossile se placerait dans l'ordre des ultisols.

11) Ph

Il est légèrement inférieur à 5 donc nettement plus bas que les valeurs habituellement trouvées dans les sols ferrugineux, où il oscille aux alentours de 6.

12) Hydromorphie

Aucune trace d'hydromorphie n'est visible dans le profil décrit. Cependant dans plusieurs sondages effectués, l'horizon B montrait des caractères d'hydromorphie marqués : présence en B de nombreuses traînées verticales décolorées.

13) Conclusions

La plupart de ces caractéristiques autorisent le rapprochement de ce sol fossile avec les sols ferrugineux tropicaux de la classification française.

D'autres caractères : le taux de saturation en base très faible, le Ph, la couleur et le rapport limon / argile en B de 0,19, autoriseraient une analogie avec les sols faiblement ferrallitiques.

D'après la classification américaine, ce sol appartient à l'ordre des ultisols, sols à horizon argillique très fortement désaturé avec absence d'horizon oxisque, et au sous ordre des ochrults ou à celui des Aquults en cas d'hydromorphie.

D'après la classification belge, ce sol appartiendrait aux ferrisols.

En résumé, nous pouvons conclure avec évidemment certaines réserves que ce sol fossile est un sol lessivé désaturé ferrugineux, très faiblement ferrallitique. En effet, ce sol a été soumis après sa formation à des conditions climatiques différentes ; il a été recouvert par une nouvelle couche limoneuse ayant par la suite plus ou moins disparu et ayant été remplacée par un colluvium de faible épaisseur (60 cm). Cette faible épaisseur ne soustrait pas entièrement le sol fossile à l'action de la pédogénèse actuelle.

Il n'est donc pas impossible que certaines caractéristiques originelles de ce sol aient été modifiées.

La plupart du temps, il est d'ailleurs impossible de distinguer des horizons. Il ne reste qu'une zone rubéfiée, correspondant probablement à l'horizon II B. Tous ces sols sont donc pour la plupart tronqués. Souvent aussi ils ont entièrement disparu.

Néanmoins, ces réserves étant faites, il est intéressant d'essayer de déduire de ces caractères les conditions climatiques qui régnaient lors de cette pédogénèse ancienne, en admettant que des conditions climatiques données induisent toujours le même type de sol.

Le caractère tropical qui régnait lors de la formation de ce sol est quasi certain.

Il est toujours difficile de donner des précisions supplémentaires sans risque d'erreurs. Le caractère faiblement ferrallitique permet de penser à l'influence d'un faciès plus humide que le climat tropical proprement dit.

MAIGNIEN dans le Sud Ouest du Sénégal a étudié le passage des sols ferrugineux aux sols ferrallitiques.

Dans la zone de transition règne un climat tropical humide qui doit être comparable à celui qui régnait lors de cette pédogénèse ancienne :

Température moyenne annuelle	27 °
Température minimale moyenne annuelle	20°
Température maximale moyenne annuelle	35°
Pluviosité	1 200 à 1 500 mm
Saison des pluies	4 à 5 mois
Végétation	forêt xérophile.

D - Essai de détermination de l'âge de ce sol

Le matériel sur lequel s'est constitué ce sol ancien est un limon manifestement d'origine éolienne.

En aucun cas, ce matériel ne peut être considéré comme un faciès limono-argileux des alluvions anciennes, bien que la teneur en cailloux roulés puisse atteindre 30 % ; en effet, ces limons toujours situés à la partie supérieure des alluvions, reposent directement sans transition sur les éléments grossiers sous-jacents, et ne présentent aucune trace de stratification entrecroisée.

La présence des cailloux roulés s'explique facilement par la solifluxion.

Il est remarquable de constater que les phénomènes de solifluxion n'ont pas perturbé les horizons du sol fossile. Par conséquent, la pédogénèse est postérieure à la solifluxion.

Ce sol fossile, développé sur un matériel éolien soliflué, donc mis en place au cours d'une période froide, est d'âge quaternaire.

Rien ne permet de le rattacher à l'une des 3 périodes interglaciaires. Cependant, on admet que pendant les deux premières interglaciaires régnait un climat plus chaud que le climat actuel, la flore du deuxième interglaciaire indiquant déjà une influence tempérée.

Nous avons vu que le climat qui régnait lors de la pédogénèse était très chaud à caractère tropical et ne peut correspondre à celui qui régnait au deuxième interglaciaire.

Par conséquent ce sol rubéfié pourrait dater des premières phases du quaternaire.

III - SOLS LESSIVES SUR LIMONS RECENTS

Alluvions anciennes et limons anciens sont recouverts, nous l'avons vu, par une couche limoneuse d'épaisseur variable atteignant souvent 3 m d'épaisseur. Ces limons récents reposent directement sur les alluvions anciennes ou par l'intermédiaire des limons anciens rubéfiés, quand ils ont été conservés, comme dans le cas des profils I et II précédemment étudiés.

Si nous reprenons les analyses granulométriques du Profil I, nous constatons que la courbe n°3 d'un échantillon prélevé à 185 cm dans le limon rouge est identique à la courbe de l'horizon B du sol fossile étudié dans la carrière de St Gorgon.

Dans le profil II, le limon récent repose sur l'horizon B du limon ancien, l'horizon A₂ ayant disparu.

Les sols lessivés secondairement hydromorphes, développés sur les limons récents, ont été étudiés dans un chapitre précédent.

Rappelons leurs caractéristiques essentielles :

- profil complet atteignant 2,5 m
- indice d'entraînement du fer 2,75
- indice d'entraînement de l'argile 2,3.

Ce sont des sols très évolués dont la formation a dû s'étendre sur une très longue période. On ne peut pas en effet expliquer autrement l'entraînement du fer à plus de 2 m de profondeur.

De plus, bien qu'étant en Station horizontal, les 4/5 de ces sols sont très fortement érodés. Initialement, l'épaisseur de l'horizon A₂ devait être de l'ordre de 1 à 1,20 m. Actuellement, sauf pour de rares exceptions, elle est surtout comprise entre 50 et 70 cm et parfois réduite à 30 cm.

Il est difficile de concevoir une érosion aussi importante lors de la période forestière actuelle. Cette période forestière a débuté dès la fin de la dernière glaciation. Il faudrait donc admettre que l'érosion de ces sols lessivés s'est produite juste à la fin du Wurm ou pendant le Wurm.

La formation de ces sols auraient alors eu lieu pendant le dernier interglaciaire.

IV - RELATIONS POSSIBLES ENTRE LIMONS RUBÉFIÉS ET LIMONS LESSIVÉS

Nous avons vu qu'il existait presque constamment, dans la zone du complexe alluvions-limons, une zone limoneuse rubéfiée profonde, surmontée d'une zone non rubéfiée, mais fortement lessivée.

