

F. COLMET-DAAGE, E. BESOAIN

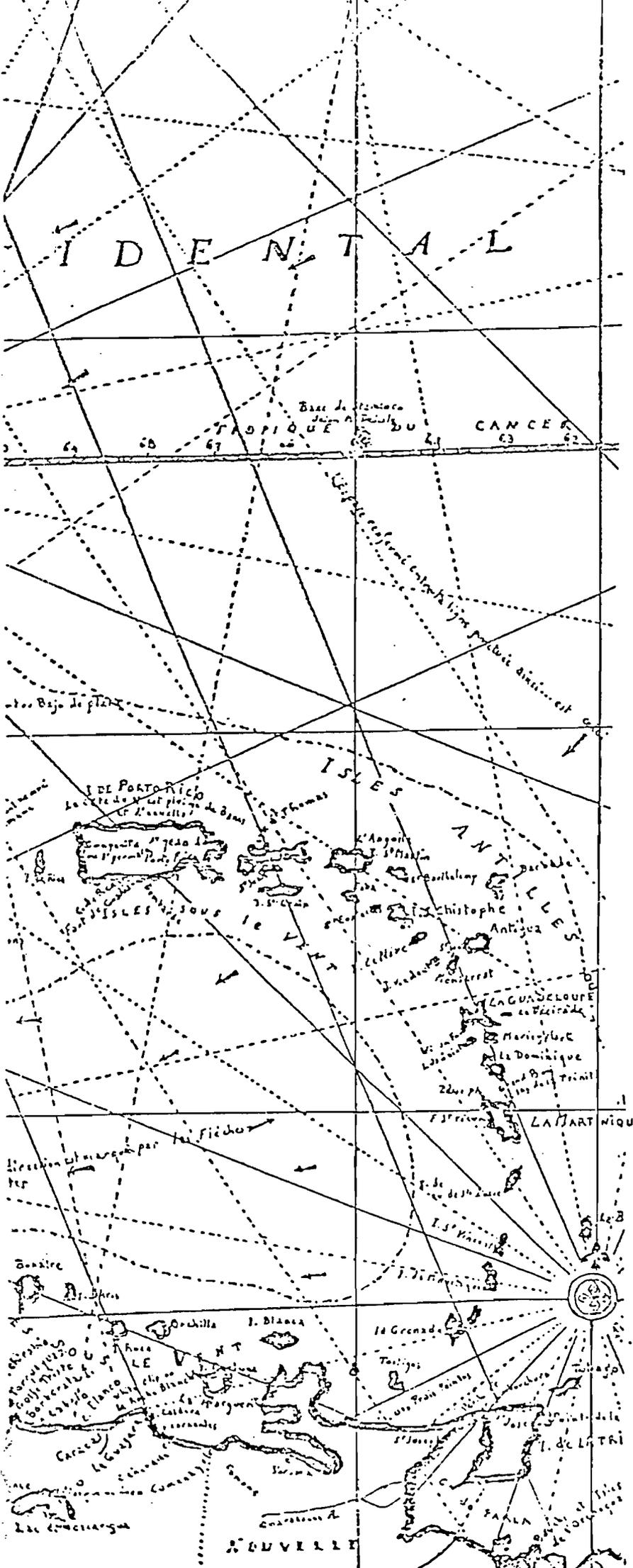
GAUTHEYROU J., GAUTHEYROU M.
DELAUNE M., SHENKEL G.
et al.

Caractéristiques et propriétés hydriques
de quelques sols dérivés de
cendres volcaniques du CHILI CENTRAL

(2e version)

C. LAUGENIE, F. COLMET-DAAGE
E. BESOAIN, M. DELAUNE

Note sur les limons volcaniques des
piémonts glaciaires chiliens
méridionaux



CENTRE DES ANTILLES

A) - Caractéristiques et propriétés hydriques de
quelques sols dérivés de
cendres volcaniques du CHILI CENTRAL

(2e version)

C A R A C T E R I S T I Q U E S E T P R O P R I E T E S H Y D R I Q U E S
D E Q U E L Q U E S S O L S D E R I V E S D E C E N D R E S
V O L C A N I Q U E S D U C H I L I C E N T R A L

Publication O. R. S. T. O. M. - Antilles n° 85 bis

I N T R O D U C T I O N

Les prélèvements de terrain ont été effectués en novembre-décembre 1972 à l'initiative de E. BESOAIN par F. COLMET-DAAGE, de l'OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER (Centre des Antilles), au cours d'une mission demandée par le Ministère de l'Agriculture du CHILI (S.A.G.) dans le cadre de la coopération scientifique française.

Les services de l'Ambassade de France au CHILI ont pris en charge les frais du voyage et d'expédition des échantillons (250kg) en Guadeloupe.

Les tournées ont été prises en charge par le Département d'Agrologie (SAG) et exécutées de manière très efficace grâce à l'obligeance de M. MELLA et aux directives des ingénieurs du Ministère de l'Agriculture du CHILI qui nous ont accompagnés : SHENKEL, MINTE, SEPOLUEDA, FRERES, CAMPILLAY, etc... Nous avons également bénéficié des conseils et des travaux non publiés de BESOAIN, VALDEZ, MELLENEZ, MELLA, etc... et de LAUGENIE, géographe détaché à l'Université de Concepcion, pour la géomorphologie et la mise en place des formations volcaniques.

Tous les échantillons ont été expédiés au laboratoire du Centre des Antilles en Guadeloupe où J. et M. GAUTHEYROU ont effectué, avec l'aide de LEBERRE et LANTHEAUME la plupart des analyses. Les argiles y ont été extraites et ont reçu des traitements appropriés avant d'être envoyées pour examens plus complets dans divers laboratoires, à savoir :

- E. BESOAIN à Santiago pour les analyses thermiques différentielles et une partie de la spectrographie dans l'infrarouge, les mesures de surface.
- G. FUSIL à l'ORSTOM PARIS pour la diffractométrie de rayons X.
- C. de KIMPE à la station du Ministère de l'Agriculture du CANADA à QUEBEC pour la spectrographie dans l'infrarouge et des mesures de surface.
- M. TRICHET pour la microscopie électronique . Faculté d'ORLEANS, Ecole Normale Supérieure.
- G. SIEFFERMANN pour la microscopie électronique au laboratoire de géologie du Professeur MILLOT à STRASBOURG.
- N. YOSHINAGA pour la détermination de l'émolite au microscope électronique et par diffraction d'électron à EHIME University, au JAPON.

M. SCHNITZER pour la lyophilisation à OTTAWA, CANADA, Ministère de l'Agriculture.

Les sables ont été séparés des sols en GUADELOUPE, par M. et J. GAUTHEYROU et envoyés à M. DELAUNE et VERDONI, au laboratoire de géologie de l'ORSTOM à PARIS, qui ont isolé les minéraux lourds et légers, effectué tous les examens minéralogiques et comparé les résultats obtenus entre eux et avec ceux de la bibliographie existante sur le CHILI.

Quelques analyses ont été faites par les laboratoires des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à PARIS : Carbone au carbographe, surfaces BET, oxydes en solutions, pH...

Les travaux de réduction et de dessin ont été exécutés au Centre ORSTOM des Antilles en Martinique par J. BERNARD aidé de A. PALLUD et A. POUMAROUX.

La coordination des études et l'établissement du rapport d'ensemble ont été assurés depuis l'ORSTOM en Martinique par F. COLMET-DAAGE.

SITUATION - CLIMAT

L'île s'étend sur environ 150km de part et d'autre du 43° de latitude à plus de 1000km au sud de Santiago.

Le Sud de l'île est très humide, avec plus de 3m de pluie par an, pour une température moyenne de 10°C.

La partie centrale comprend :

- A L'Est, face au golfe d'Ancud, des plateaux et collines ondulées qui sont d'anciennes moraines recouvertes de cendres. Elles se prolongent en fjords découpés et en de nombreuses îles. C'est la principale région de culture qui est modérément arrosée (2m par an à Castro).

- Sur le versant pacifique, s'élève la cordillère côtière, très humide et encore couverte de vastes forêts.

- Le Nord de l'île est encore très bien arrosé avec 2,4 de pluie annuelle à Ancud.

MINÉRALOGIE DES SABLES

Les cendres recouvrent les moraines glaciaires sur 70 à 100cm d'épaisseur en moyenne, rarement davantage. Ces cendres semblent provenir des volcans situés de l'autre côté du golfe d'Ancud, à quelques 70kms, puisqu'aucun cratère ne paraît avoir été signalé dans l'île. Il est possible qu'il y en ait un non connu.

Ce sont des cendres à dominance de hornblende, avec une certaine proportion d'épidote et d'hypersthène. Le quartz est également abondant.

On trouve aussi quelques minéraux de roches métamorphiques tels que l'andalousite, le zircon, le grenat, la staurodite, qui indiquent un mélange avec des formations non volcaniques.

Ces mélanges se seraient effectués au cours de l'éruption. Il y aurait eu arrachement de minéraux aux parois de cheminées volcaniques, puis ces minéraux du métamorphisme ont été entraînés avec les minéraux du magma constitutif des cendres. C'est une hypothèse probable (Brousse). Les dépôts de cendres sont très réguliers. Leur épaisseur est très uniforme sur de grandes distances. Il est difficile d'imaginer des mélanges des dépôts successifs par les eaux et les vents avec des matériaux arrachés aux collines précambriennes ou morainiques voisines. Le climat actuel est hyperhumide et la végétation actuelle dense. L'érosion éolienne ne paraît donc pas possible. Le climat a pu être différent dans le passé au cours de périodes plus sèches.

Il y a un autre indice bien caractéristique de l'uniformité des dépôts de cendres. C'est la présence, dans tout le sud de l'île, d'une mince couche de cendre dure de 3 à 5cm d'épaisseur environ, très régulière, quoique brisée et discontinue vers 70cm de profondeur. La composition minéralogique de cette couche de cendres dures est différente de celle de la cendre meuble située en-dessous et au-dessus. Elle contient une très large dominance d'olivine, pas d'épidote et très peu de quartz.

On peut supposer que ce mince niveau de cendres dures à olivine correspond à l'éruption courte et violente d'un volcan rejetant les produits fluides du magma basaltique profond. Les cendres qui sont situées au-dessus et en-dessous de ce mince niveau peuvent provenir, au contraire, de volcans rejetant des laves visqueuses de type acide (hornblende et quartz) par des explosions violentes et arrachage au début de produits non volcaniques lors du débouffage difficile des cheminées volcaniques (épidote, quartz, etc...). Pour le Professeur Brousse, l'épidote est abondante dans les formations métamorphiques au contact des laves. Il semblerait que la montée des laves dans ces formations est une condition favorable à l'apparition de l'épidote. Il est normal que le débouffage des cheminées volcaniques ou l'explosion d'un cône volcanique provoque ainsi dans les produits rejetés dans l'atmosphère, la présence de l'épidote avec d'autres minéraux du métamorphisme. L'épidote pourrait se former en abondance au cours de la montée lente de la lave visqueuse au contact des roches métamorphiques avant l'expulsion explosive finale.

La composition des cendres varie peu de part et d'autre du niveau durci à olivine.

L'augite serait un peu plus abondante dans le sud de l'île et le hornblende dans le nord.

Certains profils renferment de notables teneurs en gibbsite (E 376) et d'autres pas du tout (E 370 - 373). Il n'y a pas de relation évidente avec la composition minéralogique et l'influence climatique paraît prépondérante.

Tableau - Répartition des Minéraux lourds du Sud au Nord de l'île

		Hyper- sthène	Augite	Olivin- -né	Horn- -blende	Epi- dote	Divers	% M.L.	M.L. Minéraux lourds	Minéraux légers
QUELLON	370 c d	18 19	16 19	10	41 36	16 13	9 3	14.7 17.2	»Andalousite »Staurotite »Grenat "traces sillimanite et"tourmaline »Andalousite »Staurotite »Zircon	Quartz et feldspaths
QUEILEN	373 c	24 35	12 7	2 3	40 53	15 -	7 2	17.4 15.4	»Andalousite »Staurotite »Grenat Andalousite, Grenat, Tourmaline	
Forêt Ouest Castro	376 a c	34 23	7 9	+ 3	38 45	21 16	+ 4	17 18	"Andalousite "Sillimanite "Grenat Zircon »Andalousite "sillimanite »Grenat	Quartz et feldspaths
ACHAO	374 b c	16 8	4 7	1 +	55 60	21 24	3 1	26 27	»Andalousite »Grenat »Zircon "Rutile "Andalousite »Grenat "Zircon	Quartz et feldspaths
NIADI CHACAO	378	24	4	0	48	23	1	1.3	»Andalousite "Zircon	
	371 c	36	10	7	36	11	-	12.6	Beaucoup de minéraux altérés (biotites) Feldspaths, quartz	
Niveaux durcis intercalaires dans les profils 371 (sans gibbsite) et 376 (avec gibbsite)										
QUELLON	370 R	8	9	62	21	-	-	12	Pas de minéraux du métamorphisme	Feldspaths et un peu de quartz
Forêt CASTRO	376 R	6	8	57	29	-	-	16.5		

LES SOLSDans le sud de l'île :1) - Les sols à allophane perhydraté, sans gibbsite, à humidité permanente - E 370 - 373.

Ce sont les sols du sud de l'île.

Sur 15cm, le sol est brun foncé (10 YR 3/2), spongieux, très fortement organique (25 à 30%).

Puis on passe à des horizons beiges ou jaunes, bien limoneux, onctueux, tout à fait caractéristiques des hydrandepts. Il y a encore 13% de matière organique à 1m. Celle-ci est donc fortement masquée par l'allophane.

Propriétés :

La densité apparente est très faible dans tout le profil (0.3 à 0.35). Le pH est bas et un peu plus élevé en profondeur dans le KCl que dans l'eau. Les teneurs en bases échangeables sont très faibles : 2 à 3 mEq, avec des quantités négligeables de Mg. Les AF l'emportent sur les AH, surtout en profondeur. La dispersion a lieu en milieu acide et le FNa réagit instantanément.

L'hydratation de ces sols est considérable : 200%. La dessiccation irréversible à l'air est très nette dans tous les horizons. L'eau utilisable devient très faible sur sol séché à l'air.

La capacité d'échange de cation est très élevée et double sensiblement entre pH4 et pH9. Elle est plus forte sur échantillon conservé humide (sur un poids équivalent de sol sec).

CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATION A DIVERS pH - SOL HUMIDE ET SECHE A L'AIR								
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuvé - Résultats en mEq. pour 100gr de sol sec étuvé								
E 370	sol conservé humide					sol séché à l'air		
	pH4	pH7	pH9	S	S/T	pH4	pH7	pH9
0 - 20	50.3	66.6	117.3	2.7	4%	35.7	49.2	80.4
70 - 100	58.1	68.3	88.6	3.8	4%	26.9	41	59.2

Minéralogie des argiles :

Les rayons X ne montrent que la présence de minéraux primaires, quartz, cristobalite, avec un peu de kaolinite et un minéral à 14 Å. La raie à 14 Å est renforcée après déferfification, mais demeure inchangée par saturation en potassium, magnésium, glycérolage. Elle se rabat à 11 Å à 500°.

La spectrographie dans l'infrarouge a été effectuée sur la partie grossière de l'argile inférieure à 2 microns (lyophilisée ou séchée à l'air) et sur la fraction très fine de l'argile (E 370 - E 373).

La fraction très fine donne le spectre classique des allophanes avec une absorption à 950cm^{-1} , due à la déformation du réseau SiO par l'abondance des Al^{IV} . Par contre, la fraction plus grosse absorbe aussi vers 1.080cm^{-1} .

La bande OH est centrée sur $3\ 450\text{cm}^{-1}$ et s'étire jusqu'à $2\ 600\text{cm}^{-1}$.

Il faut remarquer que ces bandes sont nettement moins intenses qu'avec les sols à allophane similaires des pays tropicaux. Y a-t-il une influence de la matière organique ? Les surfaces spécifiques BET ne sont pas très élevées : 60 à 100.

Par contre, l'absorption est importante et double à $1.600 - 1.700\text{cm}^{-1}$ dans la bande H_2O , comme dans les sols à allophane des tropiques.

La bande à 800 est très faible et toutes les bandes en-dessous de cette valeur sont très peu marquées. Il s'agirait donc d'un matériau fortement désorganisé.

Les diagrammes sont identiques sur échantillons lyophilisés ou non.

Dans les horizons de profondeur, c'est à 1.000cm^{-1} que l'absorption est maximum. Il peut s'agir d'un dépôt plus ancien.

La légère absorption que l'on constate à 1.440cm^{-1} est peut être attribuable à la matière organique, de même que le crochet exothermique de l'analyse thermique différentielle à 450°. L'absorption à 1.440cm^{-1} est d'ailleurs plus forte dans l'échantillon E 373c qui est plus riche en matière organique que l'échantillon E 370 (avant attaque eau oxygénée).

Dissolution différentielle :

Par attaque acide-base Segalen sur la fraction inférieure à 2 microns, la dissolution de l'alumine et du fer est quasi totale dès la première attaque, mais celle de la silice se prolonge dans les attaques suivantes. A un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ des produits d'extraction de 0.85 à la première attaque, succède un rapport de 7 à la deuxième, 80 à la cinquième. Ces hauts rapports Si /Al dans les dernières extractions sont bien caractéristiques des sols à allophane hydraté sans gibbsite des tropiques.

Après 5 extractions, 93% du produit initial est dissous. La composition du matériau amorphe serait la suivante : $\text{SiO}_2 = 10$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 17$, avec un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1.

Il faut remarquer la richesse en fer très particulière de cet échantillon, mais on ne sait où est ce fer. Fait-il partie de la substance allophanique ou non ? Est-il responsable de la faible surface spécifique observée ?

On retrouve donc toutes les caractéristiques des hydrandepts des pays tropicaux.

En régions plus humides dans la cordillère :

2) - Les sols à allophane perhydraté, avec gibbsite, à humidité permanente - E 371 - 376.

Les profils et les caractéristiques sont analogues aux précédents, bien qu'il y ait moins de matière organique (15% en surface) et que le caractère onctueux du sol soit moins accusé. Les sols sont un peu moins hydratés, mais se dessèchent irréversiblement à l'air, même en surface (fig.). Les horizons riches en gibbsite donnent une légère sensation d'argile au toucher.

La gibbsite est abondante, surtout en profondeur (E 376c) où il y aurait aussi un peu de kaolinite. On doit noter aussi la cristobalite et un minéral à 14 Å.

3) Sols à alios ferrugineux et horizon blanchi

Dans cette même région et à peu de distance de ces profils à gibbsite, on observe sur des cendres plus grossières, et en général sur les crêtes des collines, des sols ayant l'aspect de podzols. L'horizon de surface est fortement organique, puis il y a un niveau grossier blanchâtre et enfin un alios ferrugineux dur en strates successives sur 20 à 30cm d'épaisseur.

Dans des régions aussi humides et avec l'abondance d'acides fulviques, il n'est pas étonnant que podzolisation et allitisation se côtoient.

Sur les cendres très fines, c'est l'allophanisation qui est de règle, avec apparition de gibbsite. Le fer est immobilisé dans le profil, on ne sait comment d'ailleurs, sous forme amorphe.

Sur des matériaux plus grossiers, plus difficilement altérables, c'est la podzolisation qui l'emporte et les migrations du fer.

Les mêmes observations peuvent d'ailleurs être faites sur les sommets des volcans de Martinique et de Guadeloupe, mais les formations grossières sont relativement récentes, les alios peu développés et l'horizon blanchi très rare.

En régions un peu plus sèches :

4) - Les sols à allophane perhydraté, sans gibbsite, à faible dessèchement temporaire de surface

Ce sont les sols cultivés situés de part et d'autre de Castro sur les collines faisant face au golfe d'Ancud.

Les sols sont en général modérément profonds et la moraine dure caillouteuse apparaît vers 70 à 100cm.

La dessiccation n'aurait affecté que la partie supérieure du profil. Elle est plus ou moins marquée, faible dans E 368 et 372, plus nette dans E 369 - 375 - 374. Les teneurs en eau sont encore très importantes et dépassent 100% en profondeur.

En surface, l'eau utilisable (pF3 - pF4.2) est plus importante sur échantillon séché à l'air que dans les hydrandeps du sud ou de la cordillère. Ce serait l'indication d'une meilleure organisation du réseau (D.A. = 0.4). Il sera intéressant d'en mieux connaître les raisons en examinant plus en détail la minéralogie des échantillons de surface.

Les teneurs en matières organiques sont moins élevées (10% en surface) que dans les sols du sud et de la cordillère, mais atteignent encore 3 à 4% au voisinage de la moraine. Les AF l'emportent encore sur les AH surtout en profondeur.

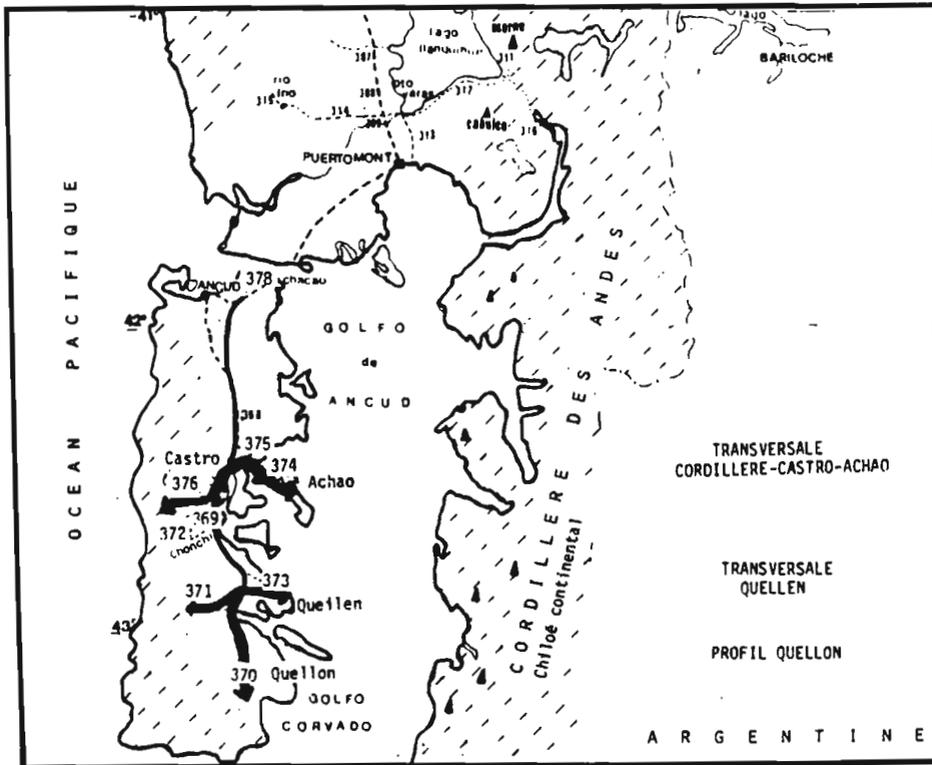
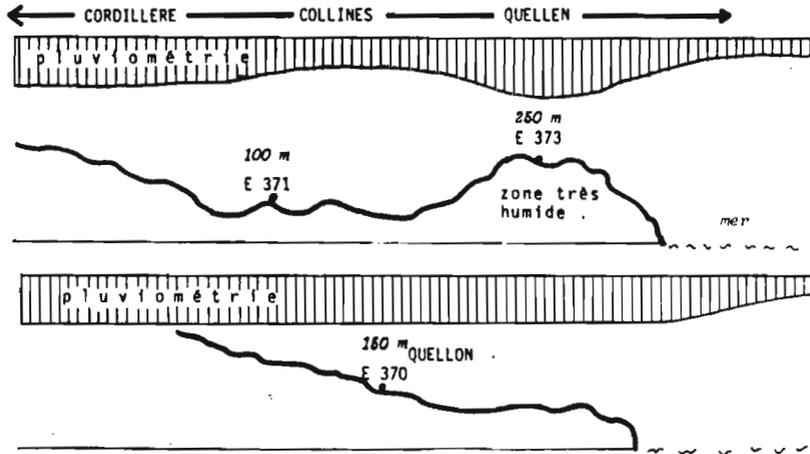
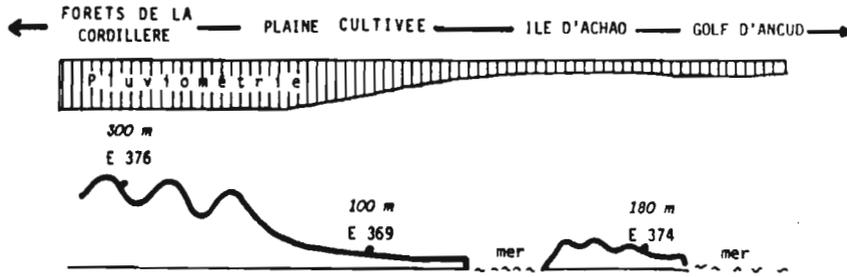
Les sols sont à peine mieux pourvus en bases échangeables. Avec une saturation de 10%, le pH KCl est voisin ou supérieur au pH eau. La dispersion a lieu en milieu acide et le FNa réagit instantanément.

En profondeur (E 374), les diagrammes X indiquent une substance amorphe avec des minéraux primaires et une petite raie à 14 Å.

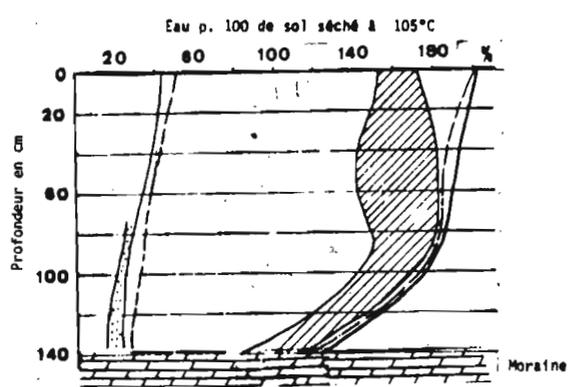
Le microscope électronique montre une masse amorphe, fortement rétractée, qui présente parfois de ce fait un aspect de pseudo-fibres. On remarque disséminées quelques particules primaires de forme anguleuse.

CONCLUSION :

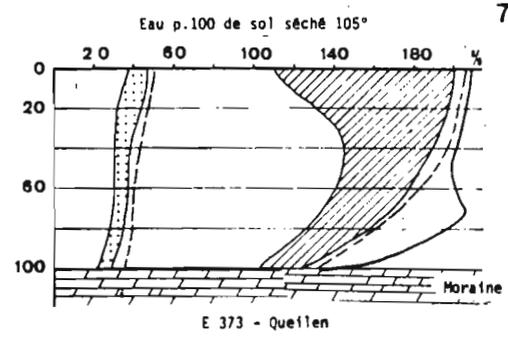
Tous les sols de Chiloé sont caractérisés par une forte hydratation. Elle est légèrement atténuée en surface dans les régions orientales cultivées. La séparation en sols ou sans gibbsite est comme aux Antilles, très nette.