Ces faits peuvent être interprétés à l'aide de deux hypothèses différentes.

Pour notre part, tout au long de cet exposé, nous avons admis l'existence de deux couches superposées, distinctes géologiquement ; la couche mise en place le plus anciennement aurait été seule rubéfiée, la seconde aurait été uniquement lessivée, sans être soumise à un processus quelconque de rubéfaction.

Il est possible d'interpréter ces faits d'une manière légèrement différente.

Nous pouvons en effet supposer qu'il n'existe qu'un seul placage limoneux, qui aurait été entièrement rubéfié sur une très grande épaisseur. Ultérieurement au cours d'une phase de dérubéfaction ou de brunification, la partie supérieure de ce placage limoneux aurait été lessivée, tandis que les oxydes de fer seraient repassés à l'état hydraté.

De tels phénomènes ont été observés en Sologne, où les sols rubéfiés se sont formés sur des dépôts d'âge Burdigalien. Il existe partout en surface une couche deferrifiée et lessivée qui est géologiquement identique à la couche inférieure rubéfiée sous-jacente. Cette couche deferrifiée ne semble pas dans ce cas dépassée 1 m d'épaisseur.

Nous avons pour le massif étudié admis la première hypothèse c'est à dire discontinuité géologique et rubéfaction uniquement de la couche limoneuse la plus ancienne.

La discontinuité géologique semble être très probable. Deux faits nous autorisent, en effet, à penser ainsi.

Reprenons les figures XVII et XVIII des pages 65 et 67. Nous constatons que les deux séries de courbes cumulatives effectuées de 0 à 2 000 microns et de 2 à 2 000 microns la courbe correspondante à la zone rubéfiée recoupe les courbes des horizons A₂ et B_g du sol lessivé développé dans une couche non rubéfiée.

Il semble que ces limons rubéfiés appartiennent bien à une famille texturale différente de celle à laquelle appartiennent les limons supérieurs.

D'autre part dans une carrière située en K9 une couche de limons non rubéfiés repose directement sur le grès bigarré sans l'intermédiaire d'une couche rubéfiée.

Ces deux faits permettent donc d'estimer, comme nous l'avons admis, que le dépôt éolien s'est effectué en deux temps.

Il est possible cependant, même en admettant cette discontinuité géologique de supposer que l'ensemble des deux couches a été rubéfié, et que la dérubéfaction, si elle a existée, n'a intéressé que la couche supérieure.

Pour notre part, nous n'avons pas non plus retenu cette hypothèse.

L'examen de la zone de contact, bien qu'elle soit perturbée par des phénomènes de cryoturbation, montre que le passage entre les deux formations est toujours brutal, ce qui semble en contradiction avec l'hypothèse d'une dérubiéfaction, qui laisserait plutôt supposer une transition progressive.

Nous avons également effectué une étude sommaire de l'intensité de l'altération dans la couche rubéfiée profonde et dans la couche lessivée supérieure.

Il est possible d'avoir une idée de l'intensité de l'altération en effectuant les rapports fer libre sur fer total, ou fer total sur fer libre. Plus le rapport fer total sur fer libre est élevé, plus l'altération est faible.

Deux profils ont été étudiés :

Le profil I du sol lessivé à pseudogley situé en H4
Le profil du sol rubéfié de la carrière de St GORGON.

Profil I

Horizons	Fer total	Fer libre	$\frac{\text{Fer total}}{\text{Fer libre}}$
A ₂ horizon lessivé	1,76	0,78	2,25
Bg Horizon d'accumulation	3,19	1,69	2,5
II B limon rubéfié	4,72	2,4	1,96

Profil carrière de St GORGON

Horizons	Fer total	Fer libre	$\frac{\text{Fer total}}{\text{Fer libre}}$
A ₂	3,76	2,14	1,7
B	5,64	3,76	1,5
B/C	3,90	2,10	1,85

TABLEAU XVI

Les horizons A₂ et B_g du sol lessivé ont un rapport supérieur à 2. La moyenne du rapport fer total sur fer libre pour l'ensemble de ce sol est de 2,3.

Les différents horizons rubéfiés ont tous un rapport fer total sur fer libre inférieur à 2, la moyenne de l'ensemble des horizons étudiés étant de 1,75.

Il semble donc bien que l'intensité de l'altération soit plus importante dans les horizons rubéfiés, que dans les horizons qui ne le sont pas, ce qui apporte un argument important à l'hypothèse que nous avons formulée.

L'intensité de l'altération a été étudiée d'une autre manière, en effectuant le rapport P₂O₅ total sur P₂O₅ assimilable. Le phosphore total a été dosé de la manière suivante : attaque au peroxyde de sodium, précipitation de la silice par ébullition dans l'acide perchlorique concentré, passage des oxydes de fer sous forme de perchlorates de fer incolores, et colorimétrie par le vanadomolybdate d'ammonium.

Les chiffres ci-dessous correspondent à plusieurs profils différents. Il ne sera tenu compte que de la moyenne des chiffres.

Horizons situés sur limons supérieurs non rubéfiés.		Horizons situés sur limons rubéfiés	
P ₂ O ₅ total ‰	P ₂ O ₅ assimilable ‰	P ₂ O ₅ total ‰	P ₂ O ₅ assimilable ‰
2,40	0,10	2,88	0,12
2,32	0,10	2,40	0,15
3,04	0,11	1,92	0,22
2,80	0,11	3,60	0,43
2,72	0,05	3,28	0,18
	0,09	3,84	
	0,10	2,88	
	0,10	3,40	
	0,11		
	0,05		
	0,02		
	0,12		
Moyenne 2,65	Moyenne 0,08	Moyenne 0,22	Moyenne 3,02
$\frac{P_{2O_5} T}{P_{2O_5} A} =$	33	$\frac{P_{2O_5} T}{P_{2O_5} A} =$	13,7

TABLEAU XVII

Nous constatons une différence importante dans les taux de phosphore assimilable des horizons rubéfiés (0,22 % en moyenne) et, des horizons non rubéfiés (0,08 %)

D'autre part les rapports P_2O_5 totaux sur P_2O_5 assimilable diffèrent très nettement et varient dans le même sens que les rapports fer total sur fer libre. Il semble donc que l'altération ait été plus importante dans les limons rubéfiés profonds que dans les limons supérieurs.

Épandant une objection peut être faite à l'interprétation que nous avons donnée des analyses du phosphore.

En effet, les limons non rubéfiés étant situés à la partie supérieure les prélèvements effectués par la végétation ont certainement plus affecté les limons non rubéfiés que les limons rubéfiés, ce qui pourrait expliquer les différences importantes observées dans les teneurs en phosphore assimilable.

Nous pouvons approximativement chiffrer les exportations à 100 kg par hectare et par siècle.

Si nous admettons une exploitation pendant 20 siècles, avec exportation de litière, nous sommes très certainement au-dessus de la réalité.

En faisant cette hypothèse et en admettant une profondeur d'enracinement de 1 m l'exportation de phosphore aurait abouti à une diminution de la teneur en phosphore assimilable de 0,12 % environ. Il faudrait donc effectuer la correction suivante :

Limons non rubéfiés -

$$\frac{P_2O_5 \text{ Total}}{P_2O_5 \text{ assimilable}} = \frac{2,65 + 0,12}{0,08 + 0,12} = 13,8$$

Dans ce cas on obtient un rapport égal à celui des limons rubéfiés et on peut conclure à une altération identique dans les deux cas.

Cependant les exportations n'ont certainement pas été aussi importantes, que nous les avons estimées. D'autre part au cours d'une période de 20 siècles on peut estimer qu'il y a eu passage d'une fraction de phosphore total sous forme de phosphore assimilable. Dans ce cas les exportations auraient eu lieu au dépens du phosphore assimilable initial et au dépens d'une partie du phosphore total.

En admettant l'hypothèse d'une exportation de phosphore par l'exploitation, il ne faudrait certainement pas diminuer de plus de 10 le rapport $\frac{P_2O_5 \text{ total}}{P_2O_5 \text{ assimilable}}$ des limons supérieurs, rapport qui est actuellement de 33. Dans ce cas, nous pouvons toujours faire l'hypothèse d'une altération un peu plus importante dans les limons rubéfiés.

Un autre fait nous amène à penser que l'altération a été plus forte dans les limons rubéfiés. Quelle que soit la profondeur, la teneur en P_{2O_5} assimilable des limons non rubéfiés est constante et faible, ne dépassant pas 0,10 ‰, même dans les horizons les plus profonds situés à plus de 1,50 m.

Par contre dès que l'on passe dans les limons rubéfiés la teneur en phosphore assimilable augmente.

Tout au long de cet exposé nous avons effectué les quatre hypothèses suivantes :

- a/ mise en place d'une première couche limoneuse d'origine éolienne.
- b/ forte altération et rubéfaction de cette couche sous l'action d'un climat à caractère tropical.
- c/ dépôt d'une seconde couche limoneuse
- d/ lessivage ancien et intense de cette couche supérieure sans processus de rubéfaction.

Nous considérons ces hypothèses comme l'approximation la plus proche de la réalité, bien que certains faits ne puissent être démontrés de façon totalement irréfutable.

IV - SOLS RECENTS

Tous les sols développés sur des matériaux qui ne sont plus en place, limons remaniés et colluviums, sont peu évolués. Ce sont soit, des sols bruns lessivés soit, des sols bruns dont la formation a dû débiter lors de la réinstallation de la forêt, à la fin de la dernière période froide.

Leur évolution est peu accentuée du fait de leur position topographique surtout pour les sols sur colluvium, et du fait de leur âge récent.

Il ne semblerait donc pas, du moins dans le cadre de ce massif forestier, que des sols lessivés sensu-stricto aient eu le temps de se développer depuis la fin de la dernière glaciation.

V - CONCLUSION

Nous pouvons donc admettre pour ce Massif forestier : Une première période de climat chaud antérieure au dépôt des alluvions sableuses.

Une seconde période chaude pendant une phase interglaciaire qui a abouti à la formation d'un sol lessivé désaturé ferrugineux, à très faiblement ferralitique.

Au cours d'une autre phase interglaciaire, une 3e période, à climat tempéré humide, ayant provoqué la formation de sols lessivés qui sont devenus secondairement hydromorphes.

Enfin, la période actuelle à laquelle correspondent sols bruns lessivés et sols bruns.

Si ces 4 périodes se sont effectivement succédées dans le temps, leur datation ne peut être qu'approximative et grossière. En effet, nous avons admis qu'il s'est produit 4 glaciations séparées par 3 interglaciaires à climat de moins en moins chaud.

En fait, les oscillations climatiques du quaternaire sont beaucoup plus complexes, Chaque grande glaciation est en réalité la somme de plusieurs glaciations mineures séparées par des interglaciaires courts dont on ne connaît pas les caractéristiques climatiques.

De nombreux Auteurs ont observé des limons rubéfiés d'âge rissien et même wurmien. Il est fort possible que les alluvions estimées d'âge pliocène soient en fait beaucoup plus récentes et, par conséquent, que les deux couches limoneuses le soient également.

CHAPITRE III - FACTEURS AYANT ORIENTE LA PEDOGENESE

Après l'inventaire des unités cartographiques, l'étude plus particulière des sols lessivés à pseudogley et la mise en évidence de l'existence de plusieurs phases successives, il est possible de tirer certaines conclusions relatives aux facteurs ayant présidé à la différenciation d'un nombre aussi élevé de types de sols.

Si nous examinons la répartition des différents matériaux originels, nous constatons qu'elle coïncide à peu près parfaitement avec celle des unités pédologiques, du moins dans la zone du complexe alluvions limons.

I - ZONE COMPLEXE ALLUVIONS LIMONS

A - Différenciation des sols à mull

Au placage des limons homogènes et hétérogènes correspond exactement une lentille de sols lessivés à pseudogley, ne différant que par la variabilité de l'horizon A₂, variabilité due, nous l'avons vu, à l'érosion plus ou moins intense de cet horizon. Cette érosion entraîne l'accentuation plus ou moins marquée de l'hydromorphie temporaire.

Les deux facteurs essentiels qui sont intervenus dans l'orientation de la pédogenèse sont : tout d'abord l'existence d'un matériel originel permettant l'infiltration profonde des eaux de pluie, mais suffisamment riche en éléments fins, pour que les pores de l'horizon B soient comblés au bout d'un certain temps, et ensuite l'horizontabilité de tout le placage limoneux/la pénétration verticale de l'eau.
qui a permis

Ce sont ces deux causes primaires qui ont permis secondairement aux autres facteurs, essentiellement la formation de composés organiques solubles, complexant le fer et dispersant l'humus, d'agir et de contribuer à provoquer la formation d'un horizon d'accumulation.

Ultérieurement, d'autres composés organiques ont provoqué des migrations latérales de fer et contribué à la différenciation des horizons A₂ et B_g ; mais cette action n'est toujours que la conséquence des deux facteurs primaires précédents ; l'horizontabilité agit d'ailleurs directement à ce stade, en empêchant le drainage latéral de l'eau.