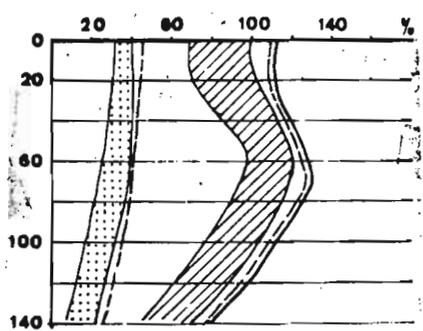
ILE DE CHILOE



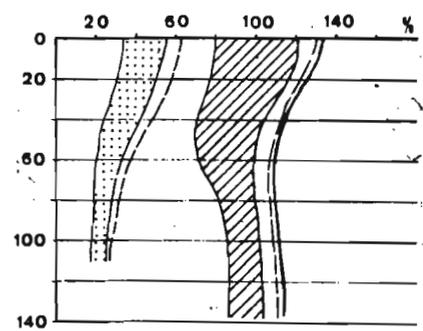
E 370 - Quellon
Sols à allophane très hydraté sans gibbsite (hydrandept) - Sud de Chiloe



E 373 - Quellon

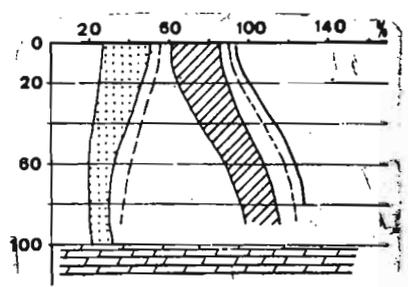


E 371 : Quellon

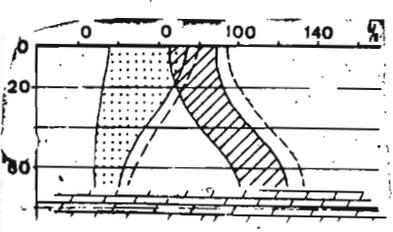


E 376 : Castro

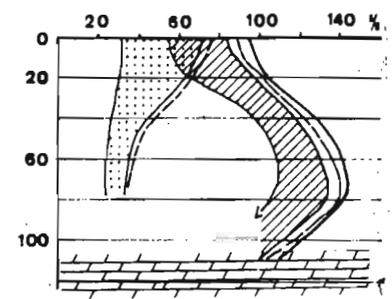
Sols à allophane très hydraté avec gibbsite - oxi-hydrandept dans la Cordillère Centrale



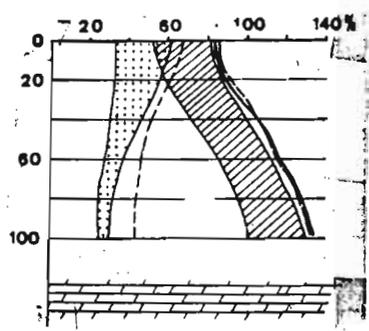
E 369 : Chonchi



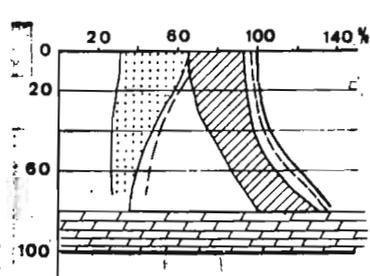
E 368 : Castro



E 375 : Castro



E 374 : Achao



E 372 : Chonchi

Sols à allophane des plaines de l'Est (Castro)

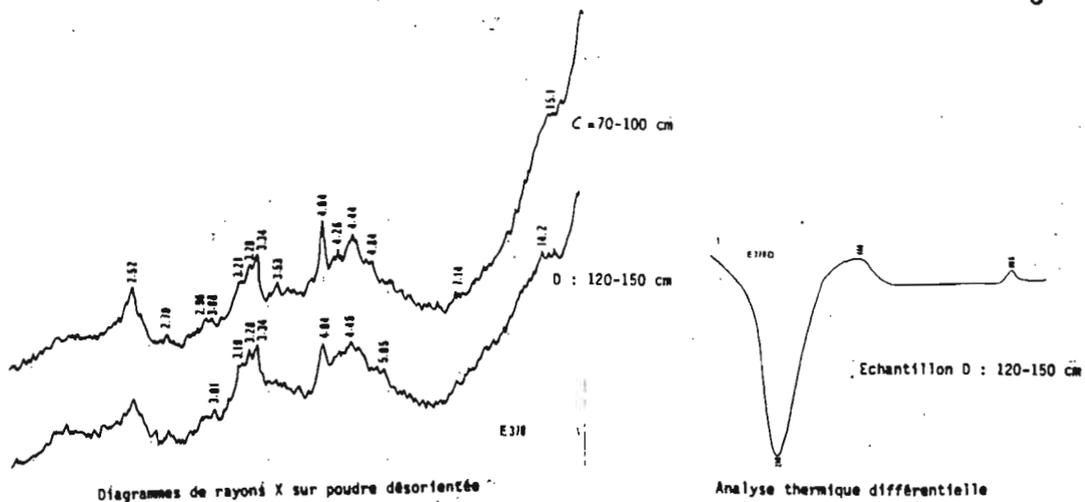
RETENTION EN EAU DES SOLS A ALLOPHANE A DIVERS pF
Sol conservé humide ou sol préalablement séché à l'air
Ile de CHILOE

LEGENDE

ordonnées : Profondeur du sol en cm
abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

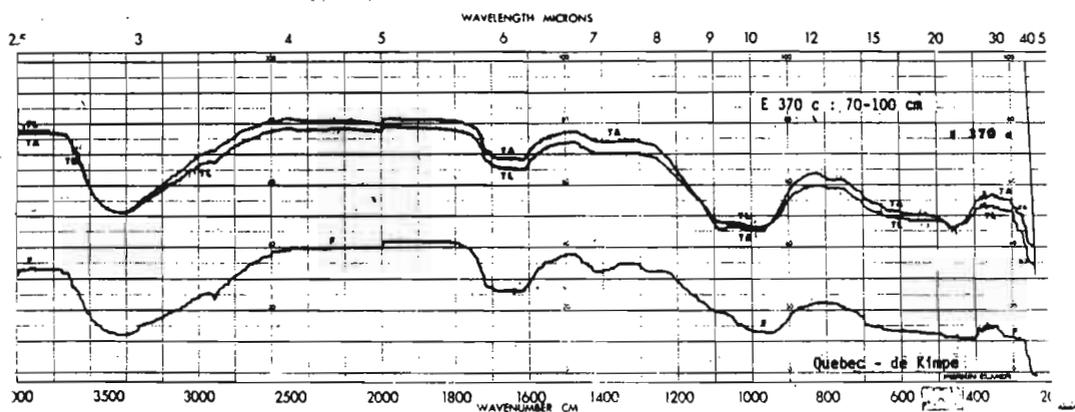
Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2
du prélèvement de sol

- déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
- déterminé sur échantillon conservé humide



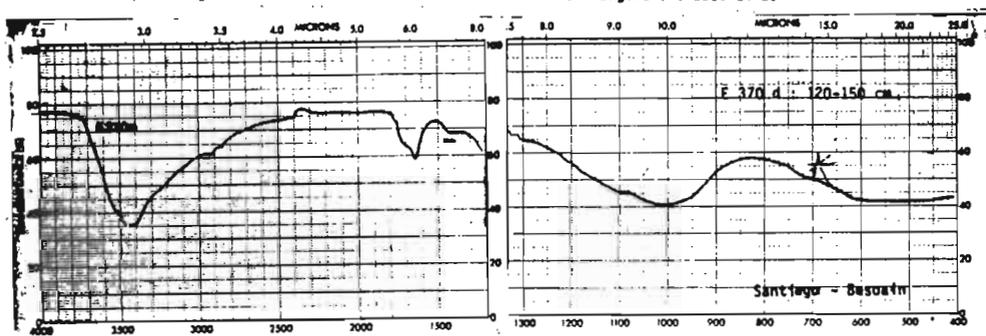
Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

Analyse thermique différentielle



TA : argile séchée à l'air } Fraction totale de l'argile : classes 2-20
 TL : argile lyophilisée }

F : argile séchée à l'air : Fraction très fine de l'argile : classe 14-20



Diagrammes d'absorption dans l'infrarouge.

SOL A ALLOPHANE TRES HYDRATE SANS GIBBSITE : HYDRANDEPT

Profil E 370 Quellon - Sud de Chiloé

c : 70-100 cm

d : 120-150 cm

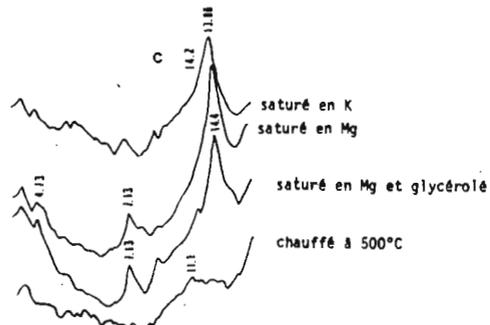
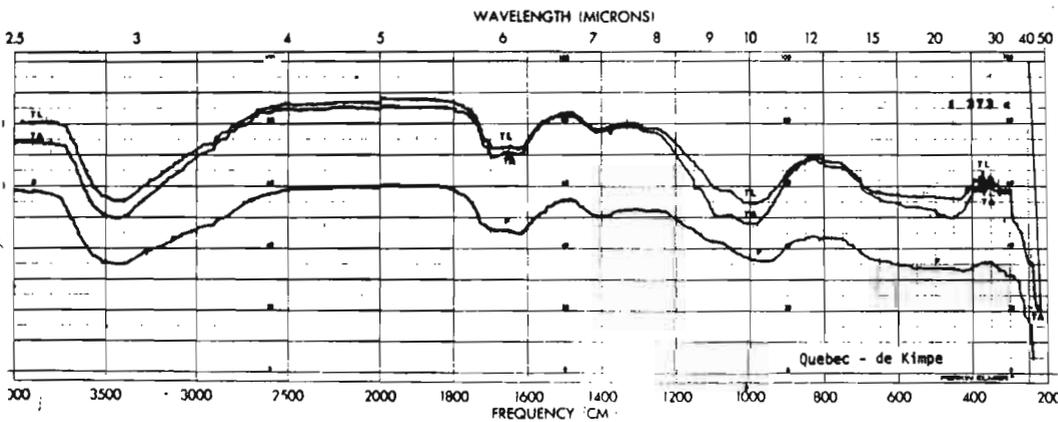
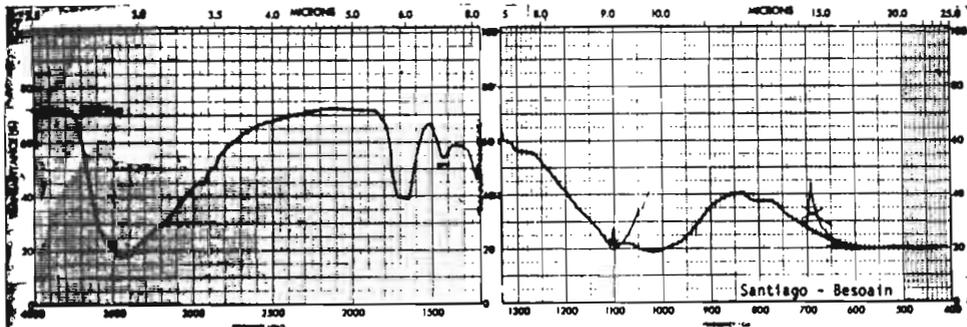
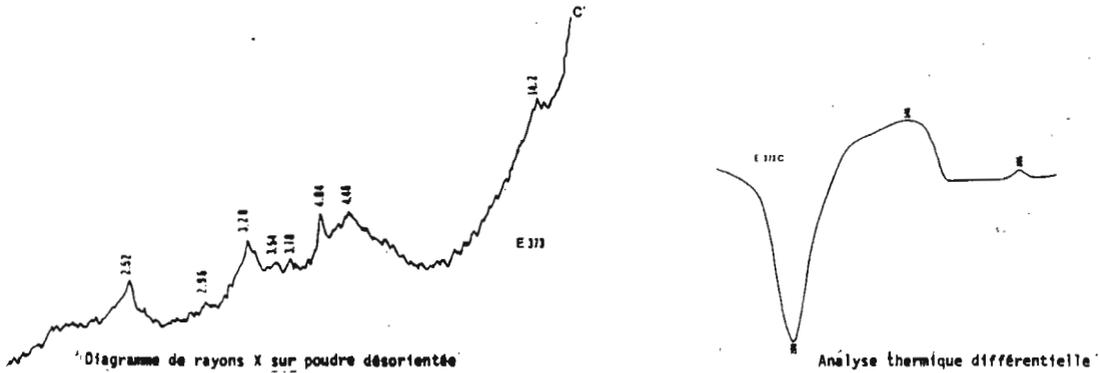
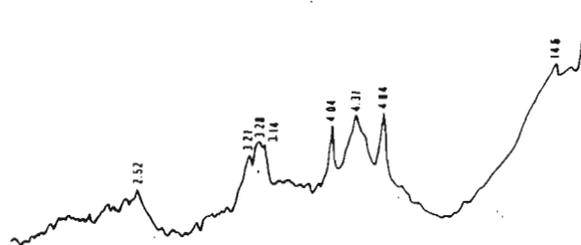


Diagramme de rayon X sur échantillon orienté après divers traitements

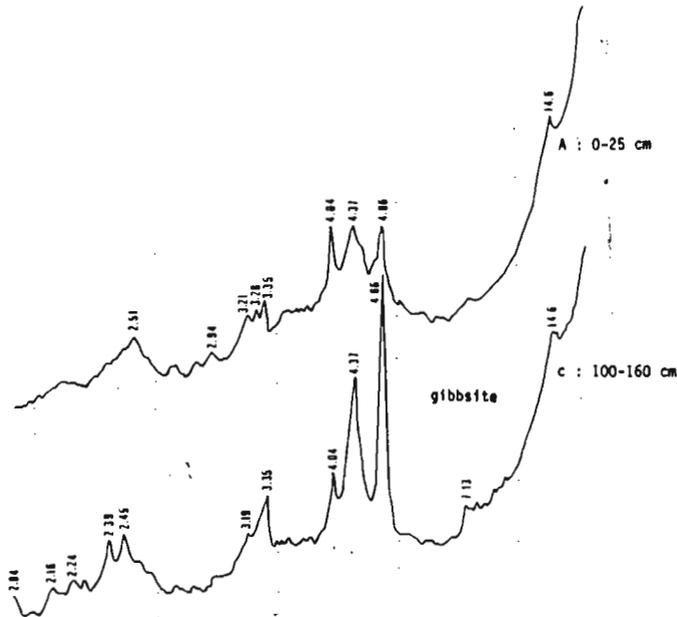


SOL A ALLOPHANE TRÈS HYDRATE SANS GIBBSITE : HYDRANDEPT
 Profil E 373 Queillen - Sud Chiloé

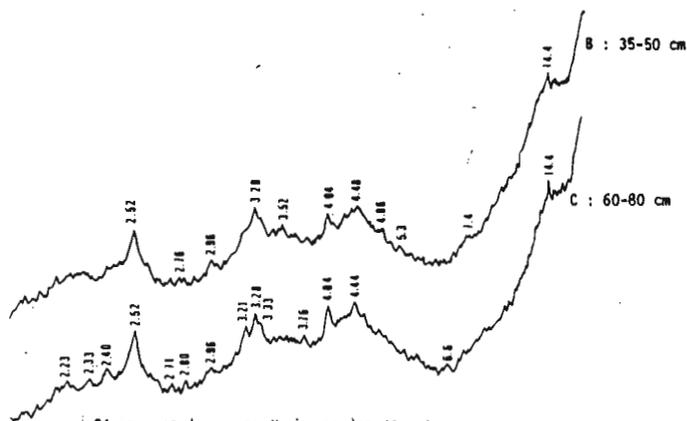
c : 60-80 cm



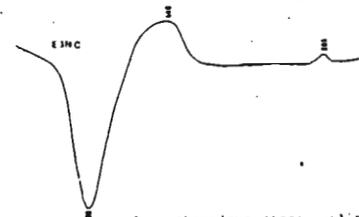
SUD DE CASTRO : Profil E 371 c = 110-150 cm
 Sol à allophane avec gibbsite : dystrandept / hydrandept



CORDILLERE CENTRALE : Profil E 376 A = 0-25 C = 100-160 cm
 SOL A ALLOPHANE AVEC GIBBSITE : OXYDYSTRANDEPT/HYDRANDEPT



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée
 REGION DE CASTRO Profil E 374 b : 35-50 cm

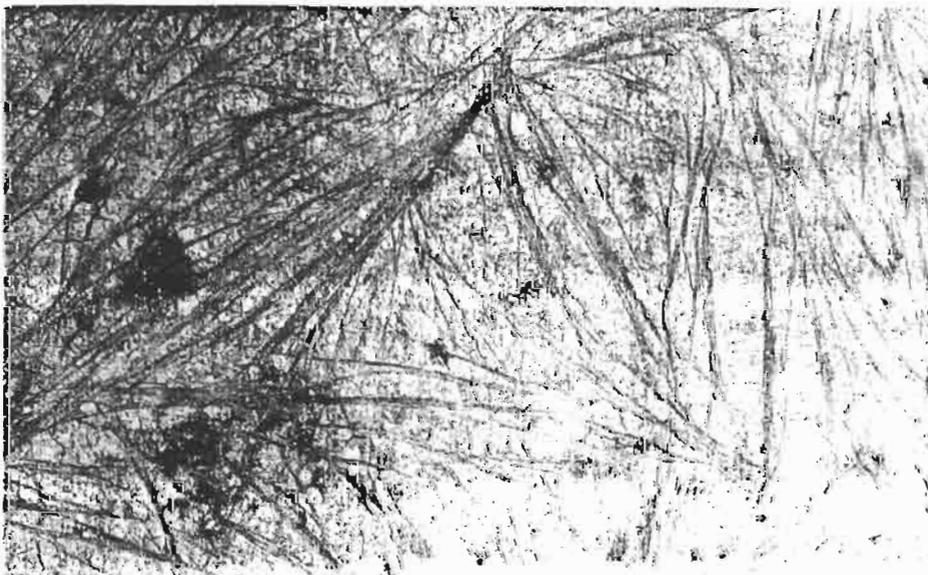
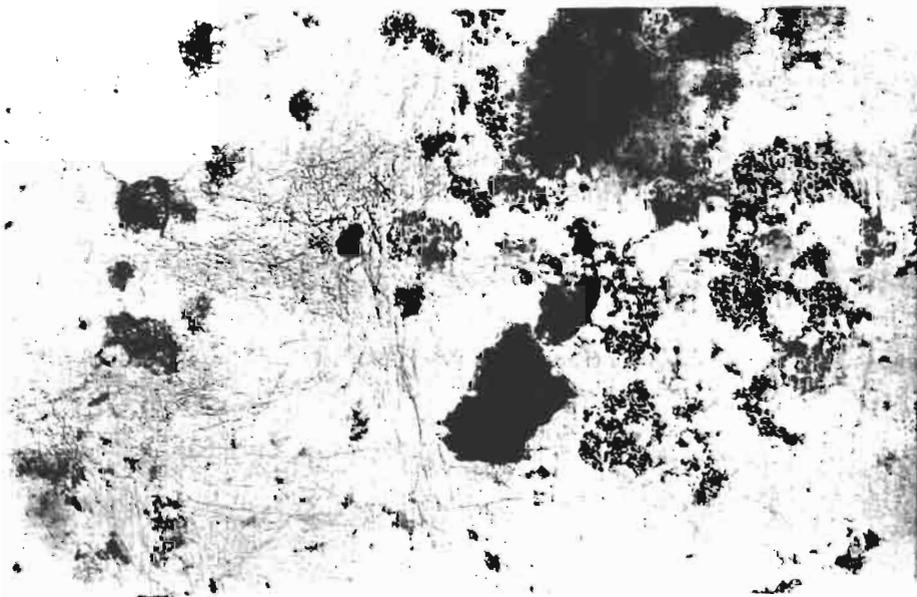


Analyse thermique différentielle
 c.: 60-80 cm

SOLS A ALLOPHANE SANS GIBBSITE : DYSTRANDEPT

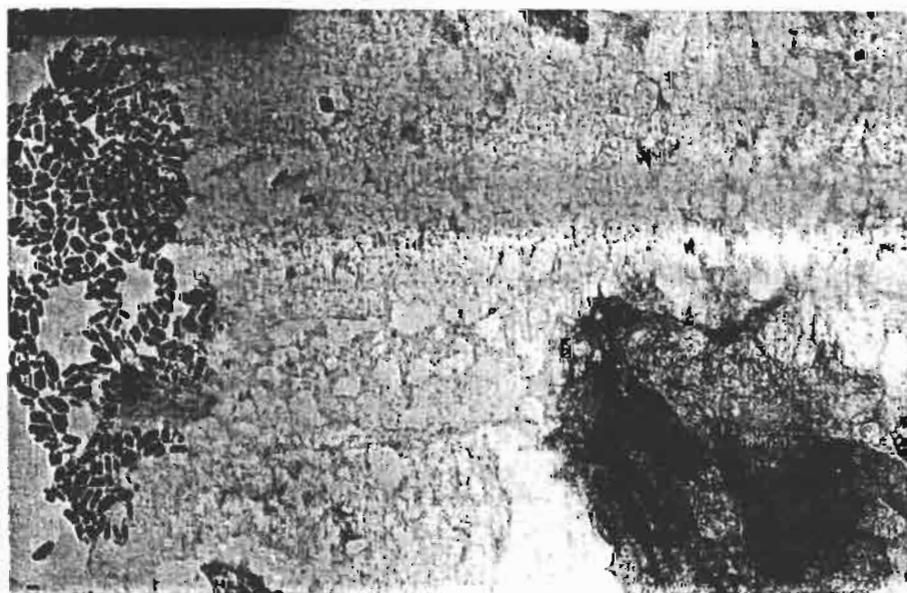
Cliché: 10494 -(TRICHET) = E 373c

Cliché: 10500- (TRICHET) = E 373c égout de centrifugation

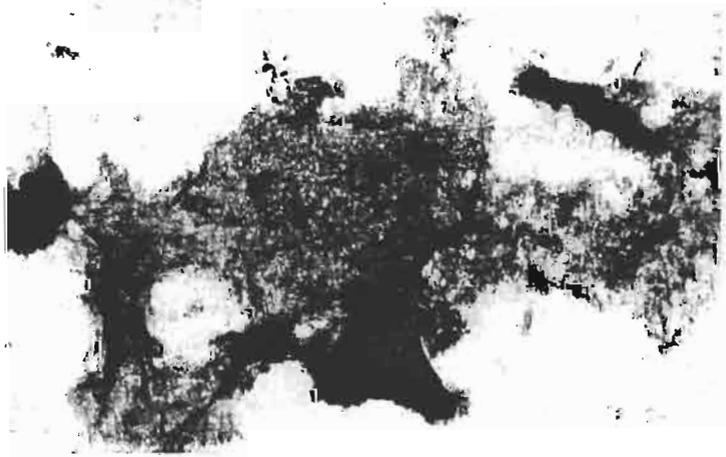


Cliché: 10490 - (TRICHET) E 370 c

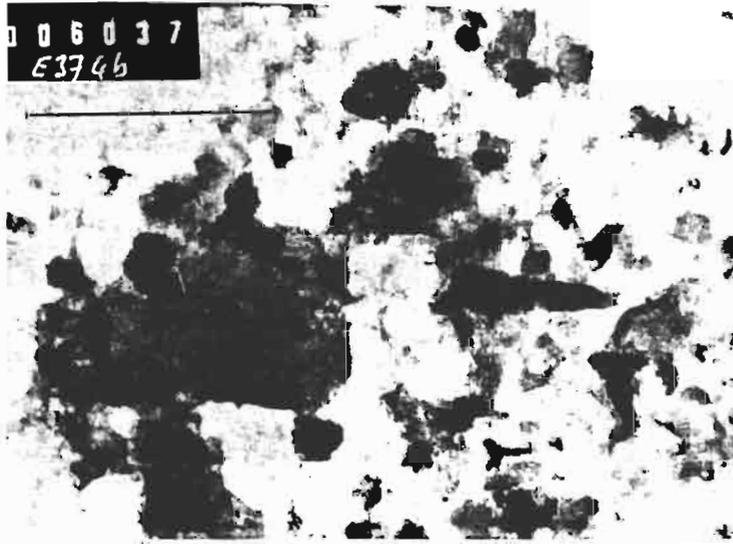
Cliché - 10497 (TRICHET) E 373 c



E 373 c



Cliché 6037 (SIEFFERMANN) E 374 b



SITUATION - CLIMAT

La chaîne andine aux abords du volcan Osorno et vers le fjord de Reloncavi recevrait plus de 3 à 4m de pluie par an. Par contre, la pluviométrie est plus faible lorsqu'on se rapproche de Puerto Varas (1.700mm) et de Río Frio, mais elle croît à nouveau à proximité de la cordillère côtière. La température moyenne est de 11°C.

La vaste plaine agricole qui s'étend entre les deux chaînes montagneuses a pour substratum des moraines glaciaires d'époques variées, ainsi que des épandages fluvio-glaciaires.

Les moraines donnent un paysage ondulé de collines. Ces moraines sont recouvertes d'un manteau de cendres et de ponces de plusieurs mètres d'épaisseur qui s'amincit progressivement en se rapprochant de la cordillère côtière. Les épandages fluvio-glaciaires ont une très faible pente ou sont plats, en terrasses successives, en gradins. L'écoulement des eaux est lent. Le recouvrement de cendre est peu épais (généralement 1m). Il y a peu de temps encore, c'était une grande forêt marécageuse. Ce sont les sols de niadi très particuliers au Chili.

MINÉRALOGIE DES SABLES

1) Sur les pentes du volcan Osorno, les coulées basaltiques sont relativement récentes, scoriacées, fortement fissurées et recouvertes d'une maigre forêt. Par place, cependant, subsiste une grande forêt qui a été épargnée par les laves. Les roches sont très abondantes, mais, dans certaines parties concaves, on peut rencontrer des accumulations de cendres, sans doute plus récentes.

Ces cendres humifères sont à peine altérées et le sol est encore très sableux.

L'olivine domine très largement avec un peu d'hypersthène et d'augite mais il n'y a pas d'hornblende. Les minéraux légers sont représentés par des feldspaths sans quartz.

Olivine : 73%, Hy : 12%, Augite : 15%, M.L. : % sables : 5%.

2) Par contre, sur les pentes du volcan Cabulco, les couches successives de cendres et de ponces sont déjà fortement allophanisées. La ponce pourrie, très hydratée au sud d'Ensananda, près du fjord de Reloncavi, ne contient que de l'hypersthène et des feldspaths sans quartz.

3) La transversale Llanquihue - Río Frio, du volcan vers la côte, montre la diminution progressive de l'hypersthène 82 - 59 - 51 et l'augmentation régulière de la hornblende 1 - 28 - 39, l'augite et l'olivine sont très peu représentées.

E 314 : On remarque à la base du dépôt de cendre, juste au-dessus de la moraine, l'abondance des épidotes et des quartz. Ce sont parfois les uniques constituants de la fraction légère des sables. On rencontre aussi quelques minéraux du métamorphisme : zircon, grenat ... qui, comme les épidotes, n'apparaissent pas en surface. Ces premières cendres riches en hornblende et épidote, proviendraient d'une reprise du volcanisme avec débouillage de la cheminée volcanique et explosion due à la viscosité du magma acide.

Ces horizons profonds à épidote, hornblende, quartz et gibbsite peuvent être comparés à un sol similaire pincé entre deux moraines dans la même région. La moraine inférieure est déjà très nettement altérée et présente des blocs plus ou moins pourris. Par contre, la moraine supérieure est intacte. Un gros tronc d'arbre fort bien conservé, inclus dans ce sol, a permis de dater à plus de 40.000 ans (Laugénie) l'âge de la moraine supérieure et donc celui du sol qu'elle recouvre. Les horizons profonds similaires à gibbsite de la région ont donc vraisemblablement aussi plus de 40.000 ans.

A ces premiers dépôts de cendres, auraient succédées des cendres plus basiques à hypersthène et même un peu d'olivine issues d'un écoulement plus libre du magma. Il n'y a pas d'épidote et moins de quartz.

E 312 : Au bord du lac Llanquihue, en se rapprochant des volcans, les cendres sont également à dominance d'hypersthène. Le niveau profond renferme aussi un peu d'épidote, attribuable à une reprise violente du volcanisme. Ce dépôt de cendre est beaucoup plus jeune, le sol n'a pas de gibbsite bien que situé en région plus humide, et recouvre des épandages lacustres postérieurs à la dernière glaciation.

L'âge du sol situé au-dessus de la moraine altérée a pu être fixé à moins de 15 000 ans (Laugénie) grâce à un horizon tourbeux enfoui sous d'autres couches de cendres.

La composition minéralogique de ce sol se rapproche de celle des horizons supérieurs du profil E 314 et davantage encore de celle des horizons profonds du profil situé au bord du lac Llanquihue. Cette période de 15.000 ans serait trop courte, même dans ces conditions climatiques très humides pour l'apparition de gibbsite en quantité notable.

E 315 : C'est le profil le plus éloigné du volcan. La composition minéralogique de la cendre s'apparente à celle des 2e/3e sols enterrés du profil 314.

PROFILS	Prof. cm.	Hypersthène	Augite	Olivine	Hornblende	Epidote	Zircon	MLXS	Minéraux légers	
Llanquihue										
E 312 a	0 - 25	75	9	8	6	2		16%	Enormément de verre et Feldspaths -idem- Feldspaths Quartz, feldspaths	
b	40 - 60	81	13	4	2	0		41%		
c	80 - 100	89	2	8	1	0		47%		
e	210	82	2	2	14	0		27%		
f	330	63	15	4	3	14	1	46%		
Puerto Varas										
E 314 a	0 - 20	74	5	7	13	1		6%	Feldspaths ; verres en voie d'altération. Feldspaths, peu de verre Feldspaths, peu de verre Quartz, rares feldspaths gibbsite.	
b	60 - 80	59	9	4	28			29%		
c	100-140	72	14	5	9	-		13%		
d	140-180	66	21	6	7			19%		
e	400	50	7	6	32	5		8%		
f	500	21	-	1	65	13		10%		
Rio Frío										
E 315 b	40 - 60	51	8	1	39	0	1	11%	Quartz et felds, rares grenats.	
c	90 - 130	23		+	31	44	2	8%		
E 308	Sol de 15.000 ans sur la moraine supérieure : Entre 312 et 314 dans l'espace.									Quartz, feld. chlorite
		64	8	+	19	9	0	35%		
E 309	Sol de 40.000 ans sous la moraine supérieure inaltérée et sur la moraine inférieure qui est en partie altérée.									Quartz et rares feldspath
		5	+	0	59	36	0	36%		

LES SOLS :

1) - Sols jeunes à allophane du volcan Osorno

Les pentes du volcan Osorno sont parsemées de vastes coulées basaltiques relativement récentes, fortement crevassées et couvertes d'une petite forêt rabougriée. Quelques sites ont été épargnés et on observe, sous une très grande forêt, des dépôts de cendres dans les replats et les parties concaves. Les surfaces sont restreintes et sans intérêt agricole.

Ces sols jeunes possèdent déjà les caractères des sols à allophane perhydratés. L'humidité atteint 75% et décroît considérablement après dessiccation à l'air. Ils réagissent fortement au test de Fields.

Les rayons X ne révèlent que des minéraux primaires (3.20 - 4.04 Å). La dispersion a lieu en milieu acide.

Ces sols jeunes semblent bien pourvus en bases échangeables (7 mé p. 100 de sol), malgré des teneurs en matière organique modérées (7%, la litière forestière de surface ayant été enlevée).

L'évolution vers l'allophane à forte hydratation est donc déjà très nette, bien qu'il n'y ait pas encore beaucoup d'allophane formé.

2) Sols à allophane perhydratés, sans gibbsite, à très faible dessèchement temporaire de surface. Profil E 312 :

Le profil observé comporte, sur 3.5m, au-dessus des dépôts lacustres glaciaires du bord du lac Llanquihue, plusieurs couches successives de cendres fines allophanisées et de ponces, plus ou moins pourries et hydratées, avec encore quelques éléments durs. Certains horizons plus foncés indiqueraient des sols enterrés.

Le sol est friable, très meuble, limoneux, très doux entre les doigts, moins onctueux que ne le seraient les sols des tropiques, d'humidité analogue (D.A. = 0.6 en surface, 0.4 en profondeur). Le FNa réagit instantanément.

Les teneurs en matières organiques (15% en surface, 6% à 1.5m - C/N = 11 à 12), sont voisines de celles des sols à faible dessèchement temporaire de surface de Chiloé, mais les teneurs en bases échangeables sont un peu plus fortes (6mé). Les pH eau et KCl sont voisins. Les AF l'emportent nettement sur les AH, surtout en profondeur. La capacité d'échange de cation double de valeur entre pH4 et pH9.

L'hydratation de ce sol est considérable. Elle est plus faible en surface qu'en profondeur. Comme dans les sols analogues de Chiloé, il y a un net accroissement de l'eau dite utilisable (pF3 - pF4.1) sur sol séché à l'air, en surface par rapport à la profondeur. L'humidité au champ est très voisine de celle du pF2.5 sur sol conservé humide.

La dispersion a lieu en milieu acide. Les rayons X ne révèlent quère que la présence de minéraux primaires avec, cependant, une raie à 14 Å inchangée par saturation en K, Mg, ou glycérolage. Cette raie passerait à 10.5 Å en s'estompant à 500°. Elle est fort peu modifiée à 150 ou 200°.