Le drainage latéral peut, par contre, s'effectuer en bordure de la lentille limoneuse. La conséquence en est la formation autour de la lentille des sols lessivés à pseudogley, d'une auréole étroite plus ou moins discontinue de sols lessivés marmorisés à hydromorphie très peu marquée, et de sols lessivés non hydromorphes.

Ces sols lessivés marmorisés et lessivés sont très peu répandus. En effet, leur existence suppose déjà un début de pente, ce qui est incompatible avec un lessivage accentué. D'autre part un début de pente provoque rapidement des phénomènes de remaniement et la destruction du placage limoneux en place. On passe à un matériel nouveau où la pédogénèse est relativement récente.

Ces sols lessivés et lessivés marmorisés ne sont donc que des sols de transition, ne pouvant être que très localisés, là où le passage entre limons en place et limons remaniés ne se fait pas trop rapidement.

Aux limons en place succèdent donc une série de formations concentriques, résultant du brassage des limons et des alluvions.

Sur ces nouveaux matériaux, dont la mise en place est récente, la différenciation des profils sera peu accentuée.

Il est remarquable de constater qu'aux limons remaniés correspondent à peu près exactement des sols bruns lessivés.

La pente encore faible a été suffisante pour provoquer, par l'intermédiaire des eaux de ruissellement un remaniement des limons, mais insuffisante pour empêcher tout lessivage.

Par contre sur colluvium, l'infiltration latérale de l'eau l'emporte. Le brassage des éléments est intense et la différenciation du profil quasiment nulle.

B - Différenciation des sols à gley

Enfin en bas de pente sur colluvium épais, là où s'accumulent les eaux de ruissellement et les eaux de résurgence, auxquelles s'ajoutent parfois les eaux de la Mortagne, on retrouve à nouveau des sols hydromorphes, mais cette fois à hydromorphie permanente : ce sont des gleys passant parfois à des sols franchement tourbeux.

On peut rencontrer dans de rares cas à la limite entre la zone drainée et la zone à nappe permanente des sols bruns plus ou moins hydromorphes.

Ici donc, le facteur essentiel, qui intervient dans la différenciation des sols actuels, est la position topographique qui induit ou non le lessivage et détermine ou non la présence d'une nappe permanente.

La pente détermine aussi l'épaisseur du sol et l'apparition à plus ou moins grande profondeur du niveau compact formé par les alluvions anciennes en place.

C - Différenciation des podzols

Il peut arriver, lorsque la rupture de pente est particulièrement brutale que les alluvions anciennes soient mises à nu. Le résultat en est l'apparition dès la surface d'un matériel à texture très grossière.

Ce fait est suffisant pour déclencher la podzolation. Cette podzolation se fait par l'intermédiaire de la végétation.

Mais la podzolation n'a lieu que parce que le matériel de départ est de texture très grossière et très pauvre en éléments assimilables.

La végétation, en provoquant la podzolation et la différenciation des horizons ne fait que mettre en évidence la pauvreté du sol.

L'action de la végétation est un facteur nécessaire à la podzolation, mais ce facteur seul n'est pas suffisant.

Reprenons l'exemple du sol brun acide à humus brut décrit dans l'inventaire des sols. La végétation constituée de pins sylvestres avec comme strate herbacée *vaccinium myrtillus*, *calluna vulgaris* et *Deschampsia flexuosa*, aurait dû conduire à la podzolation ou au moins à un début. Or, il n'y a aucune différenciation visible. La seule explication est à rechercher dans la texture ; les alluvions sont recouvertes par un colluvium limoneux sableux contenant de 35 à 40 % d'éléments fins (argile et limons fins).

On pourra objecter que l'installation de cette végétation acidiphile est trop récente pour provoquer une podzolation visible.

Dans le massif, il existe un assez grand nombre de bouquets de pins sylvestres dont on ne connaît pas l'origine (ils peuvent être naturels ou avoir été introduits). Quand le matériel est limoneux ou limoneux sableux, il n'y a jamais de podzolation - par contre si ce sont des alluvions anciennes qui forment la roche mère on peut être certain de trouver un podzol.

Si l'introduction des pins est récente, on peut penser que la podzolation est uniquement ralentie sur limons ou limons sableux, mais qu'un bout d'une période suffisamment longue, la différenciation du profil pourrait avoir lieu.

Que l'introduction des pins soit récente, ce qui semble le plus vraisemblable, ou ne le soit pas, il semble bien, d'après de nombreux auteurs qu'à l'époque subarctique et à l'époque boréale un massif de pins sylvestres et de bouleaux s'étendait à toutes les Vosges.

Une preuve de l'extension antérieure du pin sylvestre dans le massif de Ste Hélène pourrait être l'existence d'un podzol typique sous un peuplement de hêtres et de chênes.

Il est difficile d'imaginer sous le climat lorrain que des feuillus puissent provoquer la formation d'un podzol. Il faudrait plutôt incriminer un peuplement disparu de pins sylvestres.

De toute façon, dans l'hypothèse d'un massif de pins englobant la forêt de Sainte Hélène, seules les zones sableuses auraient été podzolisées.

II - ZONE GRESEUSE

Dans la partie sud du massif sur grès bigarré, on pourrait s'attendre à rencontrer une chaîne de sols plus ou moins analogue.

Si dans la zone proche du placage limoneux, les sols sur grès sont légèrement lessivés au sommet de la butte, le lessivage est inexistant.

En quelques mètres, on passe de sols très évolués situés sur limons à des sols peu évolués situés sur grès, donc sur un matériel à texture plus favorable à l'évolution, que celle des limons.

Il est particulièrement difficile de donner une réponse.

Une explication peut cependant être avancée :

Nous avons vu que les limons ont permis la formation de sols épais de 2,50 m. Ces sols ultérieurement ont été érodés de 70 à 80 cm. Cette hauteur correspond à peu près à la profondeur d'un sol normal.

On peut supposer que sur grès, à l'époque où les limons étaient fortement lessivés, se sont développés des sols n'ayant pas plus de 1 m d'épaisseur, du fait de l'existence de la dalle de grès.

L'érosion aurait ensuite enlevé 70 à 80 cm comme dans le cas des limons et aurait donc provoqué la disparition quasi totale de ces anciens sols.

Après la reprise de la pédogénèse à l'époque récente, l'évolution serait repartie de néant sur les grès, ce qui expliquerait la faible évolution vers le sol brun lessivé ou les sols bruns acides, en cas de blocage de la matière organique par l'alumine et le fer.

Le passage d'une roche mère à l'autre correspondrait donc au passage brutal d'une période ancienne à une période récente, d'où la différence d'évolution.

III -- CONCLUSIONS

L'ensemble des sols existant actuellement dans le massif de Sainte Hélène est donc l'aboutissement d'une évolution complexe qui s'est effectuée pendant les différentes phases du quaternaire.

Il est remarquable de constater, que l'évolution est d'autant plus accentuée, que les matériaux sur lesquels se sont développés les sols ont été mis en place à des périodes plus reculées.

Les sols lessivés se rencontrent sur les limons qui ont été maintenus en place.

Les sols bruns lessivés se sont développés sur des limons remaniés.

Enfin les sols bruns n'existent que sur des colluviums de pente ou sur des matériaux récemment érodés.

Cette évolution a été, et est encore, orientée par la nature des matériaux originels, qui conditionnent directement par leur texture, leur cohésion et leur dureté, le sens et l'intensité de la pédogénèse. Ils interviennent aussi indirectement, car leur résistance à l'érosion est à l'origine de la différenciation du relief, dont le rôle est fondamental, dans l'économie de l'eau.

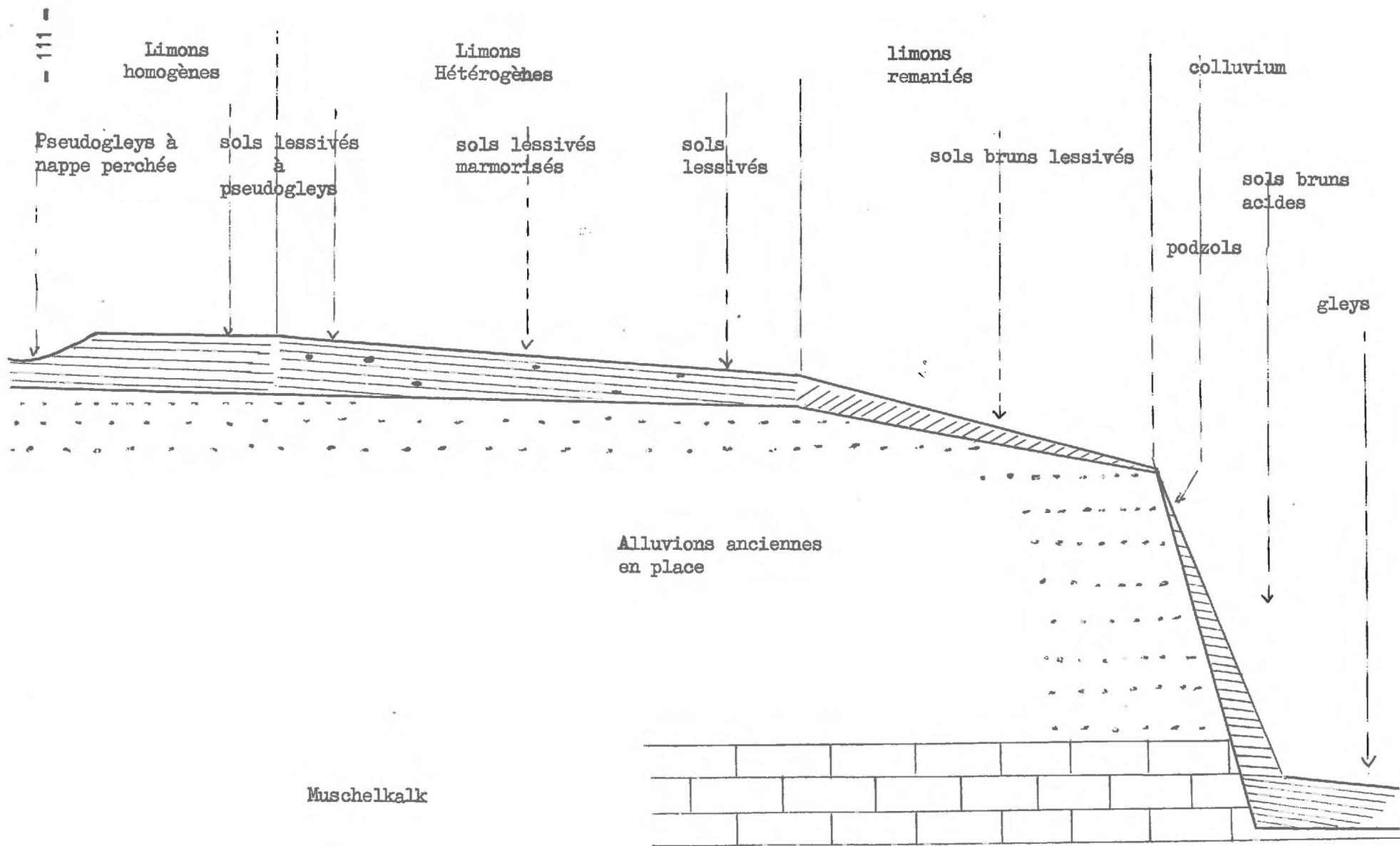


Fig. XXIX CHAÎNE DES SOLS DANS LA ZONE DU COMPLEXE ALLUVIENS LIMONS

RESUME ET CONCLUSIONS

L'essentiel de ce travail a consisté dans un premier temps, en une étude systématique des sols d'un massif forestier des Basses-Vosges, avec levé d'une carte à grande échelle.

Dans un deuxième temps, l'inventaire des unités pédologiques ayant soulevé de nombreux problèmes d'ordre génétique, l'origine des sols à pseudogley a dû être approfondie. De même il a fallu effectuer l'hypothèse de l'existence de plusieurs phases de pédogénèses successives, qui seule permettait d'expliquer les différences d'évolution existant entre les unités, ainsi que certains caractères incompatibles avec le climat actuel.

MATERIAUX ORIGINELS

L'interprétation de nombreux profils n'a été possible qu'après une étude détaillée des matériaux originels. Très rarement en effet les sols se sont développés directement à partir du substratum géologique.

Le Massif étudié est situé en partie sur le Muschelkalk moyen et en partie sur les grès du trias inférieur (grès bigarré et grès vosgien). Ces formations sont surmontées par un complexe récent, constitué par une masse importante d'alluvions anciennes, et par un placage limoneux, probablement mis en place en deux temps.

Au cours du quaternaire différentes actions ont profondément modifié ce système en provoquant l'incorporation les uns aux autres des différents matériaux. Il a été possible de mettre en évidence l'action de phénomènes de solifluction, de cryoturbation, de remaniement, de colluvionnement, et enfin de colmatage, d'où la différenciation d'autant de matériaux originels supplémentaires correspondant.

INVENTAIRES DES SOLS -- REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE

L'inventaire des sols a débuté par l'ouverture de fosses dans les unités qu'il était déjà possible de déterminer au premier abord. Il a été poursuivi par une prospection systématique à la tarière, à raison d'un sondage par hectare en moyenne.

Cette prospection a permis de montrer l'existence d'un nombre extrêmement varié de sols. La plupart des sous-groupes pouvant exister sous nos climats, y sont représentés à l'exception de ceux appartenant à la classe des sols calcimorphes.