E 312 - CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS à DIVERS pH - SOL HUMIDE					
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mē. pour 100gr de sol sec étuve.					
sol conservé humide					
	Profondeur en cm.	pH4	pH7	pH9	S/T, pH7
a	0 - 25	-	37.1	-	16
b	40 - 60	35.6	41.8	63.8	14
c	80 - 100	59	69	70	9

Ces diagrammes de rayons X sont très comparables à ceux du sol daté de moins de 15.000 ans. La minéralogie de la fraction fine inférieure à deux microns et des sables est analogue. La surface spécifique BET est relativement élevée : 140.

La spectrographie dans l'infrarouge indique une forte absorption à 950cm^{-1} attribuable à l'abondance des Al^{IV} . Il y a un net épaulement à 1.000cm^{-1} , plus prononcé dans l'argile grossière que dans les sols de Chiloé, probablement plus anciens et plus évolués. Les diagrammes sont pratiquement identiques sur les échantillons séchés à l'air ou lyophilisés.

Il faut signaler la double absorption dans la bande H_2O à $1.620 - 1.725\text{cm}^{-1}$. L'absorption à 1.725cm^{-1} est vraisemblablement due à la matière organique. Elle est beaucoup plus faible en profondeur, vers 3m, avec 0.2% de matière organique, qu'en surface. Le sol a pourtant été traité à H_2O_2 .

L'absorption à 1.440cm^{-1} serait aussi attribuable à la matière organique. Son intensité varie donc avec celle de la bande à 1.725cm^{-1} . Elle est plus prononcée à 1m de profondeur qu'à 3m et l'absorption est importante à 3.450cm^{-1} en surface et en profondeur.

On ne constate pas une variation sensible de nature de l'allopiane en profondeur.

Le microscope électronique montre un réseau dense de fibres. Ce sont bien les caractéristiques des hydran-depts.

3) - Les sols à allopiane perhydratés, avec gibbsite, à très faible dessèchement temporaire de surface. E 314

Ces sols sont constitués d'alternance de cendres allophanisées et de tufs encore relativement durs, quoique déjà profondément altérés. L'épaisseur de ces formations peut atteindre 5m au-dessus de la moraine.

A l'exception de l'horizon de surface cultivé, qui a subi une faible dessiccation, tous les horizons sont très hydratés, avec 100 à 200% d'eau. Les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques sont très voisines de celles du précédent profil. Les teneurs en bases échangeables sont plus faibles. Les pH dans le KCl sont plus élevés que les pH dans l'eau (sauf en surface). Le FNa réagit instantanément. La densité apparente est constante (0.4) et les AF nettement plus importantes que les AH.

La capacité d'échange de cation croît dans tous les horizons entre pH4 et pH9.

E 314 - CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS PAR L'ACETATE A DIVERS pH: sol humide ou séché air										
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve.										
sol conservé humide						sol séché à l'air				
	Profondeur en cm.	pH4	pH7	pH9	S	S/T	pH4	pH7	pH9	S/T
a	0 - 20	44.5	50.3	72	8.5	17	32	48	70	18
b	60 - 80	43.5	53.3	76.1	2.0	4	25	35	53	.6
c	100 - 140	74.6	-	93	0.8	1	31	36	49	3
e	400	-	32.8	-	0.6	2				
f	500	52.5	63.5	65	0.8	1				

Les rayons X après dispersion en milieu acide, montrent l'accroissement régulier de la gibbsite de la surface vers la profondeur. En profondeur, vers 4m, la teneur en gibbsite passe par un maximum et les concrétions blanches de gibbsite pure sont nettement visibles en petits batonnets ou nodules de quelques millimètres. Après déferfification, les raies à 14 Å et à 7.13 sont nettement renforcées. La raie à 14 Å disparaît à 500°. Il y aurait donc, en plus des substances allophaniques et de la gibbsite, un minéral à 14 Å et un peu de kaolinite.

Un renflement entre 9 et 10 Å, encore apparent à 150°, disparaît à 200°. Ce serait l'indication d'un peu d'hallowite. La raie à 4.44 Å quoique faible et masquée par celle à 4.37 Å de la gibbsite, semble se maintenir en partie, après orientation, ce qui serait l'indice d'hallowite. Ces argiles n'existeraient d'ailleurs qu'en faibles quantités.

La spectrographie dans l'infrarouge montre bien l'accroissement de la gibbsite en profondeur.

Dans tous les horizons, le maximum d'absorption a lieu au-dessus de 1.000cm^{-1} par suite de l'abondance des Al hexacoordonnées, nécessaires à la formation de la gibbsite.

Un renflement à 950cm^{-1} est plus prononcé en surface qu'en profondeur. Il témoigne de l'existence d'une certaine proportion d'Al^{IV} plus importante en surface qu'en profondeur.

Le maximum d'absorption à 1.050cm^{-1} est aussi celui de la gibbsite.

Comme dans le profil précédent, on note un dédoublement de la bande H₂O à 1.650 et 1.725cm^{-1} en surface. En profondeur, l'absorption à 1.725cm^{-1} disparaît. Elle serait donc attribuable à la matière organique fixée sur l'allophane. Cependant, la bande à 1.440cm^{-1} , qui serait aussi due aux substances humiques et qui devrait être liée, par conséquent, à la bande à 1.725cm^{-1} est plus importante, en profondeur et il y a là une certaine contradiction. Dans le cas présent; sol évolué, riche en gibbsite, est-elle attribuable à l'hisinguerite comme le supposent Besoain et Kanno ?

L'hallowite ou autres argiles cristallines existent en petite quantité (R.X, Infrarouge).

L'analyse thermique différentielle montre bien l'accroissement de la gibbsite en profondeur et la présence d'un peu d'hallowite (masquée par le crochet exothermique dû à la matière organique).

Ces diagrammes des horizons de profondeur sont semblables à ceux du sol pincé entre deux moraines glaciaires (E 309) et daté par Laugénie à plus de 40.000 ans. Les dépôts les plus profonds, très riches en gibbsite auraient donc au moins cet âge.

Dans l'échantillon de plus de 40.000 ans on observe, en plus de la masse amorphe rétractée, quelques longs batonnets. Nous en avons déjà observé de semblables dans un sol à gibbsite du Costa-Rica. Peut-être s'agit-il de gibbsite ?

Dans l'échantillon de 15.000 ans, le microscope électronique montre une masse amorphe rétractée avec un paquet de fibres semble-t-il (cliché 6081).

4) - Transition vers les sols à métalloysite

En se rapprochant de la cordillère côtière, les sols sont différents.

L'horizon supérieur est déjà nettement motteux et n'a pas cette fine friabilité des sols à allophane. Le FNa réagit très peu. La densité apparente est de 0.72.

Plus en profondeur cependant, on retrouve à peu de chose près, le caractère très meuble et très doux des sols à allophane. A partir de 60cm, le sol paraît moins allophanique, avec une sensation d'argile perceptible au toucher. Ces deux horizons donnent une coloration instantanée avec le FNa. Ils correspondent à deux dépôts différents.

Les rayons X montrent des raies prononcées à 4.41 Å et 3.55 même dans l'horizon très meuble d'apparence allophanique. Il y a une raie à 7.3 Å qui est nettement renforcée après défférioration et orientation. La raie de la gibbsite est notable. La raie à 4.4 Å semble bien conservée après orientation. Il s'agirait de métalloysite plutôt que de fire-clay, mais en présence de la raie à 4.37 Å de la gibbsite, il est difficile d'avoir une certitude.

Une raie à 14 Å est inchangée par saturation en K, Mg et glycérolage et passerait à 10.5 à 500° en s'affaissant. Par chauffage à 150 - 200°, cette raie est peu modifiée, seulement un peu affaissée déjà à 200°.

La quantité d'eau retenue par le sol à différents pF est beaucoup plus faible que dans tous les précédents déjà examinés. Le dessèchement est cependant bien marqué en surface par rapport aux horizons profonds.

Les teneurs en bases échangeables ne sont pas plus importantes que dans les sols situés plus à l'est. Le sol reste très désaturé : 10%. Le pH eau est nettement supérieur au pH KCl, surtout en profondeur (4.4 - 4.9) à la différence des sols à allophane.

La composition minéralogique des deux dépôts correspond bien à celle observée dans les horizons profonds enterrés du profil E 314 - allophane à gibbsite.

Si ces deux formations sont de même âge et se correspondent, il est donc intéressant d'observer le sens d'évolution divergent de ces deux sols.

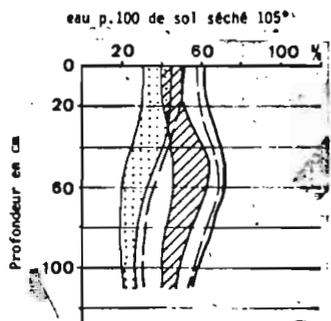
La formation de la gibbsite a été très intense dans le profil E 314, avec conservation de l'allophane. Dans le profil E 315, situé en région moins arrosée, il y a eu formation d'halloysite et de quantités modérées de gibbsite.

On peut être surpris de ne pas rencontrer l'halloysite 10 Å, comme ce serait la règle dans les sols similaires des tropiques. Le climat a peut-être été plus sec dans le passé. La présence notable de gibbsite montre l'ancienneté de ce sol.

Plus à l'ouest, on rencontre des sols rouges argileux que nous n'avons pas étudiés.

CONCLUSION

Cette transversale illustre parfaitement le passage des sols à allophane perhydratés sans gibbsite, vers les sols plus anciens à gibbsite, mais d'apparence semblable et enfin la transition vers les sols à argile cristalline, ici également avec gibbsite.



Profil E 315 : Rio Frio
Transition vers les sols à halloysite

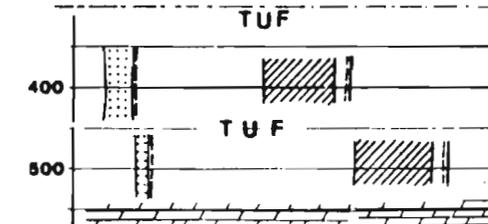
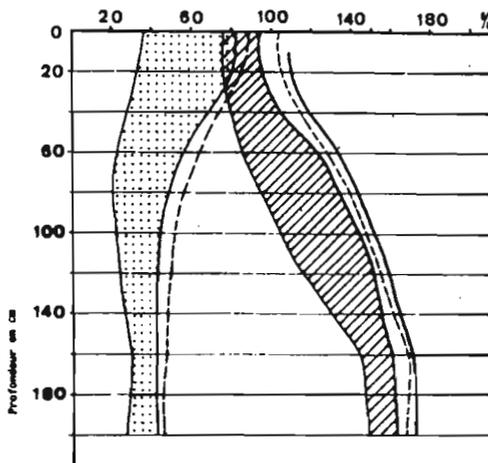
LEGENDE

En ordonnée : Profondeur du sol en cm

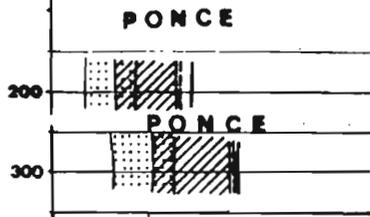
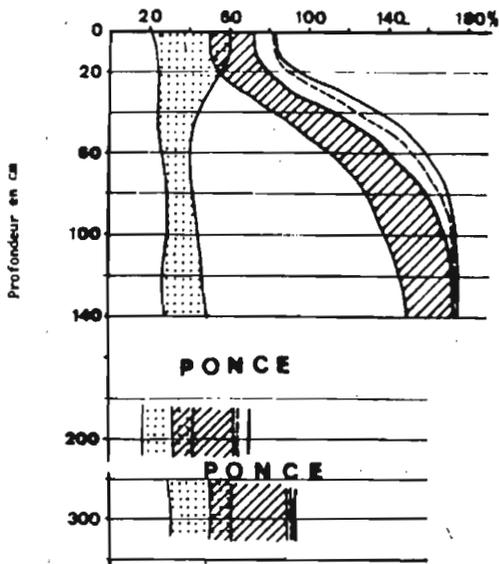
En abscisse : Eau p. 100 de sol séché 105°C

Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2

- déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
- déterminée sur échantillon conservé humide
- valeur de l'humidité à pF 2,5
- eau naturelle au moment du prélèvement de sol.



Profil E 314 : Nueva Braunan
Sol à allophane avec gibbsite

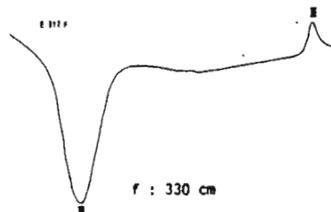
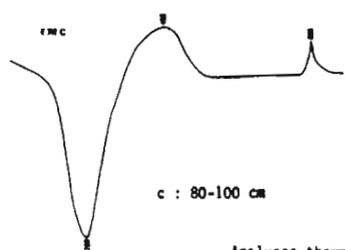


Profil E 312 : Los Ricos
Sol à allophane sans gibbsite

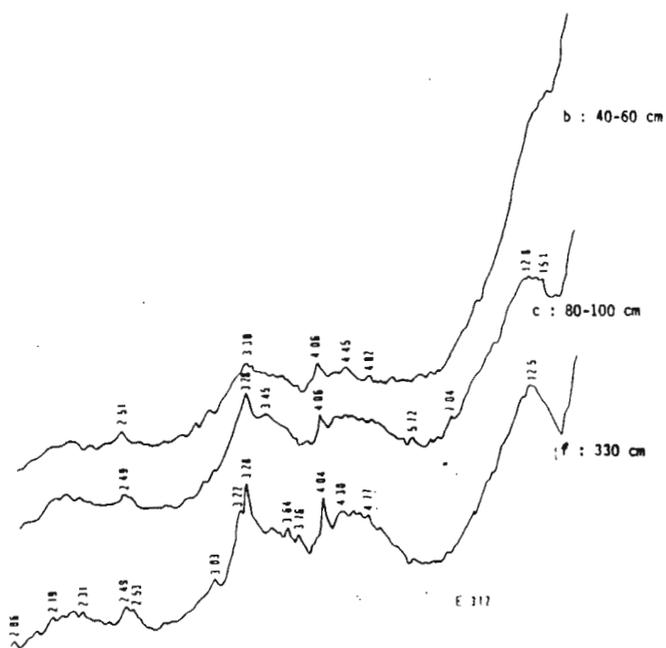
RETENTION EN EAU DES SOLS A ALLOPHANE A DIVERS pF
Sol conservé humide ou préalablement séché à l'air.

DU VOLCAN OSORNO A L'EST

VERS



Analyses thermiques différentielles



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

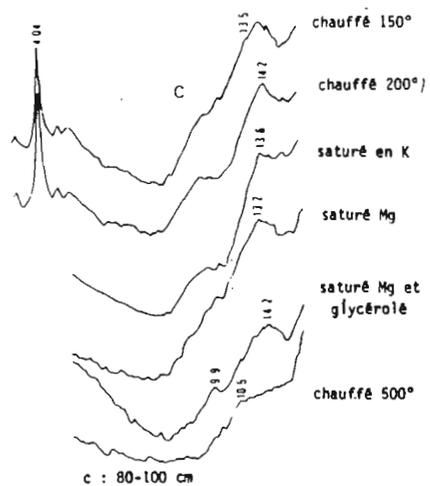
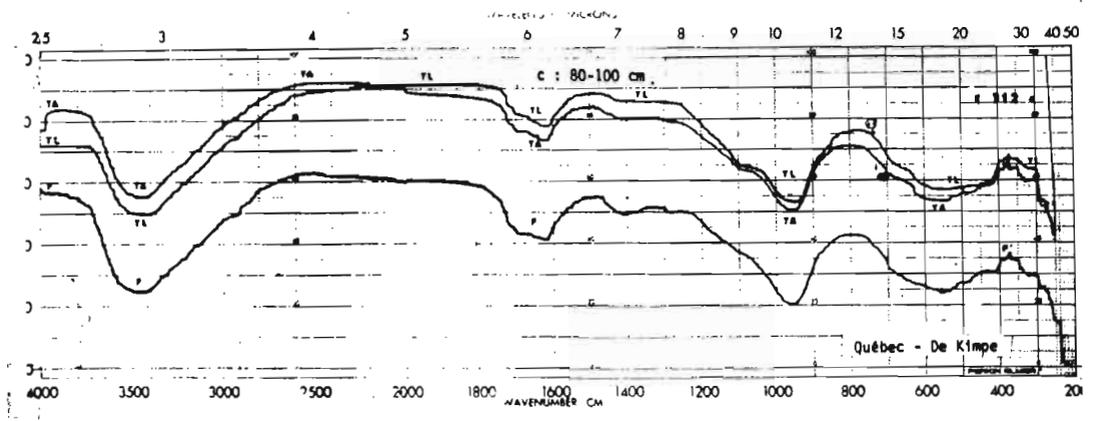
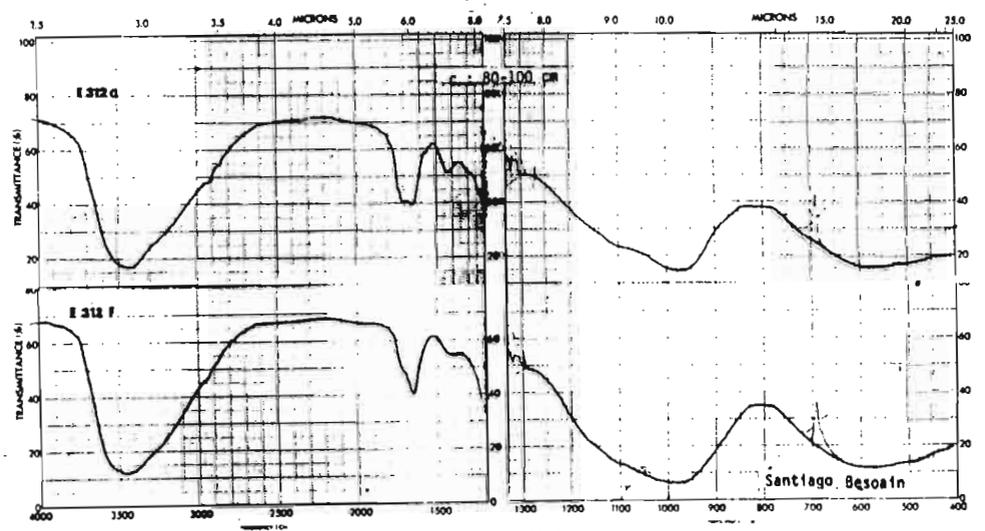


Diagramme de rayon X sur échantillon orienté après divers traitements

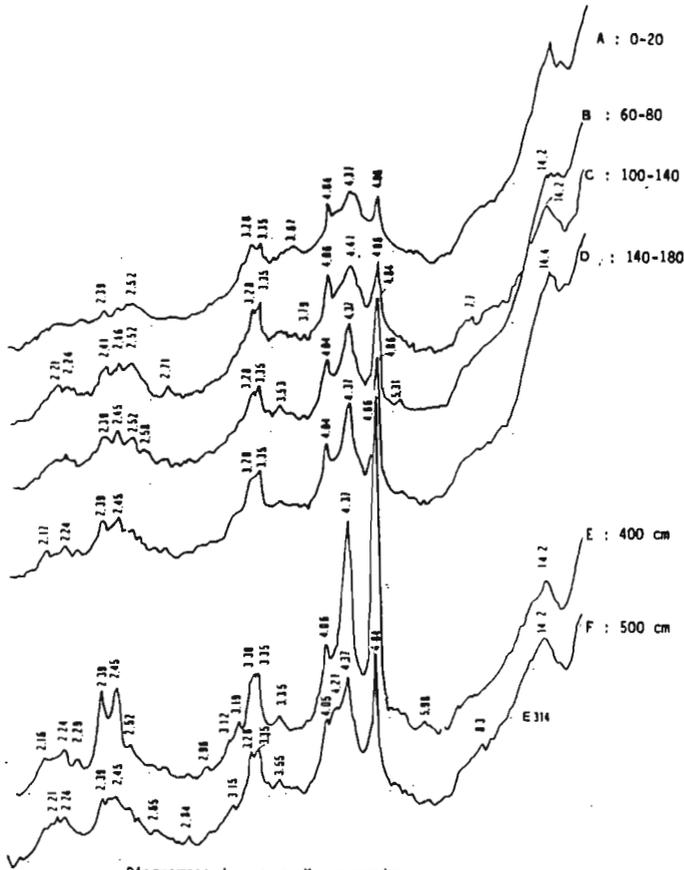


TA : argile séchée à l'air } argile totale
 TL : argile lyophilisée }
 F : argile séchée à l'air : fraction très fine de l'argile

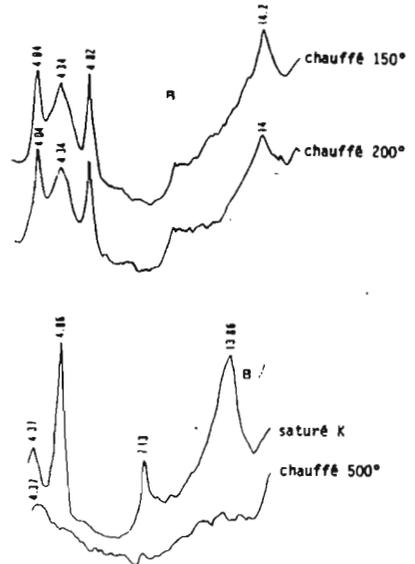


Diagrammes d'absorption dans l'infra-rouge

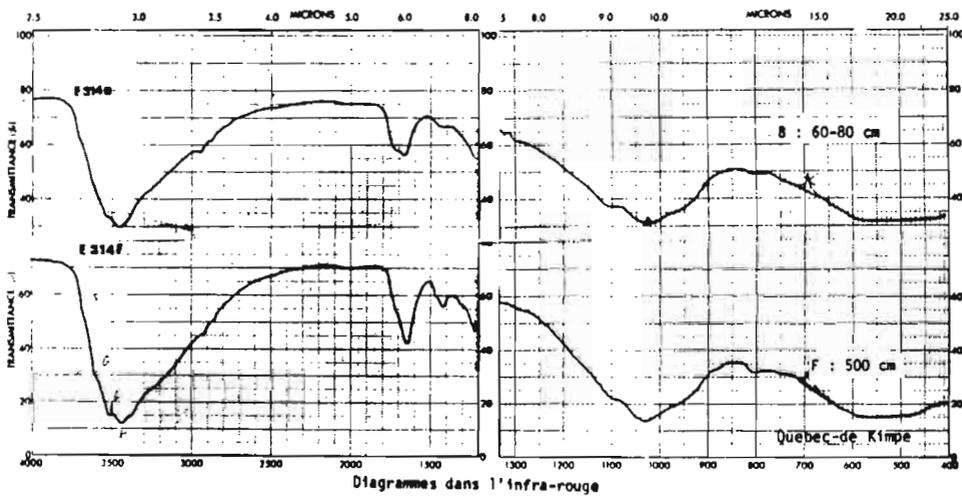
SOL A ALLOPHANE SANS GIBBSITE
 Profil E 312 - Lago Llanquihue
 a: 0-25 cm b: 40-60 cm f: 330 cm



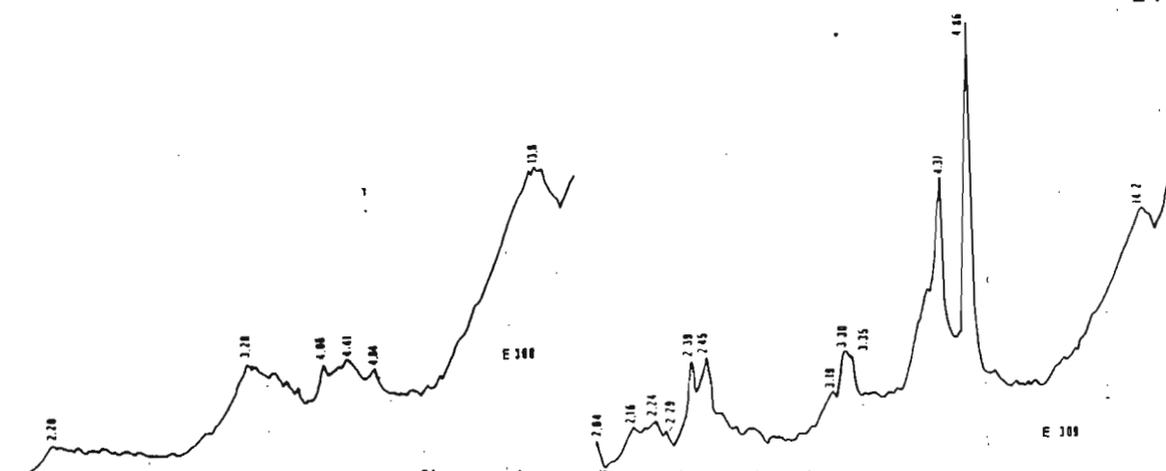
Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée



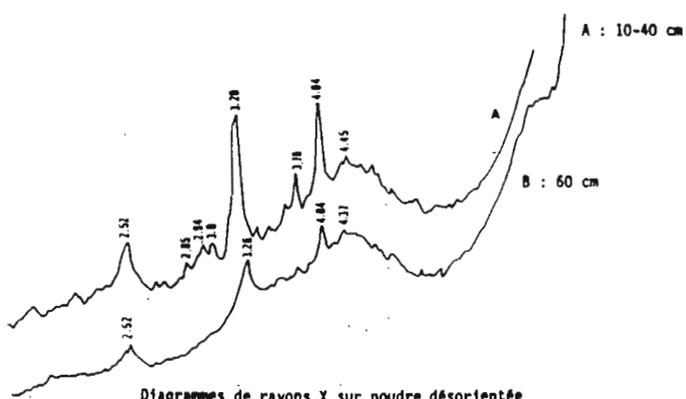
Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés - B : 60-80 cm



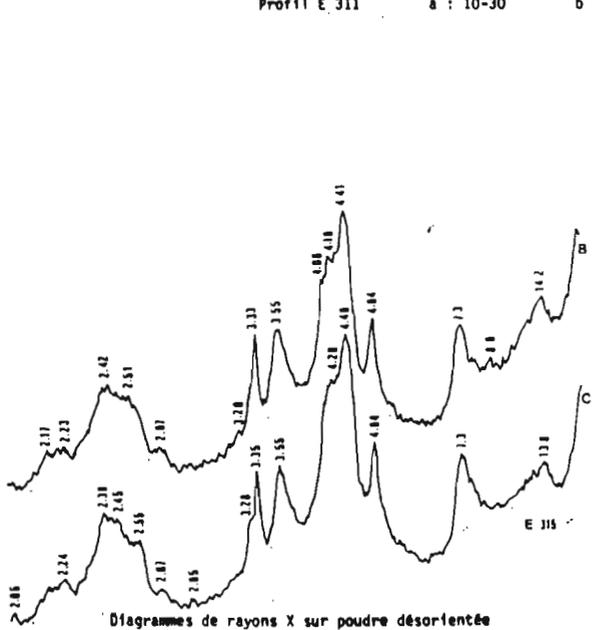
SOL A ALLOPHANE AVEC GIBBSITE
 Profil E 314 - Puerto Varas - Nueva Braunau
 a : 0-20 b : 60-80 c : 100-140 d : 140-180
 e : 400 cm. f : 500 cm



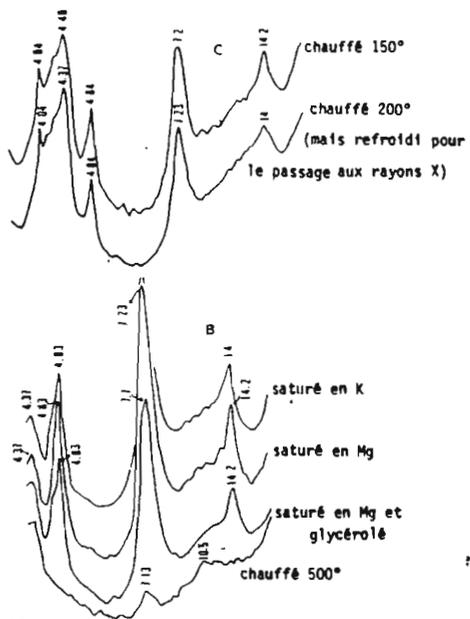
Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée
 Sol à allophane organique enfoui d'environ 15.000 ans
 Sol à allophane enfoui entre deux moraines glaciaires avec un tronç d'arbre intact daté à plus de 40.000 ans



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée
 SOL A ALLOPHANE TRES JEUNE SUR LES PENTES DU VOLCAN OSORNO
 VITRIC - DYSTRANDEPT
 Profil E. 311 a : 10-30 b : 60



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

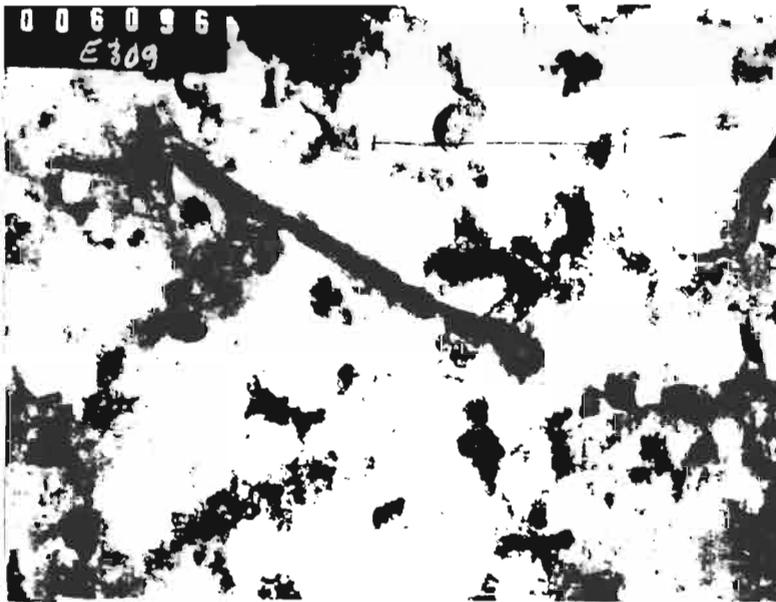


Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés

SOL A HALLOYSITE PRES DE LA CORDILLÈRE COTIÈRE
 Profil E 315
 a: 0-20 b: 40-60 c: 90-130

Cliché: 10906 (TRICHET) E 312 a égout de centrifugation

Cliché : 6096 (SIEFFERMANN) E 309 sol enterré de plus de 40.000 ans



SITUATION - CLIMAT

Par la topographie cette transversale est tout à fait semblable à celle que nous venons d'examiner plus au sud du volcan Osorno vers Rio Frio.

Les variations climatiques paraissent cependant plus importantes. La plaine est moins arrosée que plus au sud.

Les versants du volcan Antillanca sont très humides avec 3 à 4m de pluviométrie annuelle. Les piemonts des Andes sont encore humides avec 2m de pluie annuelle à Puyehue. Par contre la plaine à proximité d'Osorno ne reçoit que 1.300mm de pluie annuelle et le début de la cordillère côtière 900mm. En s'enfonçant davantage à l'ouest dans la cordillère côtière, la pluviométrie s'accroît mais les cendres disparaissent.

MINÉRALOGIE DES SABLES

Besoain (1969) avait signalé l'abondance des pyroxènes dans la fraction lourde de trois profils de cette région, entre la ville d'Osorno et la frontière de l'Argentine.

Cordillère andine

Sur les pentes du volcan Antillanca à 1.000m d'altitude les cendres sont mêlées à des scories noires grossières et ne renferment pas de hornblende, mais seulement des hypersthènes, des pyroxènes monocliniques et un peu d'olivine (E 317).

Piemonts

A 900m d'altitude la composition des lits de cendres et de scories peu altérés est analogue (E 320).

A 600m d'altitude ce ne sont plus les sols peu évolués mais de véritables sols à allophane très hydratés.

On distinguerait deux dépôts :

Le dépôt le plus en surface montre une large dominance de l'hypersthène comme dans les matériaux peu altérés situés à proximité du volcan.

Le dépôt de profondeur est beaucoup plus riche en olivine et renferme aussi de l'épidote. Cette épidote est-elle due à une reprise du volcanisme avec entraînement des minéraux de la cheminée volcanique enrichis en épidote lors de la montée du magma. Cette hypothèse paraît plus probable qu'un mélange sur les pentes escarpées de ces piemonts.

Plaine côtière

Dans la vaste plaine, doucement ondulée, qui s'étend jusqu'à Osorno à l'ouest, les cendres recouvrent les moraines glaciaires sur une épaisseur de 1 à 2 mètres.

La composition minéralogique est très constante d'un profil à l'autre et dans le profil lui-même qu'il s'agisse de la surface ou de l'horizon proche de la moraine.

Trois profils ont été étudiés :

- L'un est un sol à allophane perhydraté, situé près du lac Puyehue en région encore humide : 2m par an (E 326).
- L'autre est un sol de Niadi, sol marécageux, en zone très plane recouvrant des cailloutis fluvio-glaciaires.
- Le troisième est situé près de la ville d'Osorno dans la station expérimentale de Remehue et est bien représentatif des Trunao Osorno.

Dans tous ces sols la composition des sables est identique avec une légère décroissance de l'augite en profondeur, plutôt à l'état de traces. La mise en place des cendres dans cette plaine résulte donc d'une sédimentation éolienne très régulière et relativement récente.

C'est la limite occidentale du recouvrement de cendre. Les sols sont plus évolués, plus anciens, renfermant soit de la gibbsite en quantité notable (E 340) soit de l'halloysite et de la métahalloysite. Ces sols ont une nette sensation d'argile au toucher.

La proportion d'hypersthène diminue dans les sols de la cordillère, en comparaison de ceux de la plaine au profit de la hornblende, et l'épidote apparaît en quantité notable.

La même observation a été faite dans la transversale située plus au sud allant du lac Llanquihue vers l'ouest.

Il s'agirait donc de dépôts de cendres plus anciens que ceux de la plaine et correspondant probablement à l'avant dernière glaciation comme ceux de Nueva Braunau et de Rio Frio.

Par contre les dépôts à hypersthène, sans épidote, de la plaine centrale plus proche des Andes seraient plus récents en recouvrement sur les matériaux glaciaires de la dernière glaciation. L'absence d'épidote à la base de ce dépôt de cendre s'expliquerait par la jeunesse relative des sols. L'ancien dépôt de cendre à épidote aurait été décapé ou recouvert par les moraines.

Tableau - Variation de la composition des cendres de l'Antillanca vers Osorno

PROFILS	Hypers sthènes	Pyroxène monocli	Olivine	Hornb lende	Epidote	ML%S	Minéraux légers
Sur les pentes du volcan sols à scories peu altérées (1000 m d'altitude)							
E 317 a	65	33	2		+	12%	
b	65	20	15			11%	
E 320	77	19	4	+		20%	
Sur les pentes sous forêt - sols à allophane 600 m. d'altitude							
E 321 a	75	22	2	1		15%	
c	19	35	24	+	22	22%	
Dans la plaine sur les moraines (pluviométrie de 2 à 1,3 m.)							
E 326 a	62	22	12	4		6%	Enormément de verres et felds.
b	78	15	3	4		16%	
c	63	21	8	7	+	30%	Verres et feldspaths.
d	79	8	8	5		8%	
E 325 a	61	26	4	9		1,2%	Verres très abondants, felds.
b	72	23	2	3	0	4,0%	
c	80	13	+	5	2	43%	
d	78	11	0	9	2	29%	
E 323 a	71	17	7	5	0	12%	Verres feldspaths Verres feldspaths + abondants
b	72	14	8	2	4	8%	
c	56	24	7	5	8	10,7	
d	76	10	8	6	+	23	
Ouest Osorno Régions plus sèches (pluviométrie 0,9 m) Sols à halloysite.							
E 327 c	51	6	2	30	11	8%	
Zones intermédiaires entre la transversale: Antillanca-Osorno ville/Volcan Osorno-Rio Frio à Frutillar(Niadi)							
E 307 b	65	20	0	15		41%	
d	80	13	0	7		50%	
E 340 Purranque Niadi							
b	61	8	2	22	7	10%	Trace zircon
E 322 Puyehue vers l'Ardening							trace grenat
a	16	38	39	7		12,6	Verres et reidspaths
b	63	22	12	2		26	Verres et feldspaths

Conclusion

Dans cette vaste région qui va de l'ANTILLANCA à OSORNO-ville et jusqu'à la transversale déjà examinée d'OSORNO-volcan vers l'Ouest, les cendres sont très uniformes, à dominance d'hypersthène et de pyroxènes monocliniques.

Sur la bordure Ouest du recouvrement de cendre, à PURRANQUE et OSORNO-ville, la hornblende est plus abondante et les épidotes apparaissent. Il s'agit de formations plus anciennes.

SUR LES VERSANTS EN FORETS DES ANDES

A 1 000 M D'ALTITUDE : (Profils E 317 - E 320)

C'est la base du cône du volcan à la limite de la végétation forestière. Les sols sont encore très jeunes avec partout des niveaux de scories et de cendres grossières inaltérées.

Les couches de cendres fines intercalées entre ces dépôts grossiers présentent déjà ce caractère d'hydratation permanente.

Ces sols sont recouverts de neige plusieurs mois dans l'année.

A 600 M D'ALTITUDE : (E 321)

C'est la grande forêt humide.

Le dépôt originel de cendres est beaucoup plus fin, probablement plus ancien et les sols qui en dérivent déjà évolués; de véritables hydrandepts.

Le sol est riche en matière organique, de coloration foncée, noirâtre sur 50cm avec environ 20% de matière organique.

Plus en profondeur la coloration devient beige. Le sol est limoneux, bien onctueux, renfermant encore 5% de matière organique à 1,5m de profondeur. Il semble qu'il y ait deux sols superposés.

Propriétés

L'hydratation du sol est très importante, supérieure à 100 d'eau p. 100 de sol (séché à l'étuve). La dessiccation à l'air est en grande partie irréversible.

L'eau dite utilisable sur sol préalablement séché à l'air, c'est à dire la différence des valeurs entre les pF 2.5 ou 3 et 4.2 est très faible en comparaison des valeurs obtenues sur le sol conservé humide.

Il y a donc effondrement du réseau de l'allopmane. Les valeurs obtenues pour les pF sur sol séché à l'air correspondant à peine au quart de celles obtenues sur sol conservé humide.

Les teneurs en bases échangeables sont très faibles et les pH mesurés dans le KCl sont plus élevés que ceux mesurés dans l'eau. Il y a une réaction instantanée et très forte au test Fields (FNa). Les AF l'emportent nettement sur les AH surtout en profondeur. La capacité totale d'échange de cation déterminée dans l'acétate d'ammonium croît avec le pH de détermination.

E 321 - CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS A DIVERS pH:Sol humide et sec Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve.						
	Profondeur	sol conservé humide			sol séché air	sol humide
		pH4	pH7	pH9	pH7	eau à pF 3
a	5 - 30	43.9	52.8	67	29.7	147
b	70 - 100	29	47	60	19.2	132

Minéralogie des fractions fines

Les rayons X n'indiquent que des raies de minéraux primaires, surtout en surface où les cendres sont probablement plus récentes et les particules fines encore peu altérées.

Il y aurait aussi des raies à 12 et à 14 Å.

La spectrographie dans l'infrarouge montre une forte absorption à 950cm^{-1} qui indique l'abondance des Al^{IV} et à 3.450cm^{-1} dans la bande des OH. L'absorption à 1.100cm^{-1} est faible dans la fraction très fine de l'inférieur à 2 microns (celle fraction renfermant le maximum de substance allophanique) mais notable dans la fraction plus grossière qui renferme les quelques argiles cristallines existantes et probablement aussi des formes mieux organisées d'allopmane. On retrouve les mêmes résultats plus au sud dans les hydrandepts de Chiloé.

Dans la bande H₂O il y a deux pics d'absorption à 1.725^{cm-1} et à 1.650^{cm-1}. Le maximum d'absorption a lieu à 1.725^{cm-1} dans la fraction fine de l'argile et au contraire à 1.650^{cm-1} dans la fraction plus grosse. On observe cette même inversion du maximum d'absorption dans les sols à allophane très hydratés des Antilles. L'absorption à 1.725^{cm-1} 1.440^{cm-1} 2.850^{cm-1} et 1.280^{cm-1} est plus importante dans la fraction très fine de l'argile plus allophanique retenant davantage de matières humiques que dans la fraction grossière de l'argile. Il est donc possible que ces bandes d'absorption puissent être en partie attribuées aux matières organiques fixées par les substances allophaniques et ayant résistées au traitement à l'eau oxygénée.

Dans les bandes d'absorption basse fréquence, inférieures à 800^{cm-1} il y a fort peu de détails visibles ce qui souligne le caractère très peu organisé de cette substance.

Notons une bande d'absorption indéterminée à 1.400^{cm-1} surtout dans la fraction fine de l'argile.

L'extraction de la fraction inférieure à 2 microns a été réalisée sur le sol conservé humide. Cette fraction a ensuite été séchée, soit directement à l'air, soit par lyophilisation. Il n'y a guère de différences visibles à l'exception de la bande à 1.100^{cm-1} plus importante dans l'échantillon séché par lyophilisation.

La technique de dissolution différentielle (Segalen) montre que la dissolution de l'alumine et du fer est quasi totale dès la première attaque et très importante. Après 5 attaques acide - base, 93% de la fraction inférieure à 2 microns est dissoute. La composition du produit amorphe serait approximativement la suivante :

Al₂O₃ = 18 SiO₂ = 12 Fe₂O₃ = 16
avec un rapport SiO₂/Al₂O₃ de 1.1.

Le microscope électronique montre des masses amorphes rétractées. Dans certains cas il peut s'agir de particules primaires percées de trous par le faisceau d'électrons. Il semble qu'un fond de fibres existe par place, mais il n'apparaît pas partout avec évidence sur les clichés.

On remarque des grappes de particules arrondies qui peuvent être de l'hallowite glomérulaire très fine ? Il y aurait aussi quelques esquilles anguleuses de verre volcanique.

Il s'agit donc d'un hydrandépt sans gibbsite très classique.

SUR LES PIEMONTS CULTIVÉS DES ANDES

Sols à allophane perhydratés sans gibbsite à faible dessèchement temporaire de surface. Hydrandépt. E 326.

Ce sont les sols recouvrant les collines ondulées des piemonts déjà très cultivés des Andes à environ 350m d'altitude sous une pluviométrie de l'ordre de 2m par an.

Le sol est noirâtre sur 60cm d'épaisseur riche en matière organique puis plus clair en profondeur. Les teneurs en matières organiques sont élevées : 21% dans l'horizon labouré et encore 11% à 1m de profondeur.

Propriétés

L'hydratation est très forte, supérieure à 100%, mais le dessèchement de surface est très sensible et bien mis en évidence sur le diagramme de la page (). On remarque ainsi un accroissement très net de l'eau utilisable dans l'horizon de surface du sol préalablement séché à l'air par rapport aux horizons de profondeur ainsi qu'aux sols des forêts des versants des Andes. Cet accroissement de l'eau utilisable sur sol préalablement séché à l'air peut être attribuable à une meilleure organisation du réseau allophanique de l'horizon de surface, ainsi qu'aux fortes teneurs en M.O. La densité apparente est de 0.6 en surface et de 0.35 en profondeur.

Les teneurs en bases échangeables sont faibles (3 à 4 mé p. 100 de sol). Les valeurs des pH déterminées dans le KCl sont supérieures à celles des pH déterminées dans l'eau, les AF plus abondants que les AH, la réaction très vive et rapide avec le test Fields (FNa).

La capacité totale d'échange de cation croît nettement avec le pH de mesure dans l'Ac - NH⁴. Cet accroissement est surtout important entre pH7 et pH9.

E326 CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS A DIVERS pH : sol humide						
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve						
	sol conservé humide			sol séché à l'air		
Profondeur	pH4	pH7	pH9	pH4	pH7	pH9
d 150 à 180 cm	59.6	69	92	39.5	42.7	65

eau à pF 2,5 sur sol conservé humide: 208 %

Minéralogie des fractions fines

Les rayons X n'indiquent guère que des minéraux primaires avec un peu de gibbsite en profondeur.

Une raie à 14 Å est renforcée après déferriification mais demeure inchangée par saturation avec le K ou le Mg. Le gonflement avec le glycérol est incertain.

Par chauffage à 500°C, l'intensité de cette raie est diminuée avec peut être passage à 12 Å ?

Lorsque l'échantillon est chauffé à 150° et 200° puis passé aux rayons X après refroidissement, il y a peu de modifications des raies. Par contre si la diffraction a lieu sur l'échantillon chauffé à 200° ou 300° et maintenu à cette température dans le diffractomètre, sans refroidissement, on observe un très net passage de la raie à 14 Å à 20 Å lorsque la température est maintenue à 200°C, et à 18 Å à 300°C. (déterminations Yoshinaga)

Ces translations de la raie à 14° par chauffage caractérisent l'imogolite (Yoshinaga).

L'analyse thermique différentielle montre aussi un crochet important à 370° qui pour Yoshinaga est attribuable à l'imogolite et confirme donc les observations faites aux rayons X.

Un crochet d'intensité plus faible à 460° indiquerait un peu d'halloysite et de kaolinite.

Le crochet à 265° correspondrait à la gibbsite qui est également bien visible aux rayons X.

Dans l'infrarouge on observe deux bandes d'absorption bien nettes à 950^{cm-1} et 1 100^{cm-1}. Le maximum est à 950^{cm-1} dans la fraction très fine de l'argile plus riche en substances allophaniques et Al^{IV} et à 1 100^{cm-1} dans l'argile totale qui renfermerait des particules primaires. L'importance anormale de cette bande à 1 100^{cm-1} pourrait provenir selon Yoshinaga d'un peu de silice libre comme semble aussi l'indiquer l'absorption à 800^{cm-1}. Les rayons X n'indiquent pas cependant de raies à 4.04Å et on voit mal en présence de la gibbsite sous quelle forme serait cette silice autrement que sous forme de minéraux primaires résiduels.

Les bandes d'absorption à 1,725^{cm-1}, 1,440^{cm-1}, 1,280 et 2,850^{cm-1} indiqueraient, qu'en dépit des attaques H₂O₂ il y a beaucoup de matières humiques retenues sur les substances allophaniques. Le crochet exothermique bien net à 4.40° à l'ATD confirmerait cette hypothèse.

Le microscope électronique montre des masses amorphes rétractées et de belles fibres.

En opérant sur des grilles à membrane plastique perforée, le réseau fibreux de l'imogolite apparaît avec beaucoup de netteté et de façon bien caractéristique. On distingue parfaitement les fibres accolées de l'imogolite (Yoshinaga).

Ces clichés sont tout à fait semblables à ceux que l'on obtient sur les lamelles translucides, sortes de fibres transparents, qui existent dans certains sols à allophane de la Martinique et sont de l'imogolite pur (Yoshinaga).

La présence d'imogolite est donc bien mise en évidence (Yoshinaga) par les diverses techniques. On la trouve en mélange avec les autres substances allophaniques et de très faibles quantités d'argiles cristallines et gibbsite.

Il s'agit d'un véritable hydrandépt.

DANS LES PLAINES CULTIVEES : (Profils E 323 et 337)

Sols à allophane, sans gibbsite, à dessiccation temporaire de surface

Ce sont les sols fertiles et intensément cultivés qui recouvrent sur environ 1m d'épaisseur, les moraines glaciaires dans l'axe de la vallée centrale.

Le sol est brun foncé dans les premiers 20cm d'épaisseur avec environ 15% de M.O. (C/N = 10) puis il devient beige jaune plus en profondeur avec encore 6% de M.O. vers 1m de profondeur. La structure est véritablement soufflée. Les agrégats sont très fins, le sol extrêmement meuble et friable. La bêche s'enfonce très aisément. La densité apparente est de 0.6 en surface et de 0.5 en profondeur.

L'hydratation est nettement moins importante que dans les profils situés à proximité des Andes en régions plus humides.

La dessiccation temporaire est bien nette en surface, les valeurs de pF mesurées sur sol conservé humide ou préalablement séché à l'air étant semblables.

Par contre les différences sont sensibles en profondeur et l'humidité du sol en valeur absolue atteint 100%.

Les teneurs en bases échangeables sont plus importantes qu'à proximité de la cordillère des Andes par suite du climat un peu moins humide. Les pratiques culturales : chaulage, engrais phospho-potassiques ont pu cependant contribuer à les accroître, dans une certaine mesure.

Le pH mesuré dans l'eau est un peu supérieur à celui mesuré dans le KCl.

Les AH et les AF sont en quantité équivalente en surface mais les AF l'emportent très nettement en profondeur sur les AH.

La capacité totale d'échange de cation varie avec le pH.

Les résultats diffèrent moins que dans les sols plus hydratés lorsque les mesures sont effectuées sur les échantillons conservés humides ou séchés à l'air.

La capacité d'échange en surface est la même à pH9 sur sol séché air ou conservé humide ce qui est le cas général.

E 323 - CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS A DIVERS pH : SOL CONSERVE HUMIDE OU SECHE A L'AIR											
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuvé - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuvé.											
profondeur	sol conservé humide				eau pF3	sol séché à l'air				eau pF3	
	pH4	pH7	pH9	S/T		pH4	pH7	pH9	S/T		
a	0 - 20	39.5	52.6	68	29	74	34.1	41	69.3	37	74
d	70 - 90	39.6	49.6	67	22	85	31.3	40.4	53.4	27	64

Minéralogie des fractions fines

Aux rayons X, la raie à 4.40 Å est nettement mieux marquée que dans les échantillons situés en régions plus humides à proximité de la cordillère. Il y a aussi une petite raie à 7.3. La présence de l'halloysite est confirmée par le crochet à 520°.

La raie à 14 Å demeure inchangée après déffériorification, saturation en K et Mg ou après glycérolage. Elle s'affaïsse nettement après chauffage à 150 ou 200°C et passe à 12 Å à 500°.

Il y aurait peut être un peu de gibbsite décelable aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle.

Dans l'infrarouge l'absorption a lieu à 900^{cm-1} - 920^{cm-1} sur la fraction très fine de l'argile la plus riche en amorphe et à plus de 1 000^{cm-1} dans l'argile grossière. Le maximum est à 1 700^{cm-1} en surface et à 1 650^{cm-1} plus en profondeur. Les acides humiques qui ont été extraits absorbent fortement à 1 400 - 1 400 - 1 250 - 2 900^{cm-1} (cf. pages). Les acides fulviques probablement à 1700^{cm-1} (Beutelspacher, Mareil) L'absorption est double dans la bande H₂O : 1 650 et 1 725^{cm-1}. Une bande est aussi observée à 1 440^{cm-1}.

La technique de dissolution différentielle Ségalen, montre qu'après cinq attaques acide - base, la dissolution est aussi importante (93%) que dans les sols à allophane perhydratés. Cependant la dissolution est nettement plus progressive, ce qui indique une substance un peu mieux organisée, moins aisément solubilisable. Dans le graphique de la page la comparaison des courbes de dissolution de l'échantillon E 323 avec celles des échantillons d'allophanes très hydratés E 321, E 312 ou E 370 est très suggestive.

L'estimation de la composition du produit allophanique solubilisé est plus délicate que pour les sols à allophane très hydratés déjà examinés.

Le rapport SiO₂/Al₂O₃ des produits allophaniques serait de l'ordre de 1 à 1.2. On doit remarquer que ce rapport passe de 1 pour le produit dissous à la première attaque à 5 pour celui qui est dissous par la cinquième attaque, alors que dans les mêmes conditions il passe de 1 à 34 dans l'échantillon E 321 fortement allophanique du volcan Antillanca. Cet accroissement relativement faible du rapport SiO₂/Al₂O₃ des produits dissous par chaque attaque successive est l'indice d'une liaison Al-Si plus énergétique. Après les 5 attaques le rapport SiO₂/Al₂O₃ de la totalité du produit dissous par les 5 attaques est le même : 1.3.

Il s'agit donc d'un sol à allophane, cependant l'apparition d'un peu d'argile cristalline et probablement une meilleure organisation du réseau allophanique entraîne un affaiblissement sensible des propriétés de l'allophane.

A l'ouest de la ville d'Osorno, début de la cordillère côtière, le climat est plus sec avec une saison sèche marquée et une pluviométrie de l'ordre de 900mm.

Le sol est limono-argileux sur un mètre d'épaisseur. Les blocs s'émiettent en petites mottes, la plasticité permet de réaliser des batonnets, etc...

Plus en profondeur, au-delà de 1m, le sol est plus argileux, avec une texture franchement argilo-limoneuse.

Puis on rencontre une argile blanchâtre à kaolinite dérivé du substratum gréseux précambrien.

Propriétés

Les sols sont mieux pourvus en bases échangeables que les sols allophaniques de la plaine centrale (13 mé p. 100). Le pH est voisin de 5 dans l'eau et inférieur de une unité mesuré dans le KCl. Les valeurs du pF sont sensiblement les mêmes sur sol conservé humide ou préalablement séché à l'air. La densité apparente est voisine de 1 dans tout le profil. La réaction au test de Fields (FNa) est faible et lente.

Minéralogie des fractions fines

Il y aurait un mélange d'halloysite et de métahalloysite ou fire-clay. Les rayons X indiquent une forte raie à 4.45 Å. La raie à 7.6 Å est nettement renforcée par chauffage à 100°C avec affaissement d'un fond à 10, 12 Å (halloysite). La goethite apparaît dans certains profils (E 328).

Le microscope électronique montre des glomérules concentriques et des batonnets d'halloysite, moins nombreux. Il y a quelques particules primaires déchetées et quelques masses amorphes ou mal dispersées.

Il ne s'agit donc plus de sols à allophane, bien que par certains caractères : toucher limoneux, peu argileux, légère réaction à FNa (bien que la saturation soit convenable), ils n'en soient pas très éloignés.

CONCLUSION

Cette transversale Est-Ouest illustre fort bien le passage des sols à allophane encore jeunes des pentes du volcan, vers les hydrandeps des versants et des collines de piemonts des Andes, puis les dystrandeps de la plaine et enfin les sols à halloysite en régions plus sèches près de la cordillère côtière.

Ces sols renferment peu ou pas de gibbsite alors que dans la transversale examinée plus au Sud on rencontrait des sols à allophane à gibbsite. Les dépôts de cendres paraissent donc dans l'ensemble plus récents que ceux qui ont donné naissance plus au sud aux sols à allophane à gibbsite.

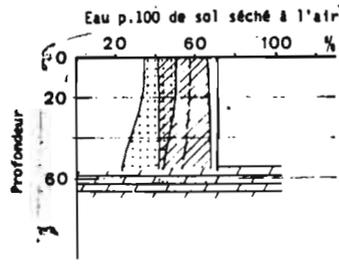
Ces sols à allophane à gibbsite ont été rencontrés entre ces deux transversales et une délimitation plus précise paraît possible à effectuer.

Sols à gibbsite situés entre cette transversale et celle de Puerto Varas : Profils: E 339-340-341

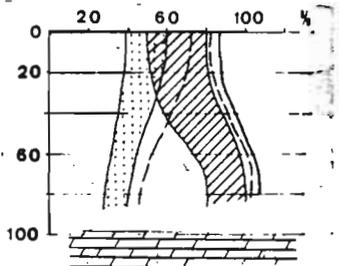
La gibbsite est particulièrement abondante entre ces deux transversales dans les régions proches des sols argileux de la cordillère côtière : vers Purranque et Corte Alto (Profil E 339) à la limite des dépôts de cendres et des sols à allophane. Bien que l'halloysite et la métahalloysite soit en faible quantité, la gibbsite confère à ces sols une légère sensation d'argile au toucher avec une atténuation très sensible des propriétés de l'allophane, bien que celles-ci soient encore évidentes et permettent sans conteste d'y ranger ces sols (densité apparente : 0.75)

En se rapprochant des Andes vers Puerto Octay (profil E 340), la gibbsite est moins abondante accompagnée également d'halloysite, métahalloysite et d'argile à 14 Å. Le toucher est légèrement argileux, l'hydratation plus faible que dans les autres sols à allophane mais la dessiccation irréversible bien sensible cependant. L'ensemble des propriétés du sol et en particulier la forte réaction au test de Fields (FNa) et la densité apparente (0.67) constante dans le profil font indiscutablement de ces sols des dystrandeps.

La gibbsite est à nouveau très abondante, plus au nord d'Osorno dans les vieux recouvrements de cendres de la cordillère côtière en régions très humides (profils E 335 et E 338) aux abords de Valdivia.