Une telle diversité de sols, qui n'est manifestement pas alliée à une diversité analogue du peuplement forestier, permet déjà de supposer qu'à l'action de facteurs actuels, il faut ajouter celle d'autres facteurs, dans la différenciation des sols.

La représentation cartographique adoptée est à caractères génétiques. La couleur apparaît soit au niveau du sous groupe, soit au niveau du groupe ou de la classe, si ces grandes divisions ne sont pas représentées que par un seul sous groupe.

Les matériaux originels sont représentés par une surcharge en noir.

La famille est donc la plus petite unité représentée. Cependant du fait de la multiplicité des distinctions effectuées au niveau des matériaux originels qui ont été ainsi pulvérisés, l'unité de dernier ordre représentée correspond en réalité à la série.

Un extrait simplifié de cette carte a été effectué, en vue de tenter de regrouper les sols définis génétiquement, en fonction de leur valeur forestière.

GENESE DES SOLS A PSEUDOGLEY

La plupart des sols développés sur limons homogènes ou hétérogènes sont caractérisés par l'existence d'un horizon de pseudogley, horizon imperméable, constituant le plancher d'une nappe temporaire, et parcouru par un réseau de marbrures décolorées verticales. Cet horizon imperméable est situé entre 30 et 110 cm.

Lorsqu'il est à 30 cm ou moins, les caractéristiques du profil sont entièrement dominées par l'hydromorphie. Que l'horizon imperméable soit dû à l'existence de deux géologiquement différentes, ou qu'il soit secondaire, et résulte d'un processus pédologique, le sol appartient aux pseudogleys à nappe perchée.

Par contre lorsque cet horizon imperméable se trouve à 1 m de profondeur les caractères d'hydromorphie ne sont plus que secondaires, et génétiquement le sol appartiendra à une classe différente, suivant que l'horizon riche en argile est ou n'est pas la conséquence d'un processus de lessivage.

- mise en évidence du lessivage

Afin de déterminer si un tel processus de lessivage est intervenu deux profils, différant par la profondeur d'apparition de l'horizon de pseudogley (respectivement 110 et 45 cm), ont été comparés.

Pour chacun des deux profils nous avons construit les courbes de répartition du fer libre et de l'argile en fonction de la profondeur.

Ces courbes permettent dans les deux cas de mettre en évidence un horizon lessivé et d'un horizon d'accumulation.

Cependant il n'est pas possible de mettre en évidence, pour l'argile un maximum d'accumulation par rapport à l'horizon C. Par contre il existe un maximum de fer libre, très net, dans l'horizon Bg par rapport à l'horizon C. Ce maximum n'a pu être mis en évidence que pour un seul des deux profils. Dans un cas en effet la partie inférieure de l'horizon Bg se confond avec l'horizon B d'un sol rubéfié fossile.

Nous avons effectué la superposition des courbes de répartition du fer libre des deux profils, en faisant coïncider la partie qui leur est commune. Nous obtenons ainsi une courbe complète, qui semble bien être celle d'un sol lessivé.

D'autres critères permettent d'éraier notre hypothèse. Pour les deux profils nous avons effectué les courbes cumulatives des horizons A₂ et Bg.

Dans les deux cas la courbe de l'horizon lessivé est située constamment sous celle de l'horizon, le décalage/à la quantité d'argile ayant migré par lessivage. correspondant

De même nous avons effectué les courbes cumulatives de 2 à 2 000 microns en éliminant par conséquent l'argile. Pour les deux profils il y a superposition parfaite des horizons A₂ et Bg, ce qui montre que le profil, avant la pédogénèse, était homogène.

La teneur en alumine libre ainsi que la présence d'enrobements argileux permettent de conclure dans le même sens.

Il apparaît que les sols à horizons de pseudogley, quelle que soit leur morphologie actuelle, soient en premier lieu des sols lessivés (indice d'entraînement de l'argile 2,1 à 2,3 - indice d'entraînement du fer 2,5 à 2,7)

- Surimposition de caractères d'hydromorphie

Il semble donc bien que l'existence d'un niveau imperméable, soit la conséquence d'un lessivage intense. Ce niveau imperméable se traduit par la formation d'une nappe temporaire en saison humide.

Cette nappe va provoquer simultanément des modifications au niveau de la partie supérieure de l'horizon d'accumulation qui va être appelée Bg et au niveau de la zone d'oscillation de la nappe, c'est à dire en A₂, qui va devenir A_{2g}.

En Bg l'hydromorphie temporaire provoque des migrations latérales de fer au niveau des fentes de dessiccation, et entre les unités structurales, ce qui provoque la formation du réseau de marbrures décolorées verticales.

En A_{2g} l'hydromorphie provoque des migrations de fer sans direction préférentielle, ce qui se traduit par des taches rouilles et des plages plus claires.

D'autre part la courbe de répartition du fer libre en fonction de la profondeur obtenue par superposition des deux profils étudiés, montre une redistribution du fer au niveau du maximum des bandes décolorées verticales soit par migration ascendante ou descendante, soit plus vraisemblablement par précipitation sous forme de concrétions d'oxydes de fer et de manganèse.

- Influence de l'érosion

Cette même courbe permet de supposer que le deuxième profil étudié est incomplet : la plus grande partie de l'horizon lessivé semble avoir disparu et l'hypothèse la plus vraisemblable permettant d'expliquer cette disparition semble être l'action de l'érosion.

Nous avons constaté lors de la prospection, qu'il existait tous les intermédiaires, entre les sols ayant un horizon lessivé de faible épaisseur (30 cm), et les sols ayant un horizon lessivé de grand développement (1 m), alors que les horizons d'accumulation sont tous aussi développés.

Nous pouvons donc effectuer l'hypothèse suivante : la plus ou moins grande profondeur d'apparition de l'horizon d'accumulation et donc de l'horizon de pseudogley résulterait d'une érosion plus ou moins intense de l'horizon lessivé, qui partout aurait atteint 1 m de développement.

LES PHENOMENES PEDOLOGIQUES DANS LE TEMPS

De nombreux profils sont complexes du fait de la présence en profondeur d'horizons rubéfiés. La fréquence de ces formations rubéfiées nous a incité à déterminer quelques unes de leurs caractéristiques.

L'étude de ces horizons, souvent très modifiés par solifluxion et cryoturbation, a pu être effectuée sur un front de carrière, où semble-t-il un sol rubéfié était encore à peu près en place. Bien qu'il soit difficile de se prononcer, il semble que ces formations rubéfiées correspondent à des sols de type ferrugineux ou faiblement ferrallitique, développés sur de faibles profondeurs. Les teneurs en éléments totaux, fer et phosphore, et en alumine libre, montrent que l'altération y a été un peu plus forte que pour les formations non rubéfiées, mais les différences ne semblent pas aussi importantes que l'on aurait pu s'y attendre.