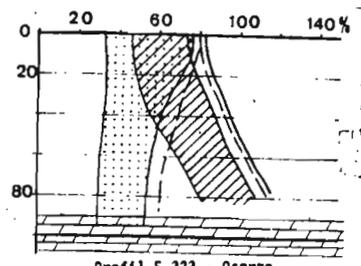


Profil E 340 - Corte Alto
Sol à halloysite près de la cordillère côtière



Profil E 317 - Purranque

Sol à allophane sans gibbsite dans la plaine centrale - dystrandept

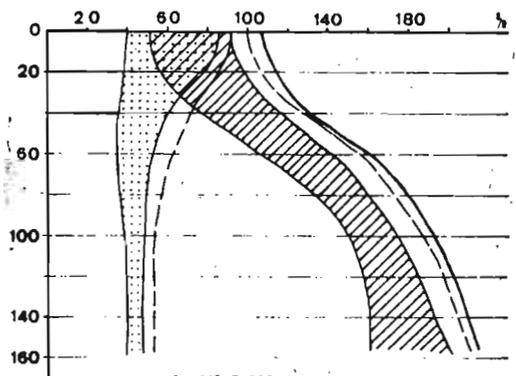


Profil E 323 - Osorno

LEGENDE

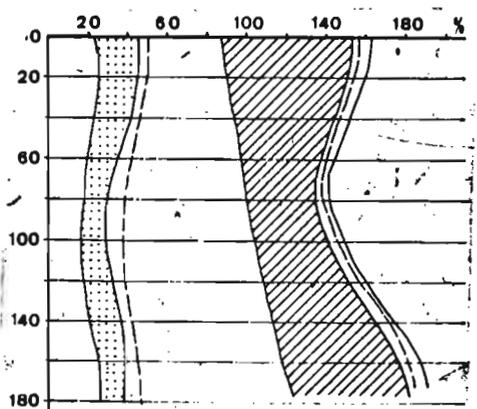
ordonnées : Profondeur du sol en cm
abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

- Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2
- déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
 - déterminé sur échantillon conservé humide
 - valeur de l'humidité à pF 2,5
 - Eau naturelle au moment du prélèvement de sol



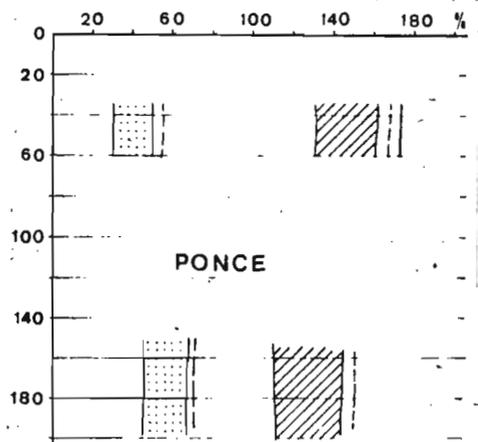
Profil E 326 - Puyehue

Sol à allophane hydraté sans gibbsite auprès des Andes - hydrandept



Profil E 321 - Antillanca

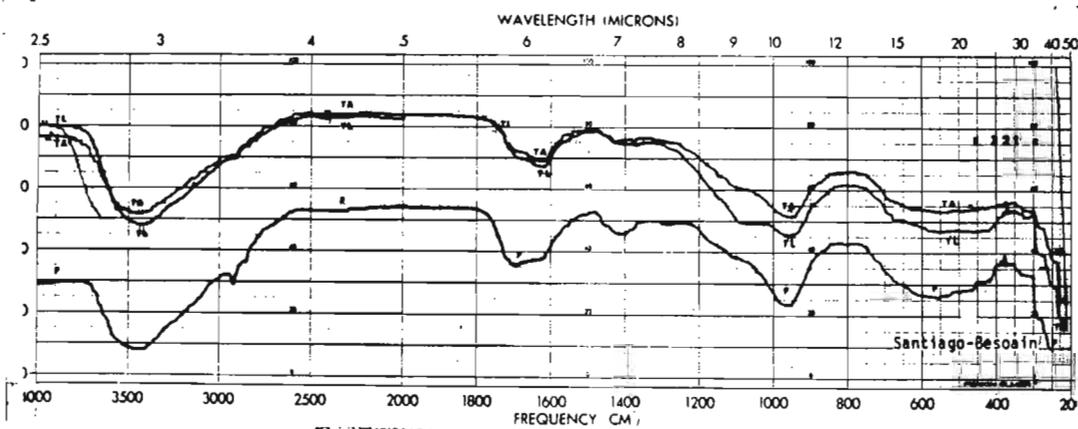
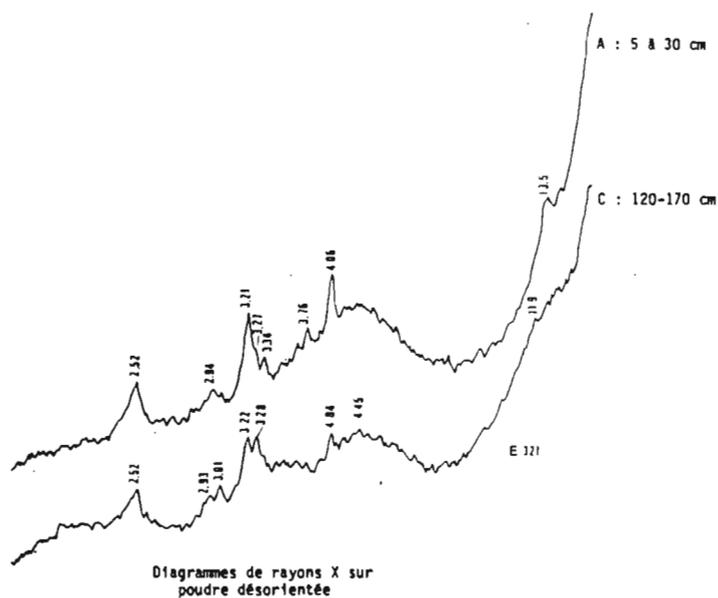
Sol à allophane sans gibbsite - hydrandept
Versant des Andes près du volcan Antillanca



Profil E 322 - Puyehue

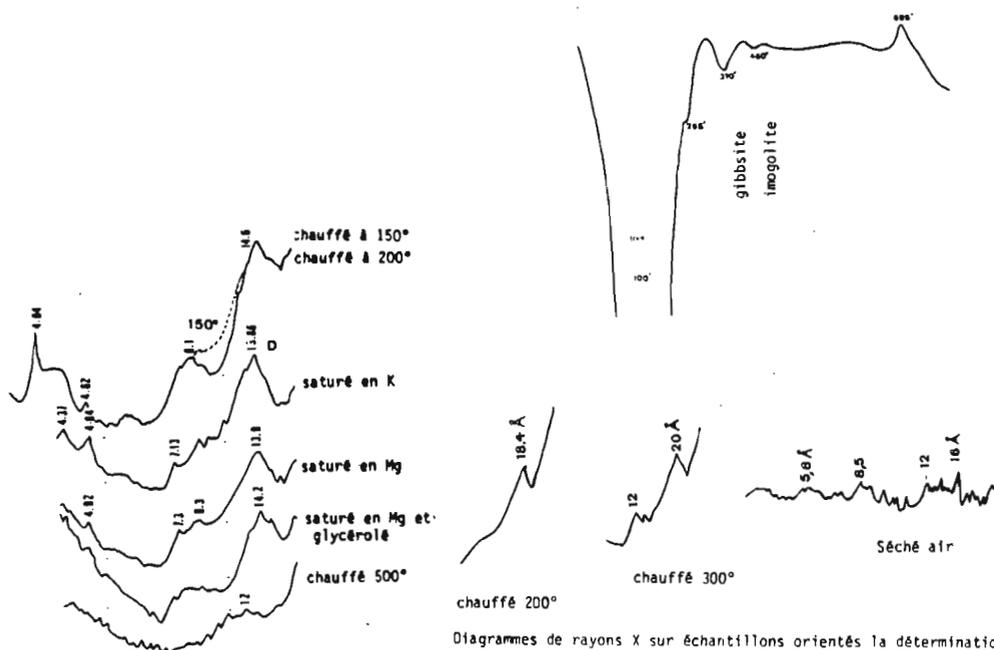
Sol à allophane sans gibbsite - hydrandept près de la frontière de l'Argentine

RETENTION EN EAU DES SOLS A ALLOPHANE A DIVERS pF
sols conservés humides ou préalablement séchés à l'air



TA : argile séchée à l'air } fraction totale de l'argile
 TL : argile lyophilisée }
 F : argile séchée à l'air : fraction très fine de l'argile
 Diagrammes d'absorption dans l'infrarouge

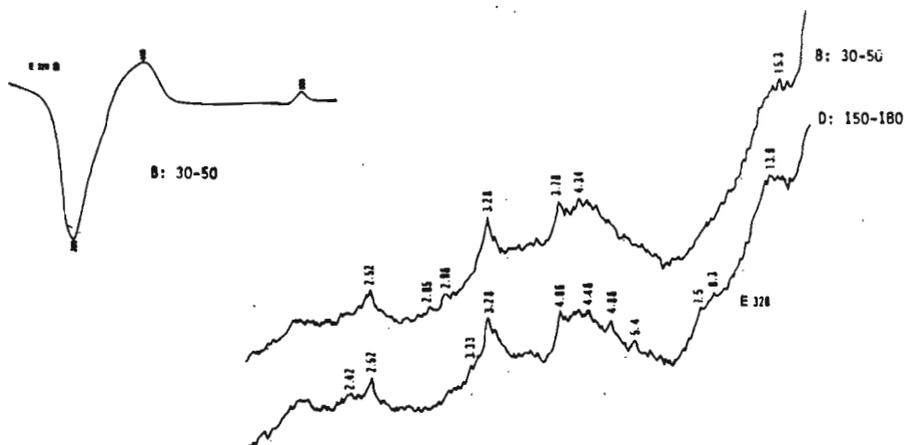
SOL A ALLOPHANE TRES HYDRATE SANS GIBBSITE - HYDRANDEPT
 Profil E 321 Sur les pentes du volcan Antillanca: 600 m d'altitude
 a: 5-30 cm b: 70-100 cm c: 120-170 cm



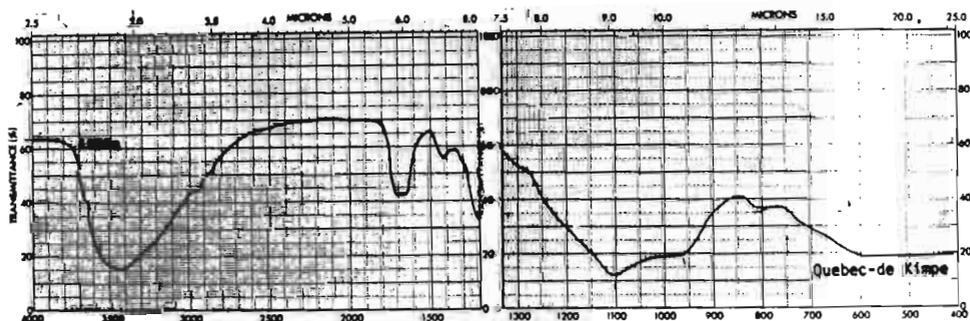
Echantillons chauffés puis refroidis pour le passage sur l'appareil.

Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés la détermination ayant été faite à la température indiquée sans refroidissement (Yoshinaga)

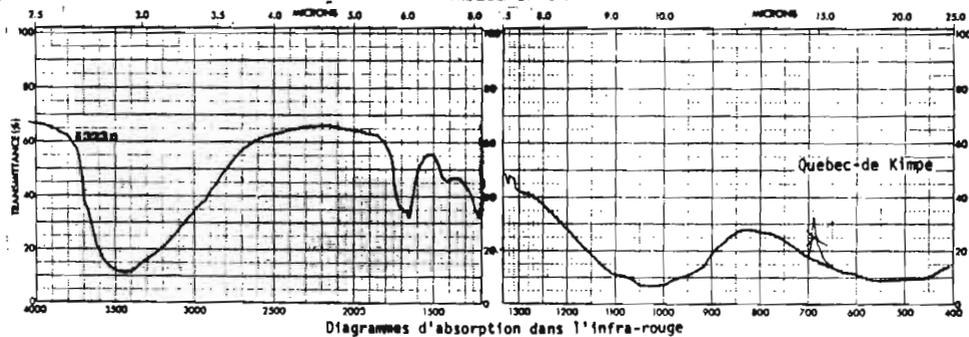
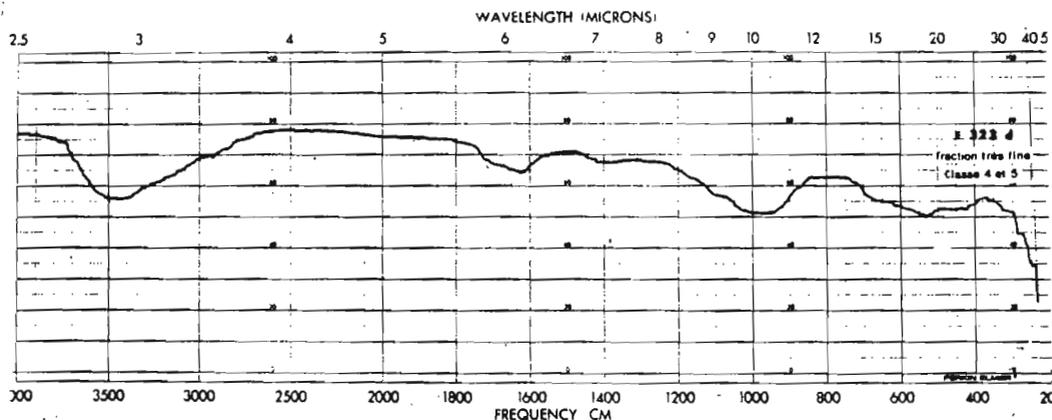
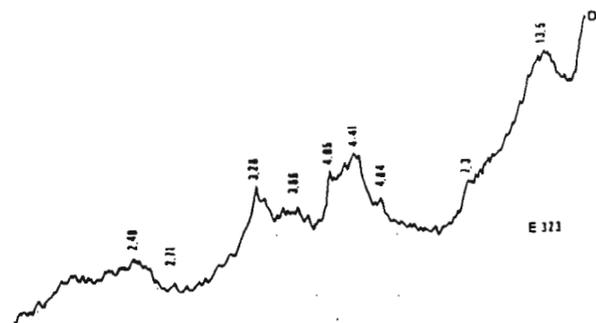
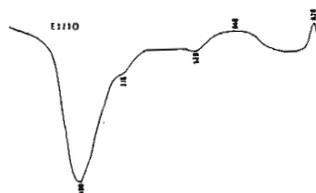
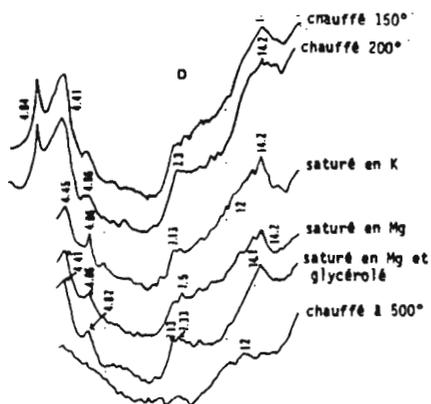
Diagrammes de rayons X sur échantillon orienté Echantillon 0: 150-180 cm



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

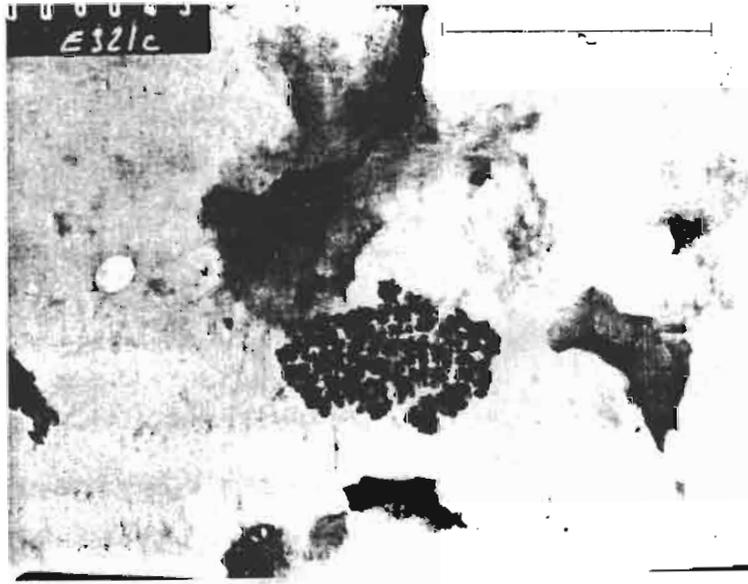


Diagrammes d'absorption dans l'infra-rouge
 SOL A ALLOPHANE TRES HYDRATE SANS GIBBSITE - HYDRANDEPT
 Profil E 326 au pied des Andes à 340 m d'altitude
 a: 0-20 cm b: 30-50 cm c: 80-120 cm d: 150-180 cm



SOL A ALLOPHANE SANS GIBBSITE - DYSTRANDEPT
 Profil E 323 - Osorno - Remetue
 a: 0-20 cm b: 25-40 cm c: 50-60 cm d: 70-90 cm

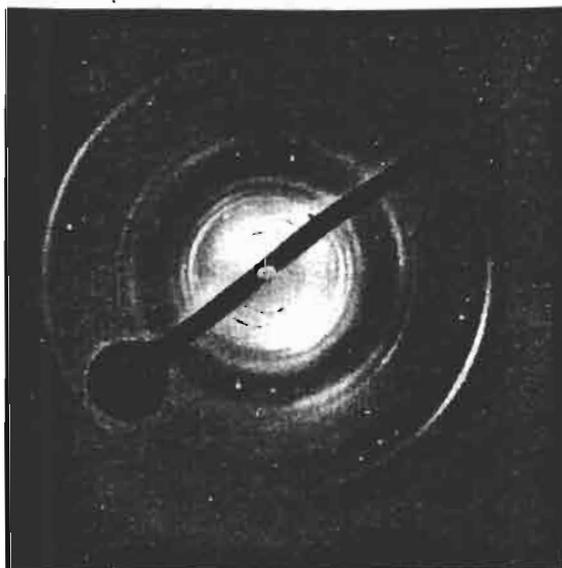
Cliché 6043 (SIEFFERMANN) E 321c Antillanca



Cliché 305 (YOSHINAGA) environ 150.000

Diffraction d'électron E 326 d (YOSHINAGA)

La diffraction d'électron (YOSHINAGA) confirme bien la présence d'imogolite avec l'allophane. On trouve toutes les raies caractéristiques de l'imogolite à 1,4, 2,1, 2,7, 4,2 ainsi que celles de l'allophane à 2,1, 2,25, 3,3. Ces clichés peuvent être comparés à ceux obtenus sur des films gels d'allophanes de la Martinique. Ces films gels sont des feuillets translucides très fins que l'on observe dans certains horizons de sols à allophane.



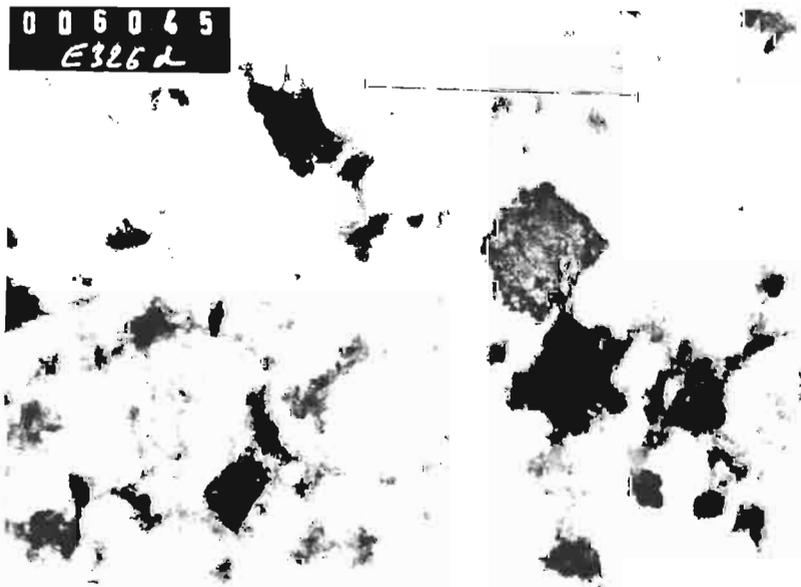
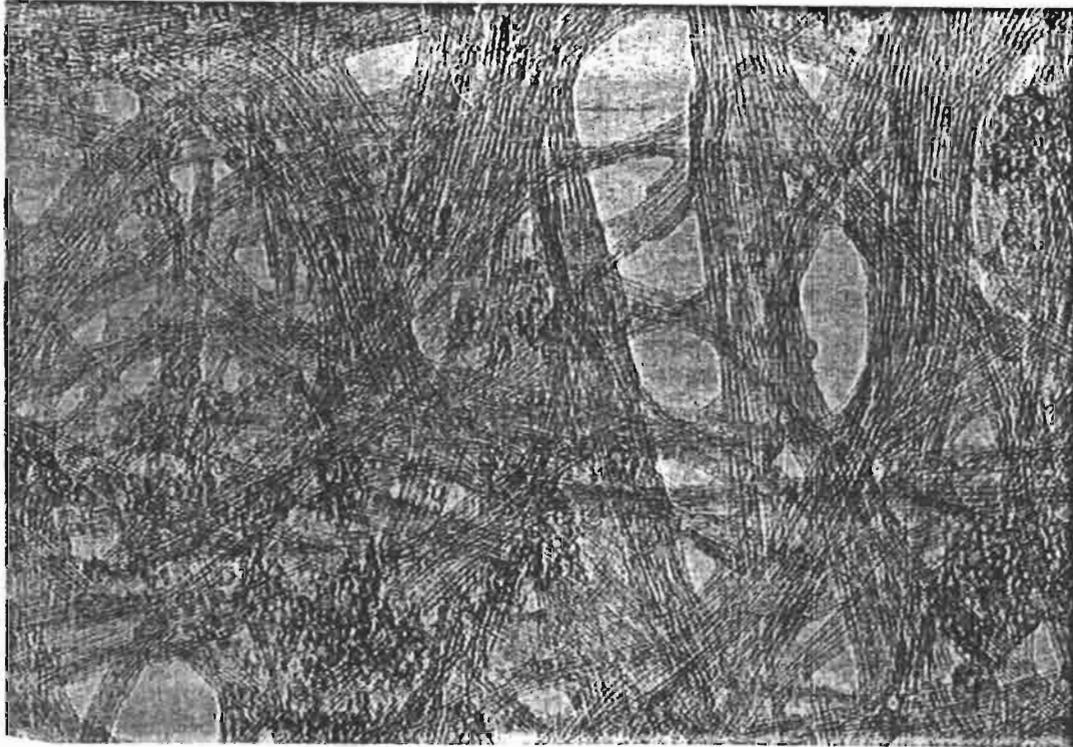
Pour comparaison avec E 326 d

B 241 b films gels dans des allophanes de MARTINIQUE Clichés YOSHINAGA
pellicules translucides extraites à la pine à épiler.

Diffraction d'électron sur ces mêmes films gels

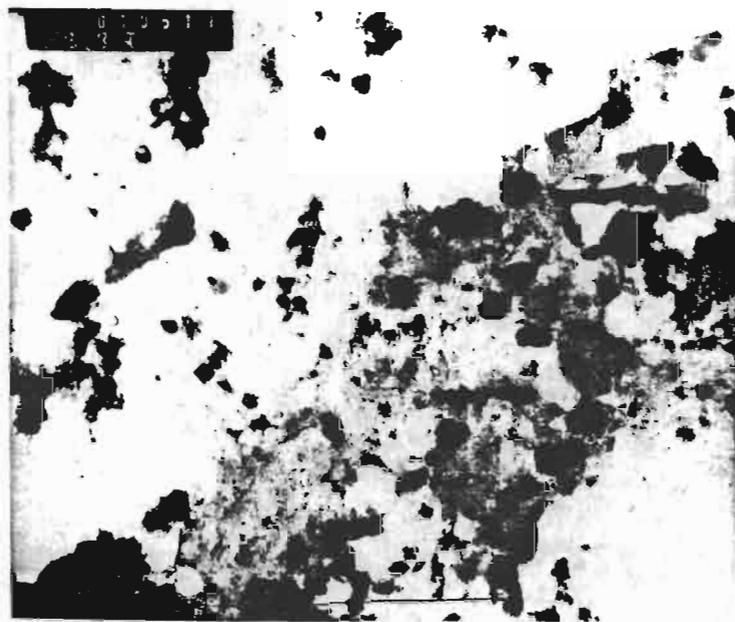


Clichés 305 YOSHINAGA agrandi
Cliché 6045 STEFFERMANN E 326 d



Cliché 10511 (TRICHET) E 323 d

Cliché 10516 (TRICHET) E 323 d égout de centrifugation



TRANSVERSALE LAGO RANCO A L'EST, VERS VALDIVIA A L'OUEST

En allant de la cordillère andine vers la plaine on retrouve sensiblement la même succession que précédemment. Il y a passage des sols à allophane perhydratés à humidité constante rajeunis par des dépôts de cendres aux sols à hydratation plus faible et à dessèchement temporaire de surface dans lesquels un peu d'argile halloysitique et parfois aussi de gibbsite apparaissent dans certains profils.

Plus à l'ouest vers Valdivia les sols dérivent de formations de cendres plus anciennes en climat très humides. Ils sont riches en gibbsite.

DANS LA CORDILLERE PRES DU LAGO RANCO :

Sol à allophane relativement jeune, reposant sur un sol à allophane perhydraté sans gibbsite à humidité permanente. Profil E 330.

1) En surface : 1er sol

Les horizons de surface ont été rajeunis par des dépôts de cendres dont certains proviennent d'éruptions très récentes de moins de 10 ans d'âge du volcan Rinihue . Cette indication nous a été fournie par les paysans de cette région.

Sur 80cm d'épaisseur le sol est donc encore très jeune, formé essentiellement de cendre sableuse, très fine. Les cendres les plus récentes sont encore bien visibles dans les 20 premiers cms et se présentent en lentilles grises encore peu mélangées au sol humifère par les labours.

La composition de ces cendres est la suivante en surface :

Olivine = 15, hypersthène = 36, augite = 2, hornblende = 47 avec des feldspaths et des quartz.

La présence de l'olivine et l'abondance de la hornblende sont-elles attribuables aux cendres fraîches du Rinihue ? Dans toute cette région c'est l'hypersthène en effet qui domine nettement avec fort peu de hornblende. C'est donc une hypothèse probable.

Lieu N° Profil	Hyperst.	Pyroxène mono	Olivine	Hornb.	Epidote	MLXS	
E 330 a	36	2	15	47	0	1	Feldspaths et quartz
b	53	18	25	4	0	4	
c	37	24	8	24	7	8	8 verres tr. anond.
d	39	17	2	42	0	2	Feldspaths

Nature des cendres aux abords du LAGO RANCO - Profil rajeuni par les cendres des éruptions récentes du volcan RINIHIUE

La densité apparente est par suite relativement élevée : 1, mais tout le profil réagit néanmoins fortement au test Fields : FNa.

La teneur en matière organique est modérément élevée : 7% et constante dans ces premiers 80cm ce qui souligne la jeunesse de ces horizons. Par suite de cet apport de cendres fines récentes aisément altérables, les teneurs en bases échangeables et en phosphore assimilable Truog sont nettement plus importantes que dans tous les autres sols étudiés dans ces régions et sous des climats analogues.

A noter cependant que les AF l'emportent sur les AH. La formation des AF est donc essentiellement sous la dépendance du climat humide et indépendante de l'âge du sol.

Les rayons X dans l'horizon labouré présentent bien sûr avec intensité les raies des minéraux primaires : (3.21 A°). Un peu plus en profondeur on observe une raie à 14 A° qui apparaît avec plus de netteté après défférisation et saturation au magnésium. Cette raie voit son intensité renforcée par saturation en potassium (13,8 A°). Elle reste inchangée après traitement au glycérol et passe à 12 A° par chauffage à 500°.

Par chauffage à 150° ou 200° on n'observe pas de modifications sensibles à l'exception d'un affaissement à 200°.

L'existence de petites raies à 7,0 et 6,4 A° permettrait aussi de penser à une argile à comportement d'interstratifié chlorite - vermiculite ou peut-être d'imogolite ?

C'est un sol à allophane beaucoup plus hydraté (160%) qu'en surface avec une densité apparente de : 0.4.

Le microscope électronique montre des fibres et des masses amorphes rétractées.

Il s'agit donc d'un hydrandépt sans gibbsite recouvert par des dépôts de cendres plus récents conférant à ce nouveau sol les caractères d'un dystrandépt en surface.

DANS LA PLAINE CENTRALE :

Ce sont des sols à allophane très épais soumis nettement en surface à une légère dessiccation temporaire.

Certains sols présentent plusieurs dépôts successifs de cendres et des sols enterrés.

Minéralogie des sables :

L'hypersthène domine très largement dans tous les sols de cette région.

Lieu N° Profil	Hypers-thène	Pyroxéne monoclin	Olivine	Hornblende	Epidote	ML%S	Minéraux légers
E 331 b c	80 66	7 21	5 4	8 5	0 4	21 8	
E 333 b f	82	7 0 paques uniquement	3	8	-	22	Quartz Feldspaths

Nature des cendres volcaniques, minéraux lourds et légers.

Propriétés :

1) En surface : Dans les 50 premiers cms les humidités à pF3 sont en général inférieures à 100% et varient peu lorsqu'elles sont mesurées sur sol humide ou sur sol préalablement séché à l'air. La réaction au test de Fields est forte et la densité apparente de l'ordre de 0.5 ou 0.6. Les pH sont voisins de 6 et sensiblement les mêmes dans l'eau ou dans le KCl.

2) En profondeur : L'humidité à pF3 dépasse 100% et l'écart entre les déterminations sur sol conservé humide ou préalablement séché à l'air est important.

Minéralogie des argiles :

Deux profils ont été retenus. Ils présentent de légères variantes :

1 - Profil E 333 de Paillaco

L'hallowysite apparaît en petite quantité dès la surface (raie à 4.40 A° nette) et sa teneur s'accroît en profondeur. La présence d'hallowysite dès la surface avec un peu de gibbsite (3 à 4% pour Besoin) est confirmée par l'analyse thermique différentielle. La raie à 4.40 A° demeure intense même après orientation de l'échantillon ce qui indiquerait la présence de l'hallowysite plutôt que de fire-clay.

La raie à 14 A° est peu modifiée par saturation en potassium ou en magnésium, glycérolage, chauffage à 150°. Elle diminue d'intensité à 200° et passe à 12 A° à 500° avec une plus faible intensité. Il est difficile de savoir s'il s'agit d'interstratifié chlorite - vermiculite ou d'imogolite.

Dans l'infrarouge, l'absorption est notable à 950^{cm-1} indiquant la présence d'Al^{IV} mais elle est maximum dans la bande 1 050^{cm-1} qui est aussi celle de la gibbsite. L'absorption est également importante à 1 140^{cm-1}.

Les bandes hautes fréquences montrent bien la présence de l'hallowysite et de la gibbsite, mais il y a peu de détails visibles dans les fréquences inférieures à 800^{cm-1} ce qui est l'indice de substances cristallines mal organisées ou peu abondantes.

L'absorption H₂O ne présente qu'une bande à 1 630^{cm-1}. Les substances organiques paraissent peu fixées dans l'argile totale, mais plus abondantes dans la fraction très fine de l'argile avec un renforcement de l'absorption à 1 700^{cm-1}. (acides fulviques ? Beutelspacher-Van Der Marel)

En profondeur l'halloysite est plus abondante. La raie à 10 \AA n'est pas très nette mais passe clairement à 7.3 par chauffage à 100°C avec un très évident renforcement.

Ces horizons profonds à halloysite correspondraient à des sols enterrés dérivés de dépôts plus anciens. Ils présentent une nette sensation d'argile au toucher.

2 - Profil E_331

Ce profil est situé entre la cordillère et le précédent. Il présente des caractéristiques intermédiaires.

Dans les horizons supérieurs l'halloysite n'apparaît plus qu'en très faible quantité (rayons X, ATD, infrarouge), il n'y a pas de gibbsite et les matières humiques semblent mieux fixées sur les substances allophaniques.

Les substances allophaniques paraissent cependant un peu mieux organisées que dans les sols situés plus au sud. Le maximum d'absorption dans l'infrarouge a lieu vers 1050 cm^{-1} , avec des renflements marqués à 950 cm^{-1} surtout dans la fraction très fine, et à 1100 cm^{-1} surtout dans l'argile totale.

Dans les horizons de profondeur l'halloysite est très nette avec une raie à 10 \AA bien distincte. Il s'agit vraisemblablement d'un sol enterré.

Remarques sur les halloysites dans les horizons de profondeur de ces deux profils :

Le microscope électronique montre en abondance les glomérules et les batonnets de l'halloysite. Il semble qu'ils soient mélangés à des fibres semblables à celles de l'imogolite ou à une masse amorphe rétractée.

C'est dans le profil E 333 que ces batonnets et ces glomérules concentriques sont les plus nets, les mieux formés et semblent les plus abondants à l'exclusion d'autres substances.

C'est aussi dans ces échantillons que la raie à 4.40 \AA est la plus intense, la raie à 10 \AA n'apparaissant que sous forme d'un renflement mal défini.

Au contraire dans le profil E 331 les glomérules concentriques sont moins bien constitués, ont des formes moins typiques et sont mélangés à une proportion plus importante que dans le précédent profil à des fibres ou des amas rétractés informes.

Dans ces échantillons la raie à 4.40 \AA est moins intense, mais la raie à 10 \AA est beaucoup plus nette que dans le profil déjà cité.

Ce cas semble très fréquent aux Antilles. C'est en effet dans les sols faisant transition par leur morphologie entre les sols à allophane et les sols à halloysite que les raies à 10 \AA sont les mieux marquées, et que, les formes glomérulaires ou en batonnets sont souvent peu nettes. Par contre, lorsque l'halloysite semble mieux constituée, la raie à 10 \AA a tendance à diminuer d'intensité, la raie à 4.40 \AA devenant de plus en plus intense.

CORDILLERE COTIERE :

Dans les collines de la cordillère côtière, la pluviométrie est très importante et l'enneigement plus prononcé (pluviométrie annuelle : 3m).

Les dépôts de cendres ont une épaisseur très variable sur les formations précambriennes de micashistes, souvent plusieurs mètres d'épaisseur dans les parties basses concaves.

La gibbsite est très abondante sur tout le profil dans les sols dérivés de cendres. Elle est encore abondante dans les sols argileux enterrés qui dérivent des micashistes et renferment aussi en mélange du talc.

Ce sont des sols à allophanes à gibbsite.

Minéralogie des cendres :

1) Au Sud de VALDIVIA un échantillon a été prélevé à la base du sol dérivé de cendre, quelques centimètres au-dessus de la zone de contact cendre, micashiste.

On observe une dominance d'hypersthène parmi les minéraux du volcanisme, mais il y a surtout des minéraux non volcaniques : trémolite, staurodite, zircon, tourmaline, rutile, épidotes qui indiquent un mélange avec le substratum précambien. Il est intéressant de noter l'abondance de l'hypersthène qui semble ainsi subsister dans les conditions d'altération déjà très poussée.

2) Au Nord de VALDIVIA près de LONCOCHE, les recouvrements de cendres sur les micashistes sont très épais et atteignent plusieurs mètres. L'hypersthène est le minéral lourd principal (76%), mais on remarque aussi l'existence d'épidote. C'est également un vieux de pot de cendre ayant donné un sol riche en gibbsite.

Toute cette vaste région est donc caractérisée par la prédominance dans les cendres de l'hypersthène. L'abondance de la gibbsite est attribuable à l'ancienneté des dépôts, et au climat très pluvieux.

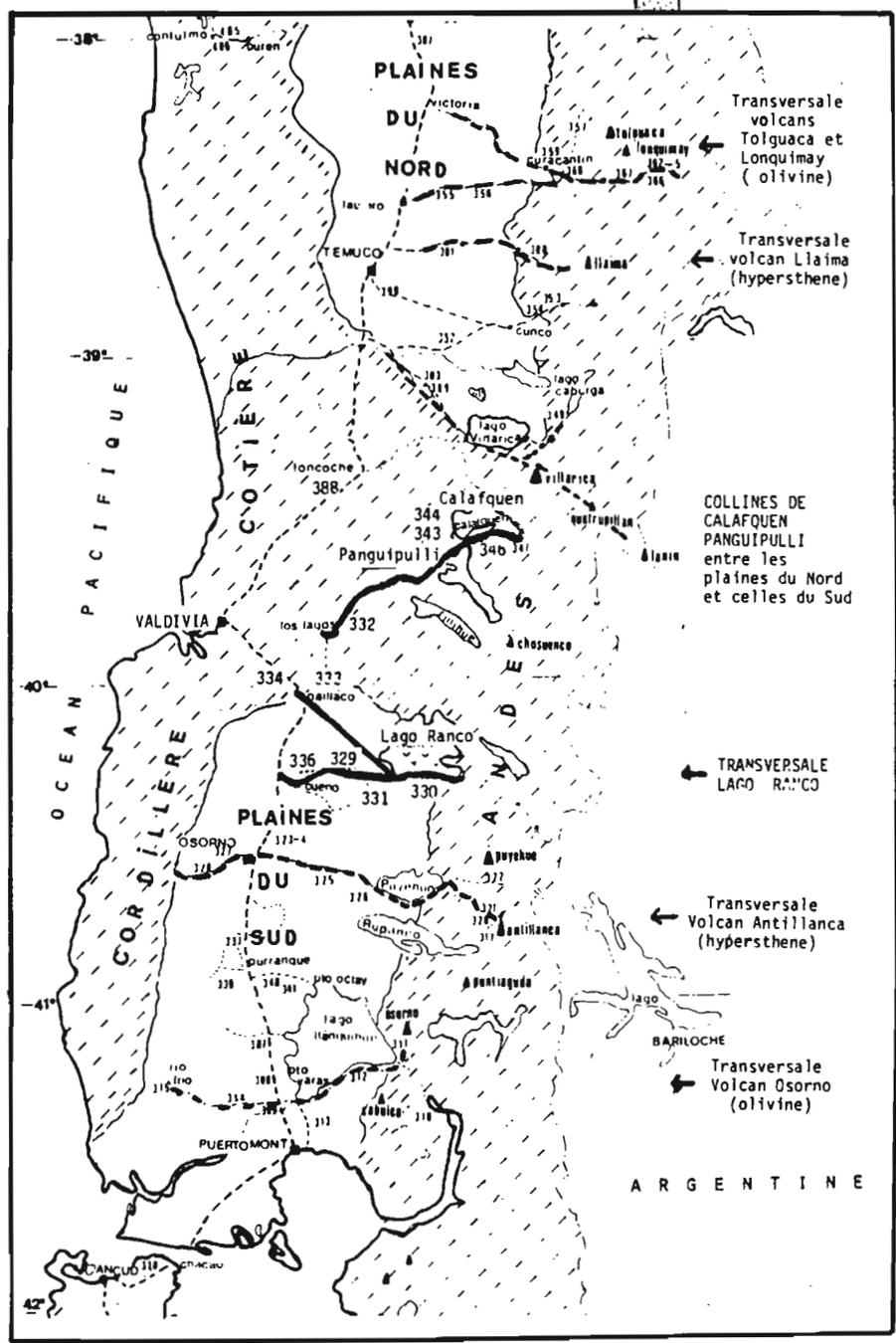
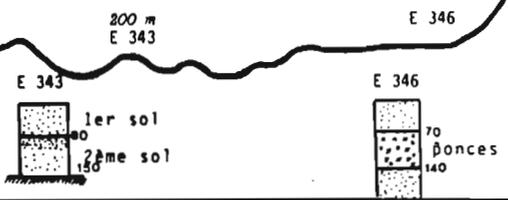
Lieu N° Profil	Hypers- -thène	Pyroxène monoclin.	Olivine	Hornb- -lende	Epidote	ML%S	Minéraux légers
Cordillère côtière - (Recouvrement épais de cendres sur micashistes)							
<u>Sud Valdivia</u>							
E 334 à 4 m	23	+	+	4	13	14.8	Trémolite 57 - Zircon 1 - Tourmaline 1 et traces glaucophane, staurotite 1 rutile +
<u>Nord Valdivia</u>							
E 388	76	6	6	6	6	10	

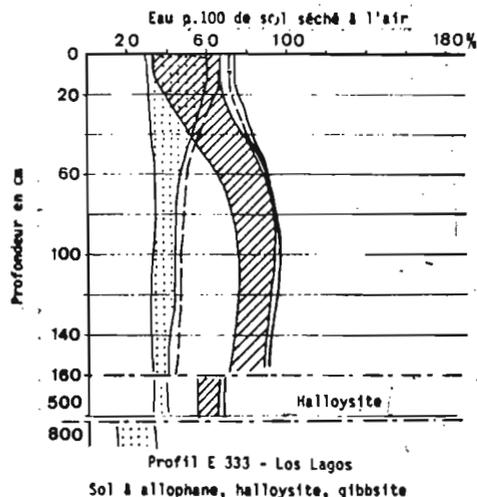
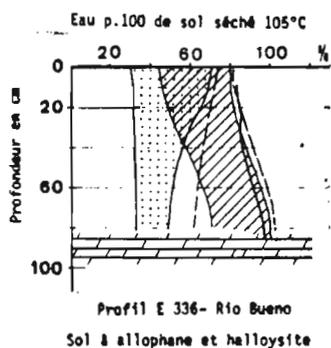
CONCLUSION :

Cette transversale illustre bien le passage :

- des hydrandepts sans gibbsite recouverts de dystrandepts formés de cendres plus récentes, parfois très récentes à proximité de la cordillère.
- des sols allophanes avec ou sans gibbsite mais dans lesquels l'halloysite apparaît parfois dès la surface recouvrant des sols enterrés nettement plus riches en halloysite dans la plaine centrale.
- les sols très riches en gibbsite de la cordillère côtière.

← COLLINES DE PANGUIPULLI — LAGO CALAFQUEN — CORDILLERE DES ANDES → 47



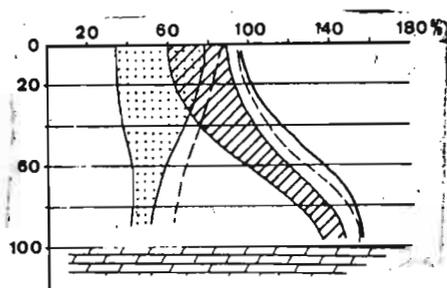
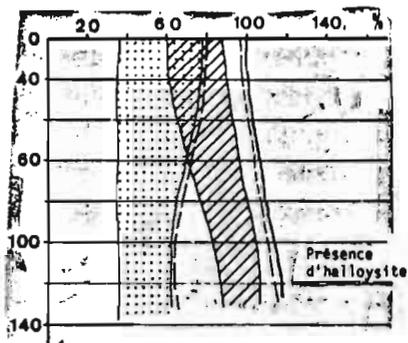


LEGENDE

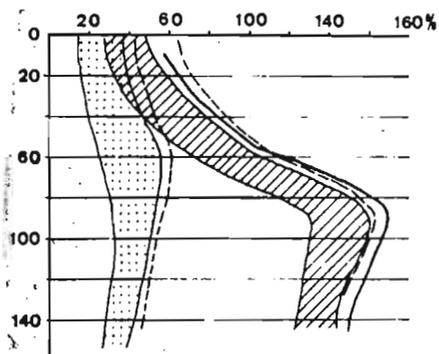
ordonnées : Profondeur du sol en cm
 abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2

..... déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
 // déterminé sur échantillon conservé humide
 - - - - - valeur de l'humidité à pF 2,5
 ——— Eau naturelle au moment du prélèvement de sol



Soils à allophane et halloysite de la Plaine Centrale

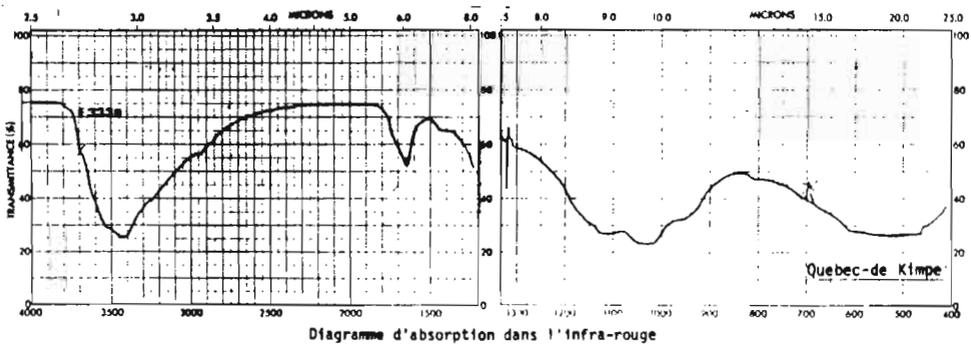
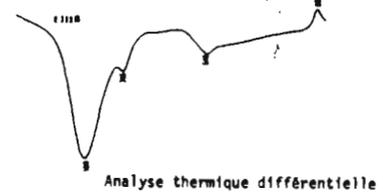
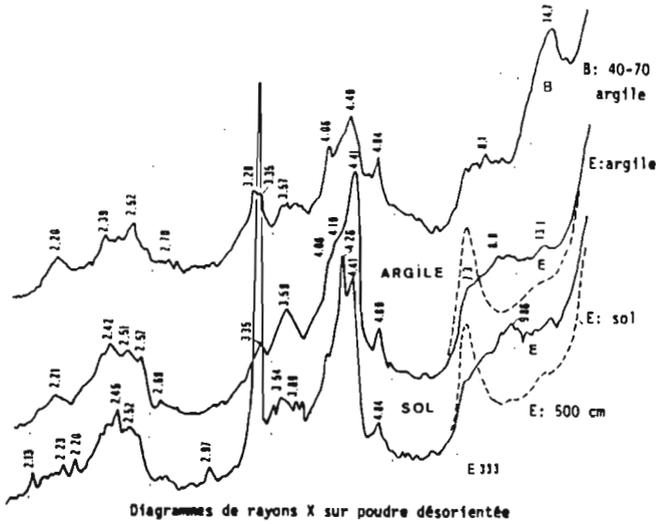
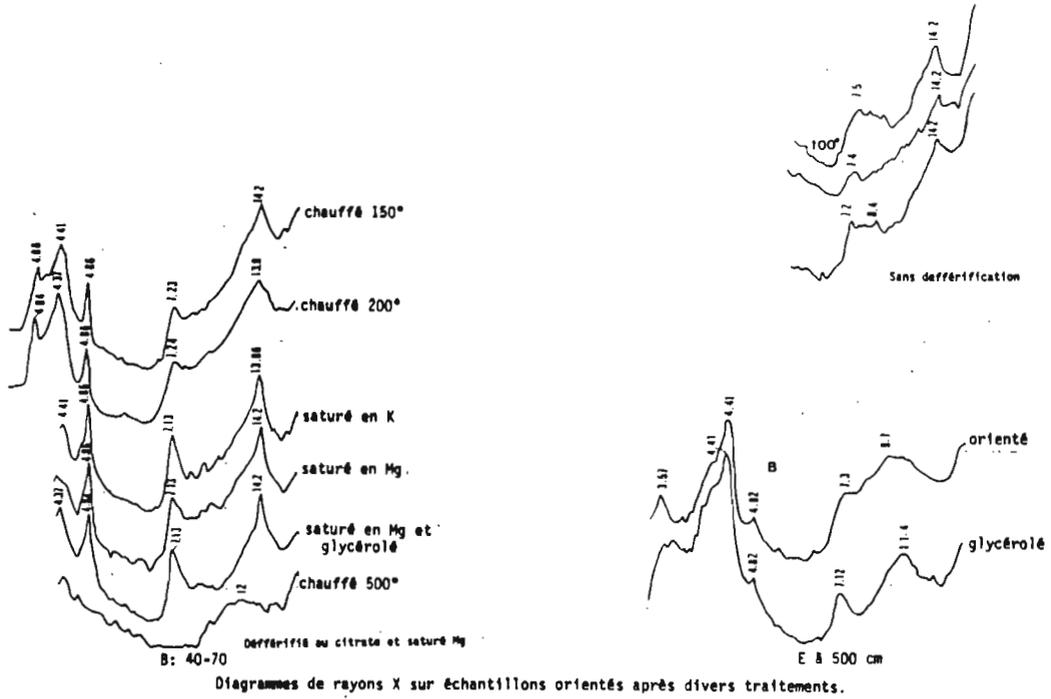


Soil à allophane sans gibbsite (hydrandépt) avec des recouvrements de cendre récente

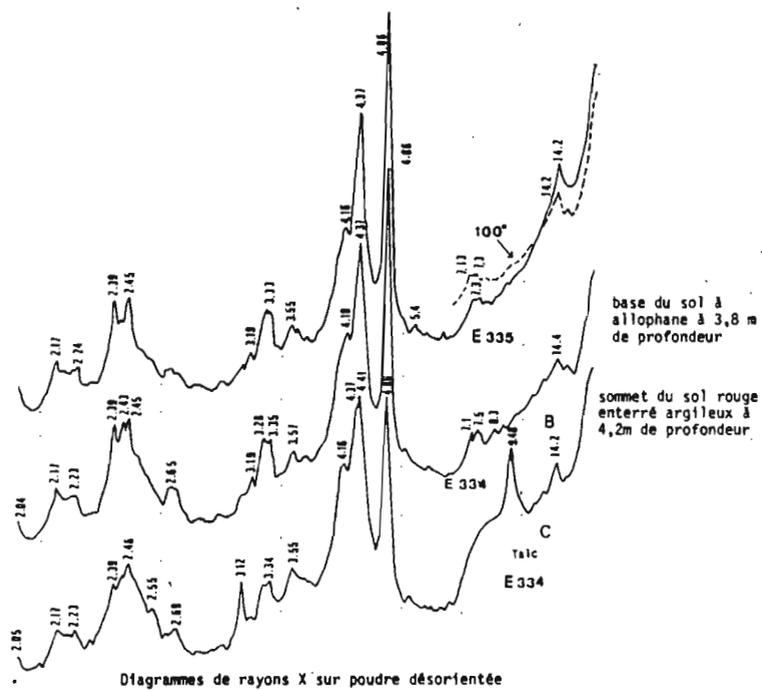
RETENTION EN EAU DES SOLS A ALLOPHANE A DIVERS pF
 Soils conservés humides ou préalablement séchés à l'air

DANS LA PLAINE CENTRALE

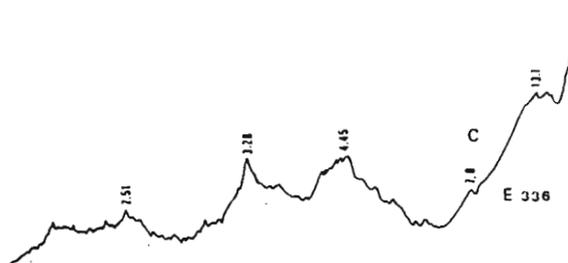
DANS LES ANDES

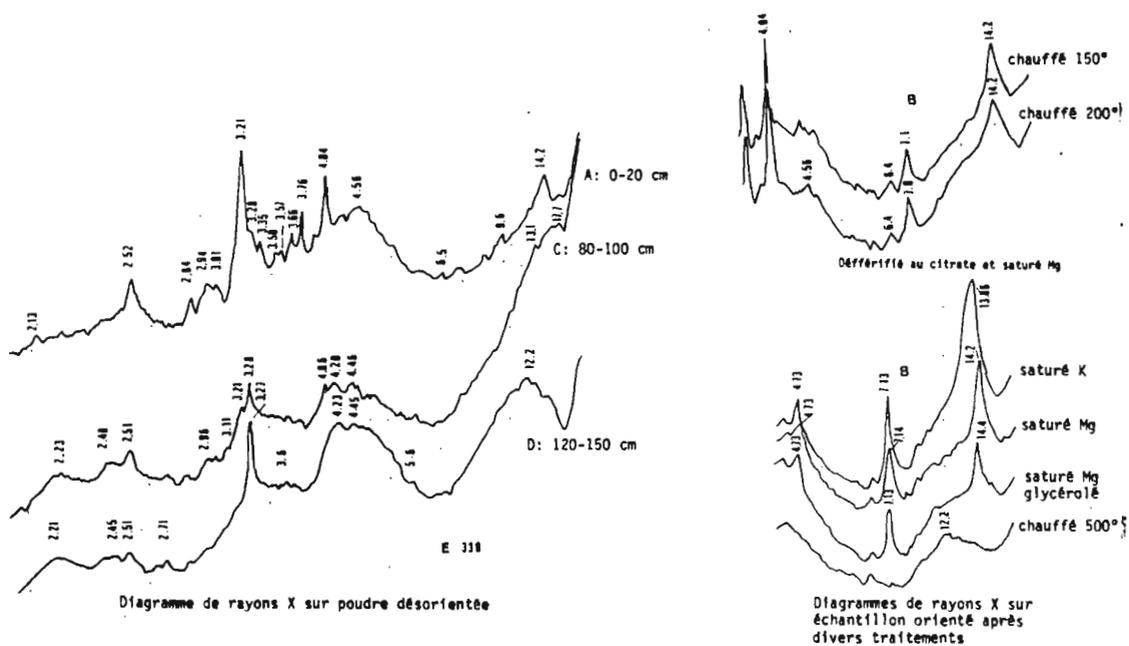


SOL A ALLOPHANE SUR DES SOLS ARGILEUX A HALLOYSITE.
 Profil E 333 : Los Lagos
 a: 0-15 b: 40-70 e: 500

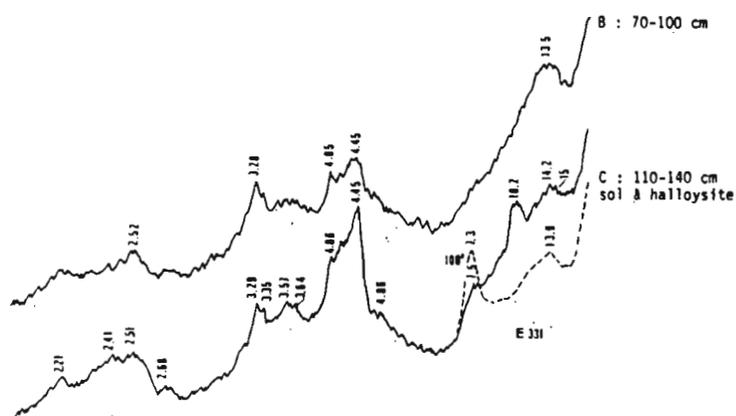
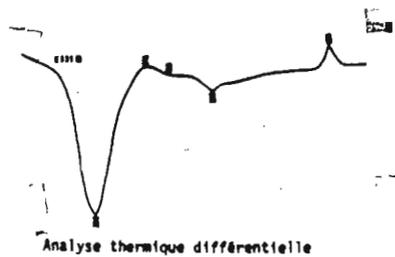


Soils à allophane à forte proportion de gibbsite de la Cordillère Côtière (334B) reposant sur des sols rouges argileux à halloysite (334C) puis des schistes altérés (335)

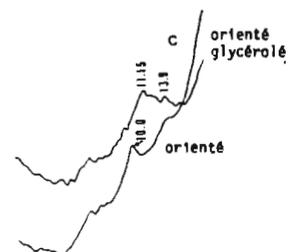




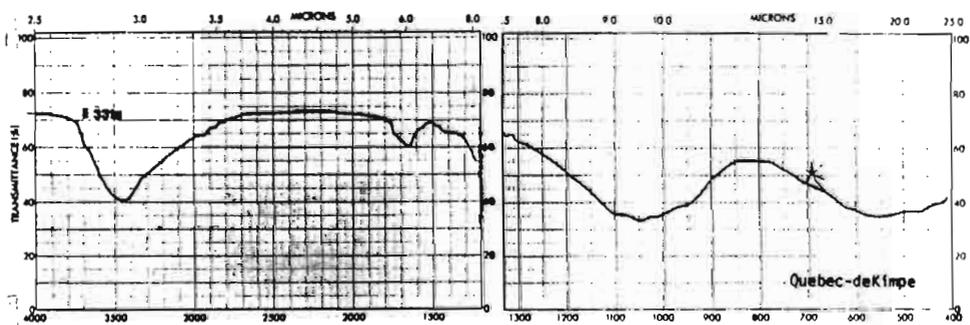
SOL A ALLOPHANE AVEC DES RECOUVEREMENTS DE CENDRE RECENTS
 Profil E 330, dans les Andes
 a: 0-20 b: 50-70 c: 80-100 d: 120-150



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée



c: 110-140 cm Sol entier orienté



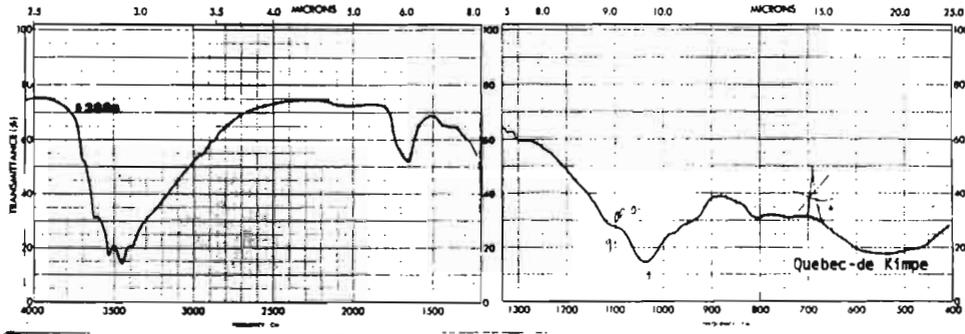
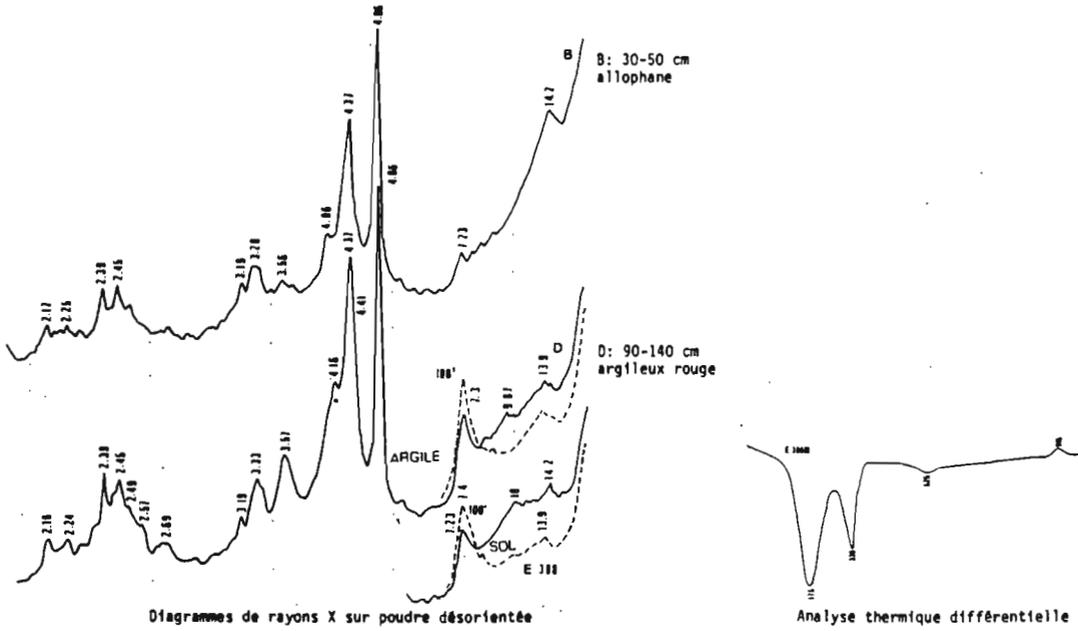
Diagrammes d'absorption dans l'infra-rouge

SOL A ALLOPHANE RECOUVRANT DES SOLS PLUS ANCIENS

A HALLOYSITE HYDRATÉE

Profil E 331 : Lago Ranfo

a: 0-30 b: 70-100 c: 110-140

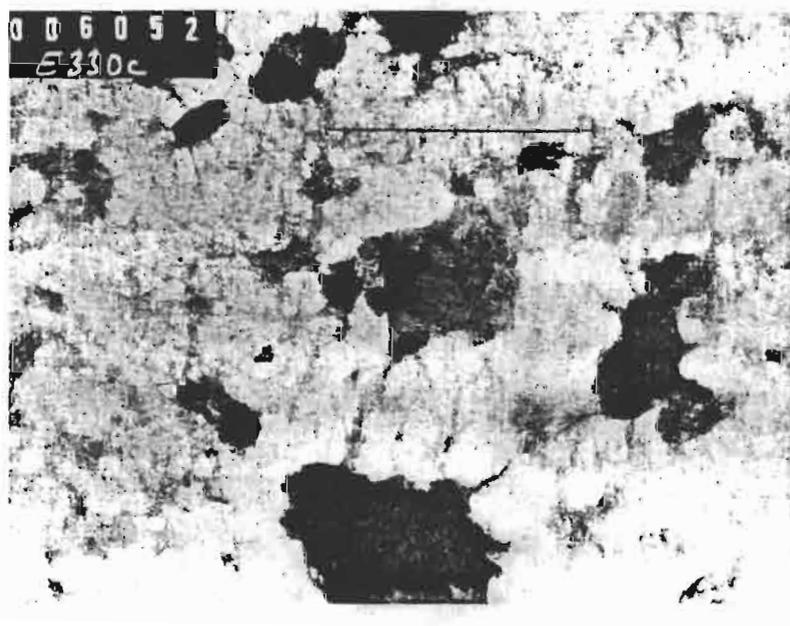


SOL A ALLOPHANE A GIBBSITE RECOUVRANT UN SOL ROUGE ARGILEUX A HALLOYSITE ET GIBBSITE

Profil E 388 - Loncoche dans la
Cordillère Côtière

a: 0-10 cm b: 30-50 cm d: 90-140 cm
allophane argileux rouge
e: 600 cm
shiste altéré

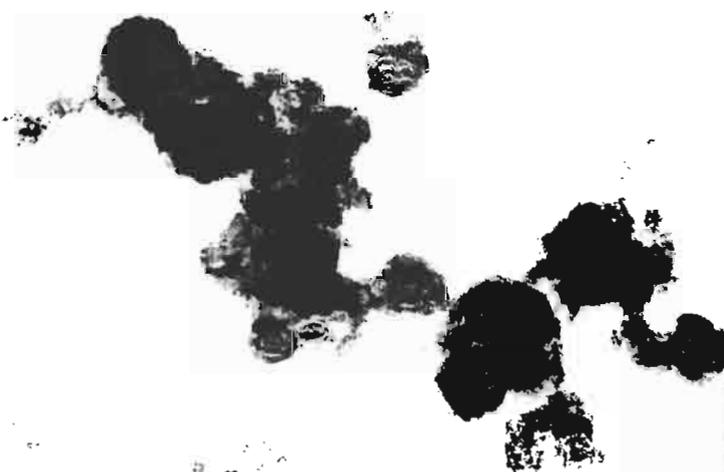
Cliché 6052 (SIEFFERMANN) E 330c



Cliché 6002 (SIEFFERMANN) E 331 c

Cliché 6007 (SIEFFERMANN) E 333 c

06002
E331c



Cf Cartes page 47

A la hauteur de Panguipulli - Calafquen la vallée centrale est interrompue et fait place à des collines accidentées précambriennes recouvertes de cendres, au moins par endroits.

Le climat est relativement humide avec une pluviométrie supérieure à 2m par an.

Plus au nord on retrouve la vallée centrale (Temuco,).

Nous ne retiendrons que deux profils représentatifs des sols de ces régions :

- un sol à allophane près de Panguipulli, présentant deux sols superposés distincts, qui rappelle par ses caractéristiques ceux qui ont été examinés plus au sud dans la transversale de Lago Ranco.
- un sol avec un épais horizon de ponce intercalaire près de Calafquen.