Nous pouvons donner un schéma des différentes phases d'évolution qui se sont succédées dans ce massif, schéma, qui ne peut être qu'une approximation, dans l'état actuel de nos connaissances.

- Première phase de rubéfaction intense, affectant les alluvions anciennes. Il semble que cette phase se soit produite antérieurement au dépôt de ces alluvions.

- Mise en place d'un placage limoneux éolien, puis seconde phase de rubéfaction, avec différenciation de sols ferrugineux à faiblement ferrallitiques.

- Mise en place d'un deuxième placage limoneux, également éolien. Suivi d'une phase de lessivage intense, masquée secondairement par des caractères d'hydromorphie.

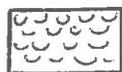
- Erosion partielle de ces sols lessivés. Du fait de cette érosion nous estimons, sans pouvoir donner de date, même approximative, que le lessivage est très ancien, et ne correspond pas à une phase actuelle.

- Dernière phase à laquelle correspond des sols beaucoup moins évolués, en équilibre avec le climat et la végétation actuels : sols bruns et sols bruns lessivés.

Cette dernière phase que l'on doit pouvoir faire débiter après la fin de la dernière période froide doit être elle-même complexe, comme l'ont montré de nombreux auteurs la végétation forestière, comme le climat, n'ont pas été constants. Au subarctique et au boréal la végétation était à base de bouleaux et de pins sylvestres, et le climat plus froid qu'actuellement. Un témoin de cette période pourrait être l'existence d'un podzol sous feuillus.

Il semble donc, au moins dans le cadre de ce massif forestier, que la différenciation des sols soit plus le résultat d'une évolution antérieure, que celui de facteurs actuels. Tant que cette évolution des périodes passées ne sera pas mieux connue, l'interprétation de l'aspect actuel des sols, à la lumière de modifications récentes, ne pourra être que très prudente.

LEGENDE DES SYMBOLES UTILISES DANS LES FIGURES



Matière organique peu décomposée



Horizon humifère particulaire peu actif



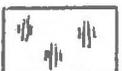
Horizon humifère grumeleux actif



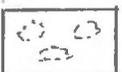
Accumulation de fer ferrique hydraté



Accumulation de fer ferrique déshydraté



Précipitations localisées de fer ferrique



Disparitions localisées de fer ferrique



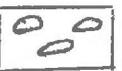
Texture limoneuse



Texture limono-sableuse



Texture sableuse



Cailloux roulés.

BIBLIOGRAPHIE

- AMERYCKX (Y) et NALSCHOT (L) - "Note sur un ultisol fossile"
1962 - Pédologie - XII,2
- ANDRE (J) "Les phénomènes de transports périglaciaires en Morvan Nord"
Bulletin A.F.E.S. - n° 91 - Oct. 1957
- AUBERT (G) "La classification des sols : la classification pédologique
française" - 1962
Cahier de Pédologie ORSTOM * 1963,3
- BEAR (F.E.) "Pedological Record of the Quaternary"
Soil Science - Janvier 1965
- BLOOMFIELD (C) "Some Observations on gleying"
Journal of Soil Science - 1950 - I p. 205
- BIDNELL (O.W.) and HOLE (F.D.) - "Man as a factor of soil Formation"
Soil Science - Janvier 1965
- BONNEAU (M;) "L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière"
Revue Forestière Française - Janvier 1963 - p. 19-31
- BORDES (F) "Les limons quaternaires du bassin de Paris et du Nord de la France"
Congrès de Bruxelles - 1947
- CACHON (L) "Contribution à l'étude du quaternaire récent de la Grande Limagne marno-calcaire : morphogénèse et pédologie."
Ann. Agr. 1964 - 15 (1)
- CAILLEUX (A) "Les bess et les limons éoliens de France"
B.S.C.G.F. 1953 p. 240
- CHARLOT (G) "Les méthodes de la chimie analytique - Analyse quantitative minérale"
1961 - MASSON et Cie
- DEJOU (J) Etude des sols du Centre Nivernais, Région de Premery"
Bulletin A.F.E.S. - Mai 1963 p. 210
- DEMOLON (A) "Dynamique du sol"
Dunod Paris 1960
- DESAUNETTES (J.R.) - "Classification pratique des sols hydromorphes"
Bulletin A.F.E.S. sept. 1958 p. 396
- DEWOLF (Y) "Intérêts et principes d'une cartographie des formations superficielles"
Publications de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de CAEN 1965

- DUBOIS (G et C) "Modification des forêts et des climats dans les régions Nord Est et Sud Est de la France"
Actes du 4ème congrès international sur le quaternaire -
Rome Pise 1956 - p. 454
- DUCHAUFOR (Ph) "Recherches écologiques sur la chênaie Atlantique Française"
Thèse Annales de l'E.N.E.F. XI,1 - 1948
- DUCHAUFOR (Ph) "L'action des divers types d'humus sur les processus d'entraî-
nement dans le sol forestier"
Revue Forestière Française 12 1957
- DUCHAUFOR (Ph) "Pédologie - Tableaux descriptifs et analytiques des sols"
Publication de l'E.N.E.F. 1957
- DUCHAUFOR (Ph) "La dynamique du sol forestier en climat atlantique"
Presses de l'Université Laval Quebec 1959
- DUCHAUFOR (Ph) "Données nouvelles sur la classification des sols"
Annales de l'E.N.E.F. XVIII, 4, 1961
- DUCHAUFOR (Ph) "La cartographie des sols et des stations à but agronomique
et à but forestier"
Pédologie XI 1961
- DUCHAUFOR (Ph) "Précis de Pédologie"
Masson et Cie 1965
- DUCHAUFOR (Ph) - BONNEAU (M) - DEBAZAC (E) et PARDE (J)
"Types de forêt et aménagement : la forêt de la contrélerie
en Argonne"
Annales de l'E.N.E.F. XVIII, 1, 1961
- DUCHAUFOR (Ph) - PARDE (J) - JACAMON (M) et DEBAZAC (E)
" Un exemple d'utilisation pratique de la cartographie des
stations : la forêt de BAN d'ETIVAL (Vosges)"
R.F.F. 10 1958
- DUCHAUFOR et SOUCHIER - "Note sur un problème de classification : Podzolation
chimique et différenciation du profil"
Pédologie 1966 (en cours d'impression)
- DUPUIS (M) "Directives pour la prospection et l'étude des sols sur le
terrain et le laboratoire"
Bulletin A.F.E.S Sept. 1959
Oct. 1959
Juin- Juillet 1960
" " Mars 1962
Novembre 1962