PANGUIPULLI : Profil E 343

Sol à allophane sans gibbsite recouvrant un sol à allophane perhydraté à gibbsite (cendres à hypersthène)

On remarque nettement comme dans les sols de la transversale de Lago Ranco deux dépôts superposés.

Les horizons supérieurs sont très meubles, de coloration foncée uniforme, jusqu'à 80cm de profondeur.

Puis on rencontre l'horizon noir d'un sol enterré, plus riche en matière organique.

La couleur s'éclaircit plus en profondeur en devenant jaune avec un toucher légèrement argileux.

Propriétés

Les diagrammes correspondant aux humidités aux divers pF montrent bien l'existence de ces deux sols superposés.

Les horizons de surface ont une hydratation modérée, sans doute du fait de la jeunesse du dépôt et d'une certaine dessiccation temporaire : (densité apparente 0.66).

Les horizons profonds sont très hydratés avec une forte différence des valeurs de l'humidité lorsque les pF sont déterminés sur échantillons conservés humides ou préalablement séchés à l'air (densité apparente 0.52) mais sans être aussi importante que dans les sols à allophane du sud.

L'ensemble du profil réagit fortement au FNa. Les teneurs en bases échangeables sont faibles (S/T = 10%) les pH dans le KCl très voisins des pH dans l'eau. Les AF ne l'emportent que de peu sur les AH.

La capacité totale d'échange de cation décroît de près de moitié après dessiccation du sol.

Minéralogie des fractions fines

Dans les horizons supérieurs (1er sol), les rayons X indiquent surtout les raies des minéraux primaires de la cendre.

On observe aussi de petites raies à 14.2 Å, 7.13 Å, 4.73 Å qui sont très nettement renforcées après défférisations. La raie à 14 Å demeure inchangée par saturation en potassium ou magnésium ou par glycérolage. Le chauffage à 150° et 200° apporte peu de modifications.

Il est cependant troublant de constater que la raie à 14 Å disparaît par chauffage à 500°C. On ne saurait affirmer qu'il s'agit de chlorite ou de vermiculite. L'analyse thermique différentielle confirme qu'il y a très peu de substances cristallines.

Dans l'infrarouge l'absorption est très étalée à 1.050^{cm-1} et 3.450^{cm-1}. Cette organisation un peu meilleure semble t'il du réseau des substances allophaniques pourrait être mise en parallèle avec la rétention en eau utile relativement importante sur échantillons préalablement séchés à l'air en comparaison des sols à allophane examinés dans le sud.

En profondeur par contre, dans l'horizon limono-argileux, les raies des argiles cristallines à 14 Å, 7.3 Å, 4.48 Å sont plus intenses et il y a un peu de gibbsite. A noter l'abondance du quartz dans tout le profil comme c'est le cas dans certaines cendres à hypersthène (Martinique - Equateur).

Si la différence des valeurs des pF mesurés sur sol conservé humide ou séché à l'air est importante, par contre la teneur en eau utilisable reste importante même sur sol séché préalablement à l'air.

Par sa morphologie, ses propriétés, sa constitution, ce sol s'apparente beaucoup à ceux des plaines de la transversale de Lago Ranco-Valdivia, précédemment examinés. Il y a une meilleure organisation du réseau allophanique et apparition d'argiles cristallines en faible quantité dans les horizons supérieurs et en plus forte quantité dans les horizons profonds.

Par l'ensemble de ces propriétés, c'est encore un dystrandep en recouvrement sur un sol plus hydraté.

CALAFQUEN : Profil E 346

Ce profil situé à proximité du lac Calafquen comporte aussi deux sols superposés mais séparés par une épaisse couche de ponce.

La ponce est pourrie mais a bien conservé sa structure originelle.

Cette couche de ponce pure est située entre 70 et 140cm de profondeur mais il y a d'autres strates poncuses plus en profondeur encore bien visibles dans les talus de routes.

Dans les horizons supérieurs, comme dans le sol enterré profond et dans les ponces pourries les rayons X ne laissent entrevoir que des substances amorphes. La raie à 4.46 Å est très faible, légèrement plus prononcée en surface qu'en profondeur de même que la raie à 4.04 Å de la cristobalite.

Ce qui fait tout l'intérêt de ce sol à allophane c'est la couche de ponce pourrie qui retient une très forte quantité d'eau utilisable, tant après détermination sur le sol conservé humide que sur sol préalablement séché à l'air (différences d'humidité entre pF3 et pF 4.2).

Nous étudierons dans un chapitre ultérieur ces ponces pourries en les comparant à celles rencontrées dans d'autres profils. L'abondance de l'imogolite (Yoshinaga) expliquerait cette remarquable absorption pour l'eau. Dans l'infrarouge, l'absorption est très importante à 950^{cm-1} et unique à 1620^{cm-1}. Le microscope électronique révèle une substance essentiellement fibreuse. (cf:page et p.)

Minéralogie des sables :

Les horizons supérieurs de cendres et la ponce intercalaire sont riches en hypersthène, analogues en cela aux autres dépôts de la région. En profondeur, l'olivine et l'épidote apparaissent comme dans le niveau profond des pentes du volcan ANTILLANCA.

Peut-on imaginer qu'il y ait eu dans les deux cas :

- a- une première phase volcanique de laves relativement basiques (Olivine) avec arrachement d'épidote.
- b- une deuxième phase qui aurait débuté par des ponces grossières riches en hypersthène et correspondrait davantage à la composition du magma sans contamination.

Le sol situé sous les ponces et correspondant à ces cendres à olivine épidote ne paraît guère plus évolué. Ces épisodes volcaniques se seraient donc succédés à des intervalles de temps relativement proches.

Ces deux dépôts de cendres peuvent d'ailleurs provenir de volcans différents.

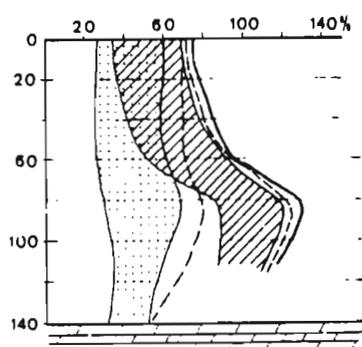
Lieu N° Profil	Hypers-thène	Pyroxène monoclin	Olivine	Hornb-lende	Epidote	ML%S	Minéraux légers
E 343 b f	87	6	5	2	-	59	Quartz et Feldspaths
E 346a1 c	68	20	8	4	-	7	
	77	21	0	2	-	9	
ponces d II	36	19	18	3	14	10	

CONCLUSION :

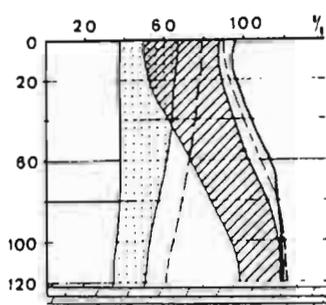
Les deux profils de cette partie de montagnes et de collines du Chili central qui isole les plaines centrales nord et sud sont donc bien différents.

L'un d'eux par une certaine organisation du réseau, l'apparition d'argiles cristallines, surtout dans le sol enterré de profondeur rappelle les profils qui ont été examinés dans la partie de la plaine qui borde ces collines un peu plus au sud mais il diffère nettement des hydrandepths situés encore plus au sud.

L'autre est un sol à allophane relativement récent, avec d'épaisses couches de ponces andésitiques altérées et gorgées d'eau.



Profil E 343: Panguipulli
Sol à allophane/halloysite
à dessèchement temporaire
de surface



Profil E 344: Panguipulli
Sol à dessèchement tempo-
raire de surface

LEGENDE

ordonnées : Profondeur du sol en cm

abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

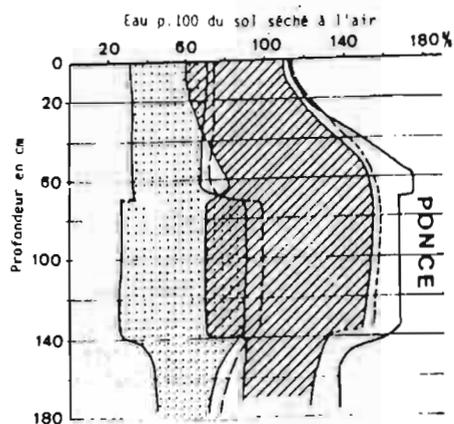
Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2

▒ déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air

▨ déterminé sur échantillon conservé humide

--- valeur de l'humidité à pF 2,5

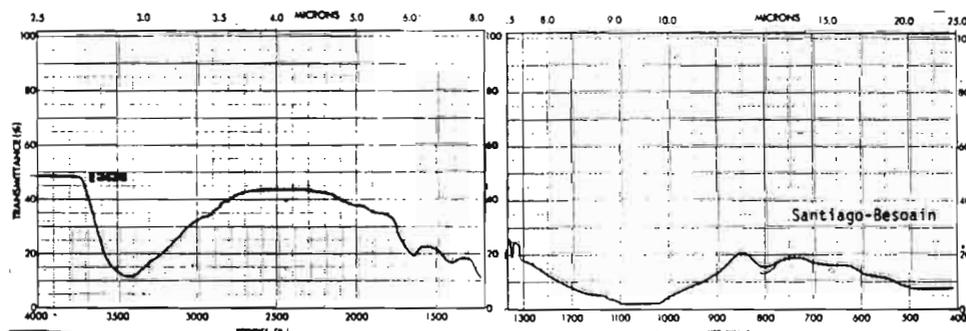
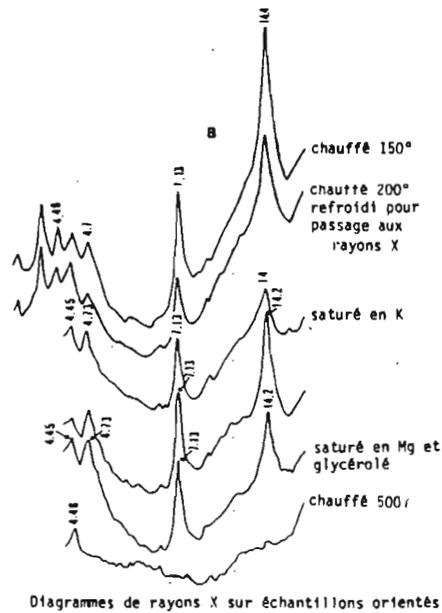
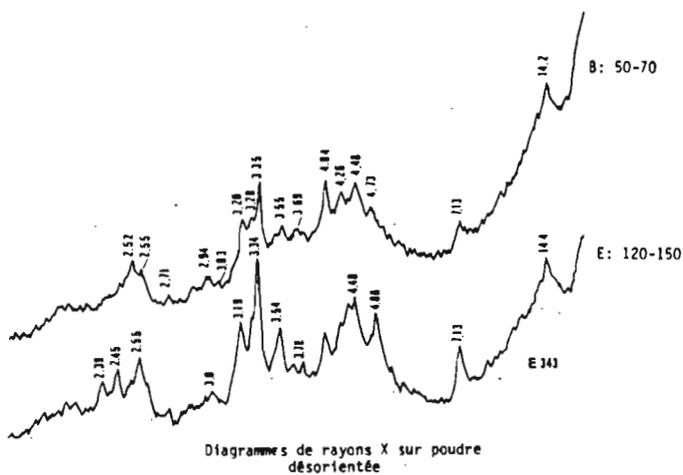
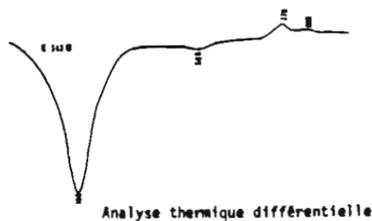
— Eau naturelle au moment du prélèvement de sol



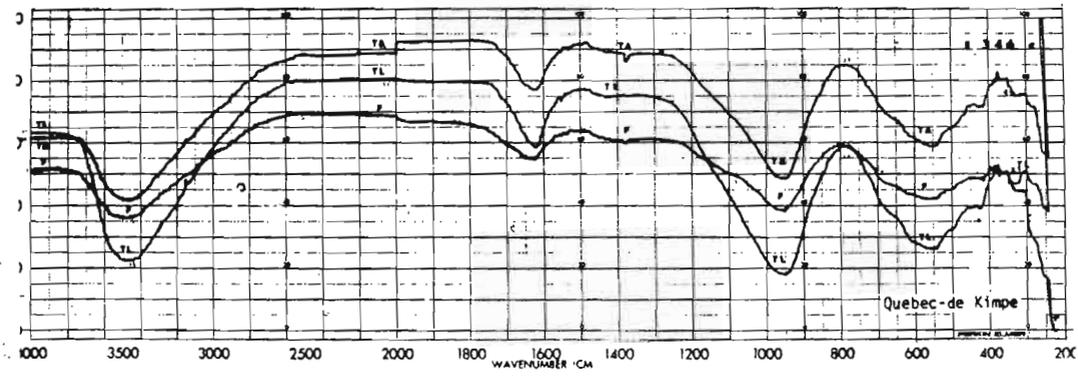
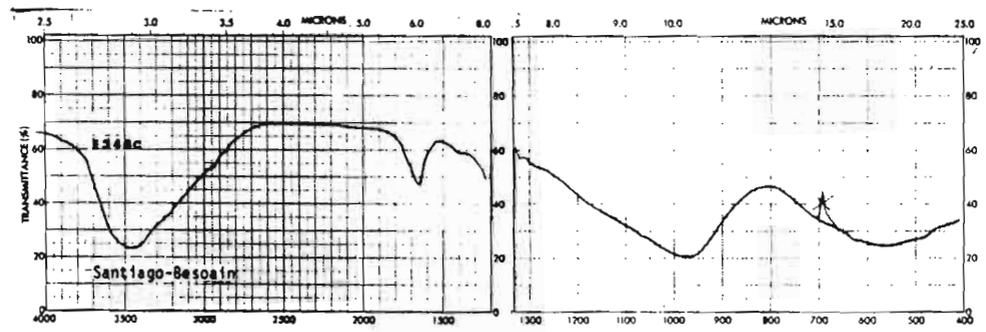
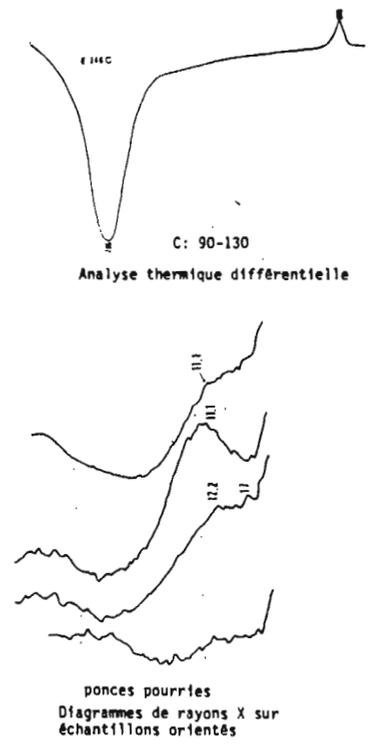
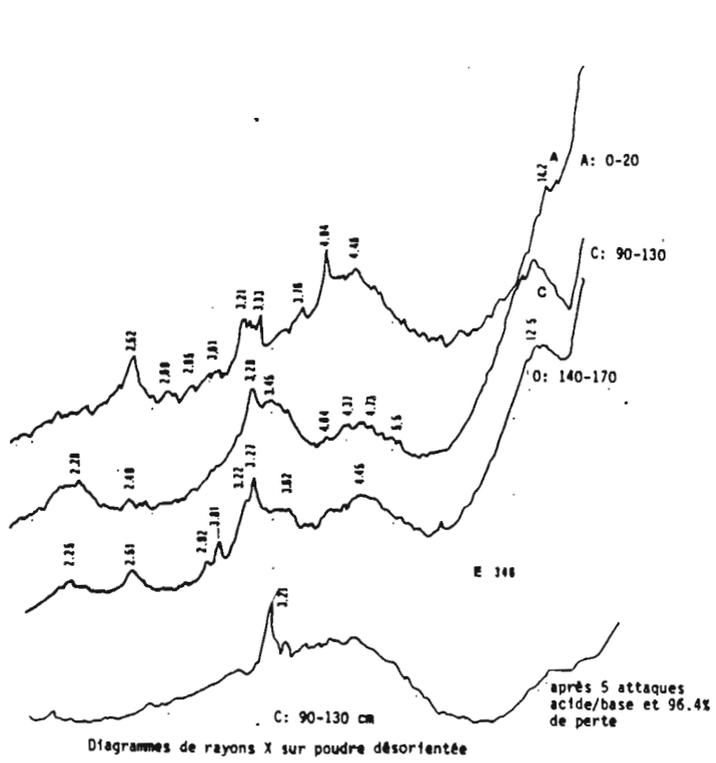
Profil E 346: Calafquen
Sol à allophane sans gibbsite
avec imogolite

La rétention en eau du sol
séché à l'air est importante

RÉTENTION EN EAU DES SOLS A DIVERS pF
Sol conservé humide ou préalablement séché
à l'air



SOL A ALLOPHANE AVEC PRESENCE D'HALLOYSITE EN PROFONDEUR
 Profil E 343 : Panguipulli
 a: 0-25 cm b: 50-70 cm c: 80-90 cm e: 130-150 cm



TA : argile séchée à l'air } argile totale
TL : argile lyophilisée }
F : argile séchée à l'air : fraction très fine

Diagramme d'absorption dans l'infra-rouge

SOL A ALLOPHANE TRES HYDRATÉ A IMOGOLITE
avec horizon de ponces pourries
Forte rétention en eau du sol séché à l'air

Profil E 346 : Calafquen
a: 0-20 cm b: 50-70 cm c: 90-130 cm d: 140-170 cm

Au nord des collines de Panguipulli-Calafquen qui prolongent la cordillère andine jusqu'à la côte on retrouve à nouveau la plaine centrale bordée à l'est par les Andes et à l'ouest par la cordillère côtière. La partie sud de cette plaine reçoit d'abondantes précipitations.

MINÉRALOGIE DES CENDRES

Toute la région au sud de Villarica est recouverte de cendres à dominance très importante d'hypersthène. Ce n'est que dans les cendres provenant des toutes dernières éruptions du volcan Rinihue qu'une certaine proportion d'olivine a été observée.

Tout change aux abords du volcan Villarica, où l'olivine devient le minéral lourd essentiel des cendres et des laves.

La grande coulée de lave scoriacée de 1971 qui a atteint le rivage du lac Calafquen ne contient que de l'olivine dans les minéraux lourds qui représentent 64% des sables.

Dans les cendres situées au nord du volcan l'olivine est le constituant essentiel des minéraux lourds : 76%. Elle est encore plus abondante dans les minces couches de cendres de 2 à 3cm d'épaisseur, peu altérées que l'on observe en lignes parallèles continues dans le profil.

Lieu et Profil	Hyperst.	Pyroxène mono	Olivine	Hornbl.	Epidote	ML % S
E 349 b	7	16	76	1	-	13
E 350	0	9	91	0	0	10
Lave 1971	+	0	100	0	0	64

Par contre le volcan Llaima situé plus au nord et actif aussi comme le Villarica, rejette des cendres à hypersthène et pyroxènes monocliniques dépourvues d'olivine.

DANS LA CORDILLÈRE LAGO - CABURGA

Sol à allophane relativement jeune : E 349

Le sol a été observé à proximité du lac Caburga.

Les sols sont nettement grossiers et les scories encore dures sont nettement visibles en lignes continues dans le sol ce qui témoigne de sa jeunesse relative. La densité apparente est cependant faible : (0.6) en surface et (0.5) en profondeur. Le sol est limoneux à limono-sableux avec une excellente structure, très léger.

Propriétés

L'hydratation du sol, sans doute par suite de sa relative jeunesse, est modérée mais la rétention en eau utilisable est notable aussi bien sur sol préalablement séché à l'air que sur sol conservé humide. (Différences des humidités à pF3 et 4.2).

Les teneurs en bases échangeables sont faibles (3 à 4m^e p. 100) et quasi nulles en magnésium comme dans beaucoup de sols jeunes à allophanes sur cendres. Les pH mesurés dans le chlorure de potassium ou l'eau sont voisins de 6. La capacité d'échange double sensiblement entre pH4 et pH9. La réaction au test de Fields est très vive.

Minéralogie des fractions fines

Les rayons X indiquent qu'il s'agit de substances amorphes mêlées à des minéraux primaires (4.04 Å, 4,21 Å) et un minéral à 15 Å.

Dans l'infrarouge, l'absorption est maximum à 950^{cm-1} indiquant l'abondance des Al^{IV}. Dans la bande H₂O le maximum est à 1 630^{cm-1} avec une composante plus faible à 1 700^{cm-1}. Ce qui est le cas général des imogolites.

Le microscope électronique montre dans certains clichés de belles fibres entrelacées très semblables à celles des imogolites du Japon. Dans d'autres clichés on voit surtout des masses amorphes rétractées et des particules primaires en abondance.

Ces clichés sont à comparer avec ceux qui ont été obtenus sur les ponces altérées. La présence de l'imogolite semble entraîner une plus grande teneur en eau utilisable mesurée sur sol séché à l'air comme dans le cas des ponces pourries. Cette capacité de reprendre l'eau en quantité notable après dessiccation à l'air témoignerait d'une meilleure organisation du réseau allophanique attribuable à l'imogolite et aussi parfois à la présence d'argiles cristallines.

DANS LA PLAINE AU SUD DE TEMUCO - COIPUE

Sol à allophane

La région est encore bien arrosée. Les sols présentent tous les caractères des sols à allophane. Ils sont modérément hydratés (70 à 90% d'eau à pF3).

TRANSVERSALE EST-OUEST; VOLCAN LLAIMA - TEMUCO

Un profil a été observé dans la cordillère des Andes à 600m d'altitude et un autre dans la plaine.

MINÉRALOGIE DES SABLES

A proximité du volcan Villarica, l'olivine domine très largement dans les minéraux lourds.

Dans toute cette région, proche du volcan LLaïma il n'y a plus d'olivine mais une très forte dominance de pyroxènes - hyperthène (48) et pyroxènes monocliniques (41%) soit au total 90% des minéraux lourds, associés à un peu d'hornblende et d'épidote.

Les cendres rejetées par le volcan LLaïma ont donc une composition totalement différente de celles rejetées par le volcan Villarica.

DANS LA CORDILLÈRE DES ANDES : Profil E 300

Le sol est de coloration foncée noirâtre, riche en matière organique, fortement hydraté à 50cm de profondeur (140% d'eau à pF3) avec un net indice de dessiccation temporaire de surface.

La très forte rétention en eau utilisable (pF3 - pF 4.2), même sur sol préalablement séché à l'air est peut être attribuable à l'abondance de matière organique (24% dans l'horizon labouré et encore 15% à 50cm de profondeur).

Les rayons X n'indiquent pas d'argiles cristallines, mais seulement des substances amorphes.

Dans l'infrarouge, l'absorption est maximum à 970cm^{-1} (Al^{IV}) avec une bande à $1\ 100\text{cm}^{-1}$ (Al^{VI}) beaucoup plus intense dans l'argile totale que dans la fraction très fine de l'argile.

Dans la bande H_2O le maximum d'absorption est à $1\ 700\text{cm}^{-1}$ ce qui caractérise les sols à allophane riches en matières organiques liées à l'allophane, probablement des acides fulviques.

C'est donc un sol bien allophanique avec des liaisons matières minérales et organiques importantes.

AU CENTRE DE LA PLAINE DE TEMUCO

Un autre profil a été observé à proximité de la station expérimentale de Carillanca.

Le sol est de coloration beaucoup plus clair, avec moitié moins de matière organique.

L'hydratation est nettement plus faible en surface comme en profondeur et l'eau utilisable (différences des humidités à pF3 et 4.2) sensiblement la même sur sol conservé humide ou séché à l'air bien qu'en profondeur les différences en valeur absolues soient de 1 à 2 (sol enterré).

Les rayons X indiquent la présence d'un peu d'argiles cristallines. La rate à $14\ \text{Å}$ est inchangée après saturation en potassium et magnésium ou glycérolage et passe à $11\ \text{Å}$ par chauffage à 500°C .

Il n'y a cependant pas au toucher de sensation d'argile sauf tout en profondeur dans le sol enterré.

L'absorption dans l'infrarouge a lieu au-dessus de $1\ 000\text{cm}^{-1}$ (Al^{VI}). Les composantes de l'hallowysite sont sensibles. Le maximum d'absorption dans la bande H_2O est à $1\ 630\text{cm}^{-1}$ avec une composante à $1\ 700\text{cm}^{-1}$ très réduite.

C'est déjà un allophane plus évolué avec un début d'organisation.

BORDURE OUEST DE LA PLAINE

Les sols à allophane sur cendres relativement récentes s'amincissent de plus en plus quand on s'éloigne des montagnes et finissent par disparaître faisant place aux sols rouges argileux.

Ces sols sont beaucoup plus anciens essentiellement constitués de métahallowysite ou de fire-clay. Aux rayons X les rates à $4.5\ \text{Å}$, $3.56\ \text{Å}$, $7.23\ \text{Å}$ sont très intenses.

CONCLUSION

On passe donc des sols à allophane très hydratés vers les sols à allophane renfermant un peu d'argile cristalline, puis vers les sols argileux sur les formations plus anciennes.

Cette transversale d'est vers l'ouest part du pied même des volcans, entre les deux volcans, dans les régions de dépôts récents de cendres et de ponces encore peu altérées.

Dans la plaine de Curacautin on rencontre déjà les sols de type Santa Barbara que nous décrirons dans un prochain chapitre.

Puis plus à l'ouest encore ce sont les sols rouges argileux à métalloysite de type Collipulli.

MINÉRALOGIE DES SABLES

Les sols proches du volcan Villarica, renferment essentiellement l'olivine dans les minéraux lourds.

A proximité du volcan Llaima plus au nord, les pyroxènes dominent nettement, l'olivine ayant disparu.

Plus au nord encore, autour des volcans Tolguaca et Lonquimay, c'est à nouveau l'olivine qui est très largement l'élément constitutif essentiel des minéraux lourds contenus dans les sols.

Comme dans le cas de la transversale étudiée à la latitude du volcan Villarica, la proportion d'olivine décroît vers l'ouest avec un accroissement des pyroxènes. Il y a probablement lorsque l'on s'éloigne des volcans des mélanges avec les cendres de composition différentes provenant d'autres volcans, tel le volcan Llaima (Hypersthène), etc...

Lieu N° Profil	Hypers-thène	Pyrox. mono	Olivine	Horn-blende	Epidote	MLXS
<u>SOLS PEU ÉVOLUÉS AVEC DES HORIZONS PONCEUX</u>						
<u>A 1350m d'altitude</u>						
E 365 ponce	2	17	80	1	-	6
E 363 alloph.enfoui	2	+	98	0	0	11
<u>A 1200m d'altitude - sol à allophane</u>						
E 366 a	34	6	60	0	0	22 Feldspaths
b	15	4	81	0	0	8 Feldspaths
<u>A 800m d'altitude - sol à allophane</u>						
E 367	8	7	85	0	0	7 Feldspaths rares quartz
<u>A 800m - Recouvrement peu épais (30cm) de cendre récente sur des sols à allophane plus anciens sans horizon ponceux (Curacautin)</u>						
E 359	22	15	55	6		8 Zircon 2
<u>SOLS DÉJÀ ÉVOLUÉS SANS HORIZON PONCEUX</u>						
<u>A 800m d'altitude</u>						
E 357 b	41	23	35	1		14
d	33	12	20	8	27	9
<u>A 465m d'altitude</u>						
E 356	38	16	24	22		1

COMPOSITION DES SABLES À L'OUEST DES VOLCANS TOLGUACA ET LONQUIMAY

Les sols sont encore très jeunes, avec des lits de cendres et de ponces, de scories grossières encore à peine altérées, alternant avec de minces couches de cendres fines déjà allophanisées, le tout sur plusieurs mètres d'épaisseur.

L'allophanisation dans ces régions humides d'altitude (3m de pluie par an) est évidente, et la réaction au test de Fields intense. Il y a cependant encore beaucoup de minéraux primaires et peu de substances allophaniques formées. L'hydratation n'est donc pas très importante : 35 à 40% et les teneurs en bases échangeables relativement satisfaisantes du fait de l'abondance des minéraux en voie d'altération. Seuls certains dépôts de cendres fines sont déjà fortement allophanisés; bien onctueux et hydratés.

Les rayons X révèlent essentiellement des minéraux primaires sans indication d'argiles cristallines. Les forêts d'Auracaria et de Coïgue sont magnifiques.

LES SOLS DES PIEDMONTS DE LA CORDILLERE (E 357-9) : altitude 800m

La ponce a disparu, mais on retrouve par place des dépôts de cendres récentes peu altérées en recouvrement irrégulier sur les sols à allophane. La différenciation est extrêmement nette. Les cendres récentes n'ont parfois que 20 à 30cm sur les versants en pentes régulières, mais bien davantage dans les parties concaves où elles se sont accumulées. Elles ont généralement disparues sur toutes les pentes un peu plus fortes. On ne les retrouve plus à l'ouest de Curacautin qui semble être la limite occidentale atteinte par les cendres de ces ultimes éruptions.

Mis à part ce recouvrement très récent, les sols semblent présenter deux dépôts : dont les limites sont devenues très imprécises.

Les horizons supérieurs, limoneux, doux, très très léger, seraient essentiellement allophaniques.

Dans l'infrarouge le maximum d'absorption est légèrement au-dessus de $1\ 000\text{cm}^{-1}$ dans l'argile totale et en-dessous dans la fraction très fine de l'argile. L'absorption est aussi plus marquée à $1\ 700\text{cm}^{-1}$ dans la fraction fine.

Par contre, les horizons de profondeur (80cm) renferment de l'hallowysite et de la gibbsite en quantité notable ce qui leur confère un toucher un peu argileux. Les bandes d'absorption haute fréquence de la gibbsite sont bien marquées avec un maximum SiO à $1\ 050\text{cm}^{-1}$ mais une composante importante à 950cm^{-1} .

Une raie à $14\ \text{Å}$ est bien visible en surface comme en profondeur.

En surface les pF mesurés sur échantillons conservés humides ou préalablement séchés à l'air sont sensiblement les mêmes. Il y aurait une certaine dessiccation temporaire.

Par contre en profondeur l'écart est important s'il s'agit de sol humide ou séché à l'air mais les différences entre les pF 3 et 4.2 (eau utilisable) sont analogues ce qui dénote une certaine organisation du réseau.