- DUPUIS (J) et CAILLEUX (A) - "Observations sur les formations superficielles et les sols de la Beauce au sud d'Etampes.
INRA - Annales Agronomiques Mai-Juin 1955 p. 373
- EDELMAN (C.H.) "Podzols forestiers et podzols de bruyère"
Pédologie 1960 - X,2
- FIEDLER "Die Untersuchung der Böden Band 1 und 2 Verlag THEODOR STEIN-
KOPFF DRESDEN und LEIPZIG"
- FRANC DE FENIERE (J) - "Géologie et Pédologie. Contribution à l'étude des
formations quaternaires de la plaine d'Alsace. "
Imprimerie alsacienne Strasbourg 1937
- FRANC DE FERRIERE (J) - MILLOT (G) - et CAMEZ (Th) -
"Argiles des sols de formations tertiaires et quaternaires d'
Aquitaine"
Bulletin A.F.E.S. nov. 1959
- GEZE (B) "La notion d'âge du sol. Son application à quelques exemples
régionaux"
Annales Agronomiques III Mai-Juin 1959.
- HEBERT (J) et HERMANT (G) - "Deux années de fonctionnement du service cartogra-
phique des sols de l'Aisne"
Bulletin A.F.E.S. Juin-Juillet 1960
- HEBERT (J) "Projet de cartographie des sols de l'Aisne"
Bulletin A.F.E.S. n° 84 Février 1957
- HEBERT (J) et JAMAGNE (M) - "Mémoire de la carte CRAONNE * 1 - 2"
Chambre d'Agriculture de l'Aisne 1963
- HEBERT (J) et JAMAGNE (M) - "Mémoire de la carte de LAON 5 -5 1962"
Chambre d'Agriculture de l'Aisne.
- HENIN (S) "Le mécanisme de l'érosion par l'eau, dans la Conservation du
sol, le problème français"
Bulletin technique d'information des Ingénieurs du service
agricole 51, 1950
- JACKSON (M.L.) "Clay Transformations in Soil Genesis during the quaternary"
Soil Science Janvier 1965
- JAMAGNE (M.) "Contribution à l'étude des sols au Congo Oriental"
Pédologie 1963 XIII, 2
- JAMAGNE (M.) "Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du
bassin de Paris"
Pédologie 1964 XIV, 2

- LEFEVRE (P.) "Les affleurements des formations géopédologiques picardes"
Bulletin A.F.E.S. Mars 1957
- LOSSAINT (P) "Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous
l'influence des litières forestières"
Thèse faculté des Sciences de Strasbourg 1959
- MALTERRE (H) "Contribution à l'étude des limons quaternaires du Bassin de
Paris"
Thèse faculté des Sciences de Paris 1946
- MAIGNIEN (R) "Le passage des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques
dans les régions sud-ouest du Sénégal"
Sols Africains, vol. VI 1961
- MAROCKE (R) "Les sols rouges paléoclimatiques de la terrasse wurmienne
rhénane alsacienne"
C.r. Académie des Sciences, n° 16 (Avril 1962) p. 3019
- MERIAUX S (Mme) "Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique"
INRA ann. Agronomiques n° 1 et 2 1954
- MERIAUX (Mme S), GILLY (G) et LAMONTRE (B)
"Sur le lessivage des sols de la plaine de la Saône"
Bulletin A.F.E.S. Janvier 1957
- MOHR (E.C.J.) and VAN BAREN (F.A.) - Tropical Soils
Interscience Publishers LTD LONDON 1954
- MUCKENHAUSEN (E.) "Der Pseudogley"
Science du sol 1963 n° 1
- PERIGAUD (S) Mme "Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne (sols
hydromorphes)"
Thèse Faculté des sciences de l'Université de Clermont Ferrand
1963 - Ann. agronomiques vol. 14 n° 2 et 3
- PLAISANCE (G.) et VAN DER MAREL (H.W.)
"Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de
Chaux (Jura)"
INRA Ann. agr. n° 5 et 6 1960
- PLAISANCE (G) "Les sols à similigley"
Bulletin A.F.E.S. février 1955
- PLAISANCE (G) "Les sols à marbrures de la forêt de Chaux"
Thèse faculté des sciences de Dijon Juillet 1965
- RODE (A.A.) "Podzolation and lessivage"
Pochvovedenie 7 juillet 1964
Trad. angl. Soviet. soil science avril 1965

- SCHAEFFER (R) "Les sols hydromorphes du Bruch de l'Andlau (Alsace)"
Bulletin A.F.E.S. Janvier 1962
- SCHEYS (G) et T'JONCK (G) - "Développement des profils sur sédiments tardi
et postglaciaires"
Pédologie VII 1957
- SEGALEN (P) "Le fer dans les sols"
Publication de l'Office de la Recherche Scientifique Outre-Mer
Paris 1964
- STEPHENS (C.G.) "Climate as a Factor of soil Formation Through the quaternary"
- TAVERNIER "Les formations quaternaires de la Belgique en rapport avec
l'évolution morphologique du pays"
Bulletin de la Société belge de géologie 1948
- TAVERNIER (R) et AMERYCKX (J) - "Le postpodzol en Flandre sablonneuse"
Pédologie VII 1957
- THORP (J) "The nature of the Pedological Record of the quaternary"
Soil Science Janvier 1965
- TRICART (J) "Carte des phénomènes périglaciaires quaternaires en France.
Mémoire explicatif de la carte géologique de France"
Paris 1956
- TRICART (J) "L'épiderme de la terre"
Masson et Cie Paris 1962
- VANHOORNE (R) "Datation des podzols fossiles dans les sables éoliens de
Belgique"
Pédologie 1962, XII, 2
- VERMEIRE (R) "Les sols de la Famenne entre Marche et Houyet"
Pédologie 1962, XII, 2
- WERNERT "Stratigraphie paleontologique et préhistorique des sédiments
quaternaires d'Alsace - ACHENHEIM"
Mémoire de la carte Géologique d'Alsace Lorraine 1957
- X "Soil classification . A comprehensive system - 7 th Approximation"
Soil Survey Staff, Soil Conservation service; USDA 1960
- X "La géologie des terrains récents dans l'Ouest de l'Europe"
(Session extraordinaire des Sociétés Belges de Géologie)
17 - 26 sept. 1946 Bruxelles 1947

2ème THESE

Les Oligoéléments dans l'Alimentation des essences forestières

Vu et Approuvé

Nancy, le 17 février 1966

Le Doyen de la faculté des Sciences

J. AUBRY

Vu et Permis d'imprimer

Nancy, le 18 février 1966

Le Recteur

Président du Conseil de l'Université

P. IMBS