Plus en profondeur encore dans les horizons à hallowysite et gibbsite, l'écart diminue entre les valeurs de pF sur sol humide ou préalablement séché à l'air.

Les sols de Curacautin s'apparentent au type Santa Barbara dont ils constituent le faciès de l'extrême sud.

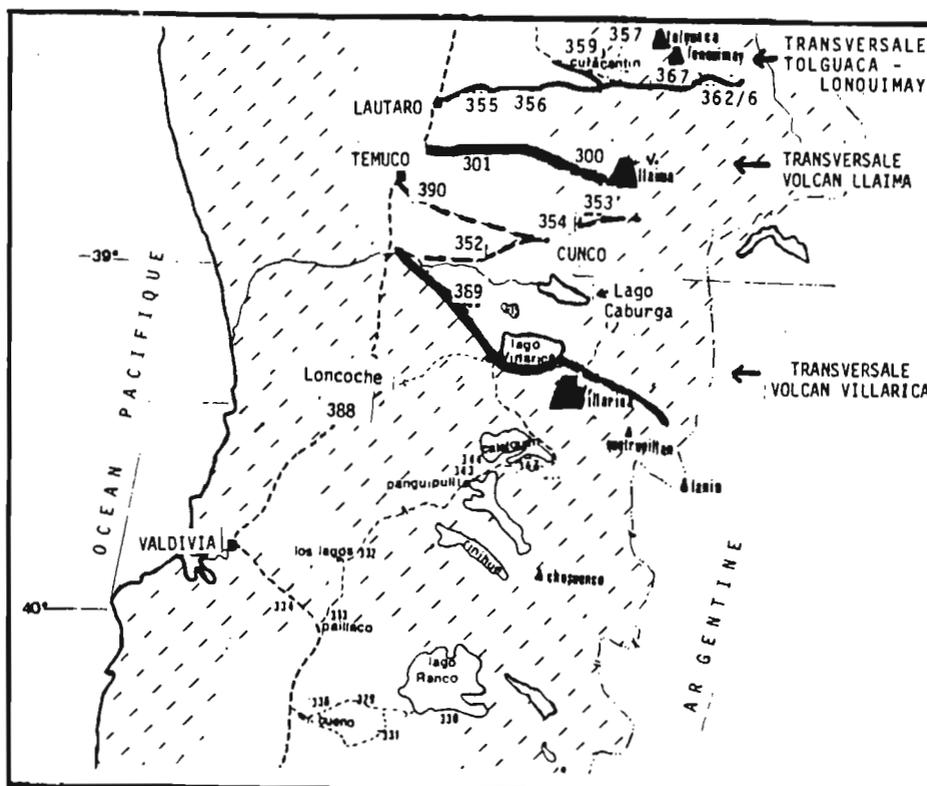
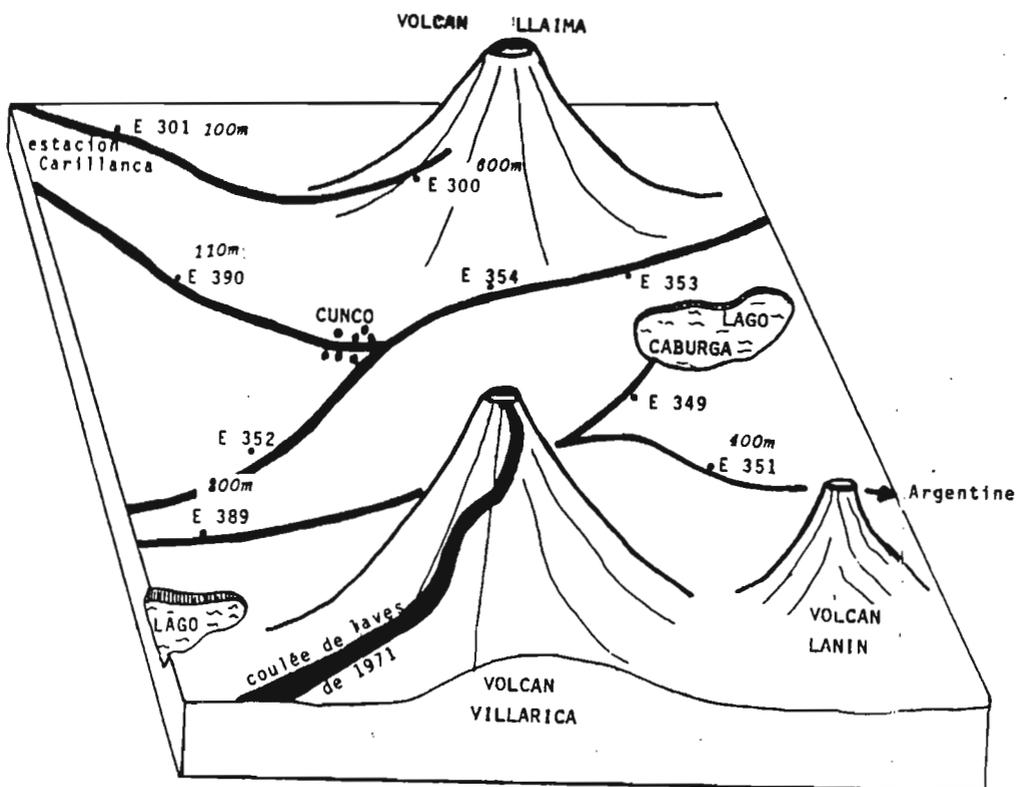
LES SOLS DE LA PLAINE (E 356) : altitude 400m

Les sols sont analogues, assez profonds sur les collines avec également les deux dépôts superposés, l'un bien allophanique, limoneux, très léger, l'autre avec une sensation nette d'argile en profondeur.

Les sols sont profonds sur les collines (2 mètres ou davantage) mais ne dépassent pas 80 cm dans les vastes étendues planes en recouvrement sur les cailloutis fluvio-glaciaires. Il est probable que ces dépôts caillouteux n'ont été mis à l'abri des inondations torrentielles dévastatrices que depuis relativement peu de temps ; seuls les dépôts récents ont pu persister.

LES SOLS ROUGES

Plus à l'ouest les sols à allophane diminuent d'épaisseur et font place progressivement aux sols rouges argileux à métahallowysite. Ceux-ci apparaissent d'abord en taches éparses dans les parties où la cendre a été décapée avant de devenir encore plus à l'ouest le type de sol principal.



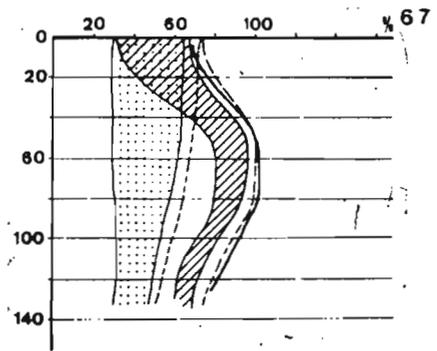
TRANSVERSALE DES VOLCANS VILLARICA ET LLAIMA A L'EST VERS LA CORDILLERE COTIERE A L'OUEST

LEGENDE

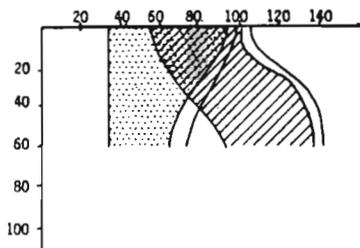
ordonnées : Profondeur du sol en cm
 abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2

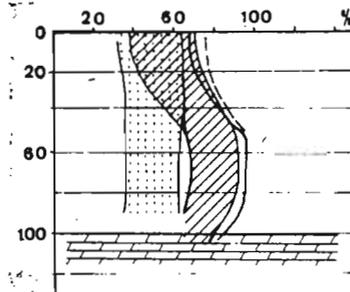
-  déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
-  déterminé sur échantillon conservé humide
-  valeur de l'humidité à pF 2,5
-  Eau naturelle au moment du prélèvement de sol



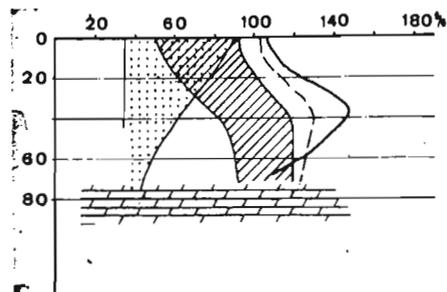
Profil E 356 - Curacantin



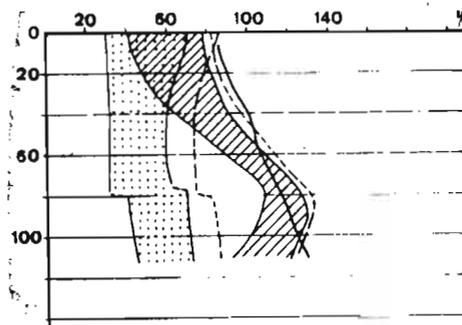
Echantillon 300 LLaima



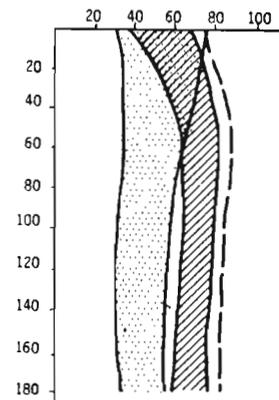
Profil E 301 - Temuco



Profil E 352 - Allipen



Profil E 354 - Cunco
 Plaine de TEMUCO du Nord au Sud (haut en bas)

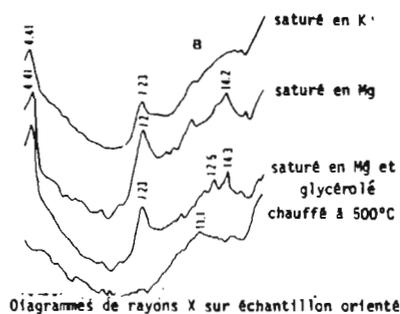
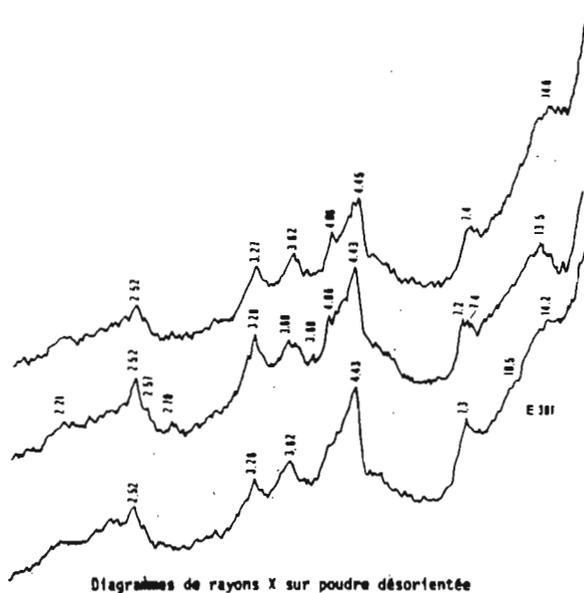
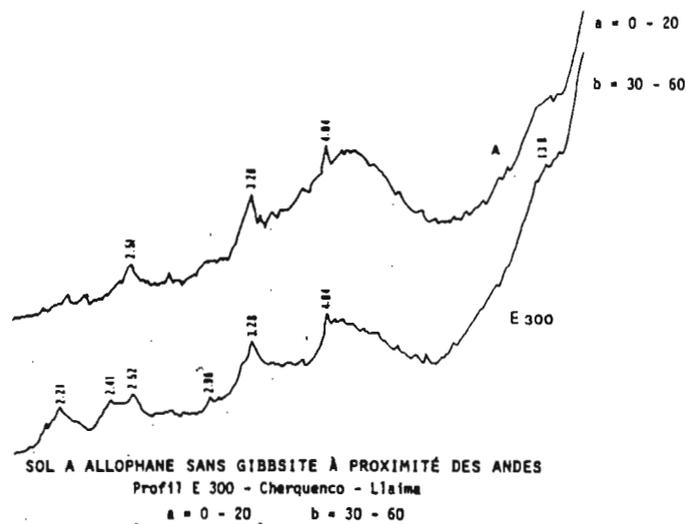


COIPUE
 Echantillon 389

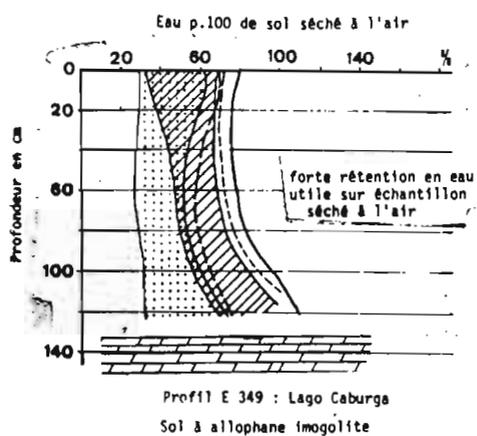
RETENTION EN EAU DES SOLS ALLOPHANE A DIVERS PF

Sols conservés humides ou préalablement séchés à l'air

La rétention en eau utile du sol séché air est relativement importante



SOL À ALLOPHANE ET HALLOYSITE ... DANS LA PLAINE CENTRALE
Profil E 301 - Carillanca
a = 0 - 20cm b = 40 - 60cm c = 80 - 100cm d = 120cm:un peu d'argile



LEGENDE

ordonnées : Profondeur du sol en cm

abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2

⋯ déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air

▨ déterminé sur échantillon conservé humide

--- valeur de l'humidité à pF 2,5

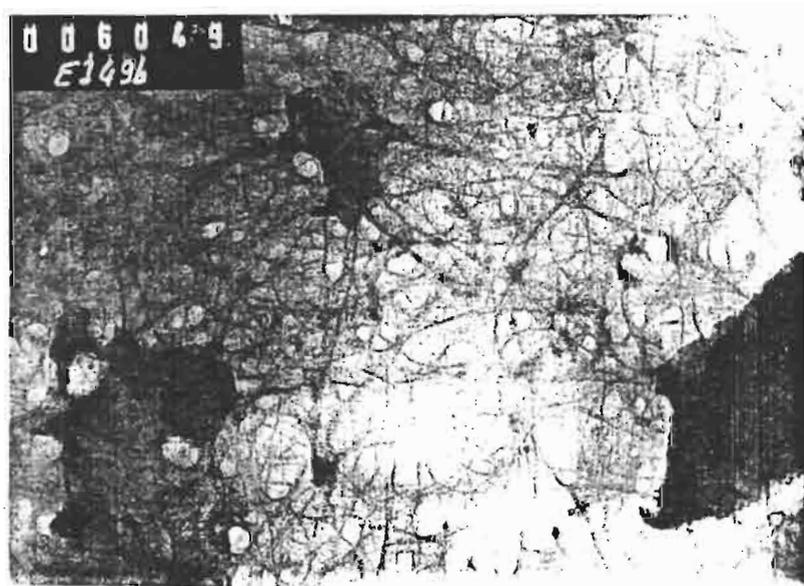
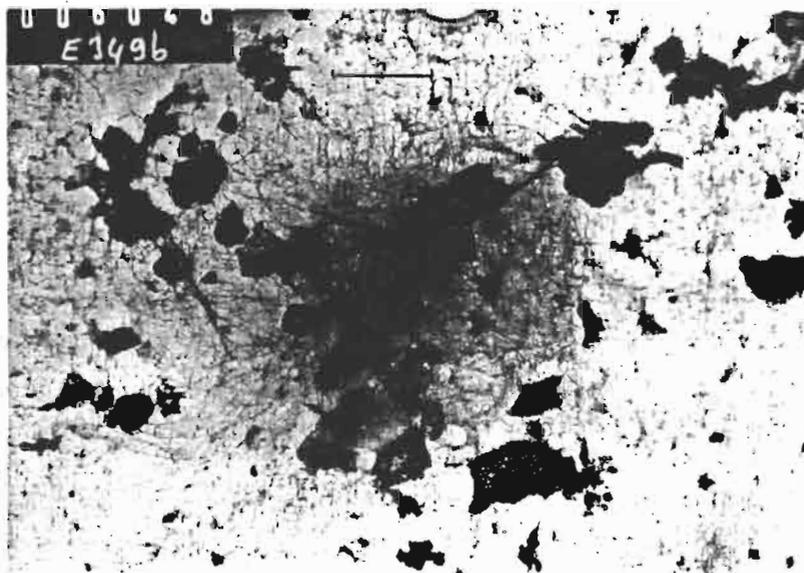
— Eau naturelle au moment du prélèvement de sol



SOL A ALLOPHANE (IMOGOLITE) SANS GIBBSITE
Profil E 349 - Lago Caburga (Villarica)
a: 0-15 b: 40-60 c: 80-100 d: 100-130

Cliché 6048 (SIEFFERMANN) E 349 b Caburga

Cliché 6049 (SIEFFERMANN) E 349 b Caburga



LES SOLS SANTA BARBARA

Sols à allophane à dessiccation temporaire

LOCALISATION :

Ces sols occupent de très vastes surfaces sur les piemonts peu accidentés des Andes. Depuis Curacautin au sud, jusqu'à Talca au nord, ils forment une bande de plusieurs centaines de kilomètres.

A l'est, c'est la cordillère des Andes aux versants souvent escarpés dépourvus du manteau de cendres, sauf aux abords immédiats des volcans.

A l'ouest la couche de cendre disparaît et ces sols font progressivement place aux sols rouges argileux assez compacts, à métalloysite et fire-clay, sur lesquels ces sols Santa-Barbara viennent en recouvrement de plus en plus minces jusqu'à disparaître.

CLIMAT :

Ces régions sont nettement moins arrosées que plus au sud, mais la pluviométrie croît lorsque l'on se rapproche de la cordillère.

Certaines propriétés des sols reflètent bien ces variations climatiques. Les bases échangeables sont plus importantes que dans les sols du sud et décroissent au voisinage de la cordillère. Les AH l'emportent sur les AF à la différence des sols des régions plus humides du sud.

Les valeurs du pF ou de la capacité totale d'échange de cations diffèrent peu si les déterminations sont effectuées sur sol préalablement séché à l'air ou conservé humide sans séchage.

La différence s'accroît en se rapprochant de la cordillère ainsi qu'en profondeur ou la dessiccation est moins sensible. Enfin il semble qu'il y ait une meilleure organisation de la structure du réseau allophanique.

PROPRIETES :

La structure du sol est véritablement soufflée de 20 à 80cm de profondeur. Le sol paraît formé de très petits agrégats oolithiques juxtaposés laissant entre eux de nombreux vides.

La caractéristique morphologique essentielle et remarquable de ces sols qui peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur est l'extrême légèreté, friabilité de cet horizon B1 jusque vers 1m de profondeur environ. La bêche s'enfonce très aisément.

Les teneurs en matières organiques ne sont pourtant pas considérables : 10% dans l'horizon labouré, décroissant rapidement en profondeur bien que des valeurs de 2 à 3% soient encore observées à 1m de profondeur. La matière organique n'est donc pas responsable, du moins quantitativement de cette structure soufflée remarquable.

L'hydratation des sols est modérée (figure p.) inférieure à 100% et relativement constante sur toute l'épaisseur du profil. Les valeurs d'humidité pour les différents pF sont peu différentes si elles sont mesurées sur sol préalablement séché à l'air ou conservé humide ce qui indique une certaine dessiccation temporaire du sol. Cette différence est un peu plus importante en profondeur, où la dessiccation est moins prononcée qu'en surface.

En se rapprochant des montagnes, en régions plus humides, l'écart des valeurs des pF obtenus sur sols conservés humides ou préalablement séchés à l'air s'accroît (E 357, E 384) ainsi que l'humidité en valeur absolue qui peut atteindre 100%. Le dessèchement temporaire n'est plus sensible qu'en surface.

L'eau utilisable mesurée sur sol séché air, c'est-à-dire la différence des humidités à pF3 et pF4.2 est importante et semblable à la valeur obtenue sur sol humide. Cette valeur importante est l'indice d'une meilleure organisation du réseau allophanique. Il n'y a pas cet effondrement du réseau de l'allophane par séchage à l'air que l'on observe dans les sols à allophane perhydratés mais maintien d'une certaine structure qui permet l'emmagasinement d'une certaine quantité d'eau.

La capacité totale d'échange de cation varie avec le pH de mesure, mais les valeurs obtenues sur sol conservé humide ou séché à l'air sont identiques en surface, légèrement plus élevées en profondeur dans les horizons moins soumis à dessiccation. Ces résultats sont donc à rapprocher de ceux obtenus pour les humidités à différents pF.

On remarque qu'en dépit des fortes teneurs en matières organiques en surface la capacité d'échange varie peu dans le profil ou croît en profondeur.

VARIATIONS DE LA CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS AVEC LE pH SUR SOL CONSERVE HUMIDE OU SECHE										
Acetate d'ammonium -Normal -Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve. Résultats en mé.pour 100gr de sol sec étuve.										
1) SANTA BARBARA E 386										
Profondeur en cms.	Sol conservé humide					Sol séché à l'air				
	pH4	pH7	pH9	eau (pF3)	S/T pH7	pH4	pH7	pH9	eau pF3%	MO%
0 - 20	35	48.8	64	(62)	30	32.5	50.5	63	(67)	13,5
35 - 50	33	42.5	51.5	(66)	28	28.3	42	52.5	(66)	6,7
60 - 80	41.5	49	52	(72)	21	30.7	-	52.5	(58)	5,0
100 - 160	40.6	49	62	(76)	15	-	-	-	(61)	1,6
2) SAN FABIAN E 379										
Profondeur en cms.	Sol conservé humide					Sol séché à l'air				
	pH4	pH7	pH9	eau (pF3)	S/T pH7	pH4	pH7	pH9	eau pF3	MO%
0 - 20	21.4	32.4	49	(59)	25	20.6	34.6	49.8	(68)	11,2
30 - 50	32.3	40.5	45.3	(72)	17	26	37.2	50.6	(61)	7,8
70 - 100	38.3	50	54.6	(72)	15	34.3	37	47.7	(57)	1,9
3) TALCA E 392										
Profondeur en cms.	Sol conservé humide					Sol séché à l'air				
	pH4	pH7	pH9	eau (pF3)	S/T pH7	pH4	pH7	pH9	eau pF3	MO%
0 - 20	17.4	28.8	38.8	(50)	30%	17.3	29	43.2	(50)	10.6
50 - 70	-	-	-	(56)		20.	29	41.7	(49)	4.7
100 - 150	22.4	35	45	(55)	34%	19	26	39	(51)	3.2

MINERALOGIE DES ARGILES :

Synthèse des résultats

La raie à 4,45 Å est peu prononcée en surface et disparaît lorsque l'on se rapproche des montagnes en régions plus humides.

Dans les horizons profonds par contre cette raie est le plus souvent bien nette avec parfois la raie à 10 Å de l'hallowysite (E 392 D).

On peut penser que les horizons de surface proviennent de dépôts de cendres plus récents que ceux de profondeur. Dans ces derniers l'hallowysite a eu le temps de se former déjà en petite quantité. La discontinuité lithologique est parfois nette dans la morphologie du profil.

Une raie à 14 Å apparaît dans tous les échantillons. Elle reste inchangée après saturation en K ou Mg ou par glycérolage ou chauffage à 150 - 200°C. Cette raie passerait à 10 Å après chauffage à 500°C.

La technique de dissolution différentielle (Segalen) montre qu'après 5 attaques successives acide-base, la dissolution de la fraction fine inférieure à 2µ est quasi totale. Ce résidu ne dépassant pas 10%.

La dissolution de l'alumine est beaucoup plus progressive que pour les sols à allophane fortement hydratés situés plus au sud. Dans ces derniers l'alumine était presque entièrement solubilisée par les deux premières extractions.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 des produits solubilisés passe de 1 à la première attaque à 2 dans les suivantes puis à 4 dans la cinquième sans jamais atteindre les hautes valeurs obtenues avec les sols à allophane perhydratés du sud. Après les 5 extractions le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la totalité de la substance dissoute est de 1.4.

Ces résultats de l'examen minéralogique confirment donc les conclusions déduites des propriétés des sols. Il s'agit de substances allophaniques relativement mieux organisées avec des liaisons Al-Si plus énergiques que dans les allophanes du sud. On remarque aussi un début de formation d'argiles cristallines halloysite et argiles à 14 Å.

Il s'agit cependant encore indiscutablement de sols à allophane dystrandépts. La réaction au FNa (test de Fields) est d'ailleurs très vive et très rapide.

EXAMEN DÉTAILLÉ DE QUELQUES PROFILS DU SUD VERS LE NORD :

Curacautín : E 357 (profil situé le plus au sud)

La présence d'argile cristalline en petite quantité est peu sensible en surface mais beaucoup plus nette en profondeur : Les raies à 4.45 Å et 7.5 Å apparaissent aux rayons X, ainsi que le crochet à 525° à l'ATD et les bandes caractéristiques de haute fréquence dans l'absorption aux infrarouge. La gibbsite apparaît également en profondeur (RX - ATD - IR).

Dans l'infrarouge, l'absorption est maximum à 1.000 cm^{-1} dans l'horizon de surface et se déplace à 1.050 cm^{-1} en profondeur avec deux composantes 950 et 1.100 cm^{-1} .

Santa Barbara : E 386 (profil situé dans la région centrale)

La région paraît un peu plus sèche que dans celle où est situé le profil précédent.

La raie à 4.45 Å est plus nette que dans le profil précédent, même en surface, mais par contre, l'halloysite est moins évidente en profondeur. Dans le précédent profil, la présence d'un horizon enterré plus ancien riche en épidote expliquait l'abondance relative de l'halloysite en profondeur en discontinuité avec les horizons supérieurs.

Dans l'infrarouge, l'absorption est maximum à 1.000 cm^{-1} dans l'argile totale et à 980 cm^{-1} dans la fraction très fine de l'argile plus riche en allophane et Al^{IV} . La bande à 1.100 cm^{-1} apparaît très légèrement dans l'argile totale ainsi que celle à 800 cm^{-1} (SiO).

L'absorption est double et d'intensité égale à 1.630 cm^{-1} et 1.700 cm^{-1} avec une composante à 1.740 cm^{-1} elle est notable à 1.400 cm^{-1} . Les acides humiques qui ont été extraits absorbent fortement à 1.630 cm^{-1} (C-C) à 1.400 cm^{-1} (C-H) à 1.250 et à 2.900 cm^{-1} (C-H). L'absorption est nette mais faible à 1.700 cm^{-1} . Cette bande est probablement due aux acides fulviques.

Bien que la raie aux rayons X à 4.45 Å apparaisse, on ne voit pas les bandes d'absorption de l'halloysite. Il s'agit donc d'un allophane avec déjà une certaine organisation et une proportion notable d' Al^{VI} .

En profondeur, l'absorption demeure à 1.000 cm^{-1} dans les fractions fines et totales de l'argile.

Il n'y a plus qu'un maximum d'absorption à 1.630 cm^{-1} mais la composante à 1.700 cm^{-1} quoique faible est plus nette dans la fraction très fine de l'argile que dans l'argile totale. (Liaisons organo-minérales)

Des bandes haute fréquence de l'halloysite sont légèrement visibles et on observe un début de différenciation des bandes d'absorption à 400 et 800 cm^{-1} quoique celles-ci soient encore très peu marquées.

Il s'agit donc d'un sol à allophane - imogolite avec en mélange une faible quantité de substances cristallines; halloysite, chlorite, gibbsite ...

Au microscope électronique l'ensemble paraît amorphe et rétracté avec des fibres bien nettes. La diffraction d'électron indique la présence d'imogolite mais pas de manière aussi évidente (Yoshinaga) que dans le profil E 326 de Puyehue situé plus au sud ou dans certains échantillons étudiés par Besoin en 1969.

San Fabián : Au nord

La raie à 4.41 Å est déjà sensible dans l'horizon de surface et s'accroît nettement en profondeur. Cette présence de l'halloysite est confirmée par le crochet à 510° à l'analyse thermique différentielle et les deux bandes d'absorption dans l'infrarouge à 3.620 cm^{-1} et 3.680 cm^{-1} déjà nettes en surface et plus prononcées en profondeur.

Dans l'horizon de surface l'absorption dans l'infrarouge a lieu à 950cm^{-1} dans l'argile très fine et à 1.100cm^{-1} dans la fraction grossière de l'argile. Il y a donc abondance d' Al^{IV} dans la fraction très fine et encore de façon notable dans la fraction plus grosse.

L'absorption à 1.725cm^{-1} est notable dans la fraction très fine de l'argile mais très faible dans la fraction plus grosse. La fraction très fine contiendrait davantage de substances allophaniques capables de retenir des substances humiques.

En profondeur il ya peu de différences entre les fractions fines et grossières. L'absorption est maximum à 1000cm^{-1} avec une composante plus faible à 960cm^{-1} indiquant une certaine proportion d' Al^{IV} .

L'absorption est maximum à 1630cm^{-1} dans la bande H_2O avec une composante plus faible à 1700cm^{-1} analogue dans les deux fractions.

Le microscope électronique montre des substances amorphes rétractées avec quelques fibres. Selon Yoshinaga la présence de l'ïmogolite serait étayée : par le crochet à 390° à l'analyse thermique différentielle, le renflement à 950cm^{-1} dans l'infrarouge, la raie à 14 \AA .

Outre les substances allophaniques - ïmogolite, il y aurait donc un peu d'hallowysite et d'argiles à 14 \AA , surtout dans les horizons de profondeur.

CONCLUSION :

Les sols Santa Barbara, caractérisés par leur très grande friabilité, peuvent donc être classés parmi les sols à allophane subissant une certaine dessiccation temporaire, moins sensible en profondeur qu'en surface.

L'ensemble des propriétés : pF, capacité d'échange de cations, teneurs en bases échangeables, nature des substances humiques, minéralogie des substances fines vient confirmer cette hypothèse.

MINÉRALOGIE DES CENDRES

Ces sol à allophane, limoneux et de texture très légère, dérivent d'un dépôt de cendres qui recouvre les moraines caillouteuses ou les argiles rouges des piedmonts doucement ondulés des Andes de Curacautin à Talca, soit sur près de 300kms.

L'épaisseur du dépôt de cendre diminue progressivement à l'Ouest et sur les sols rouges. On n'observe parfois que 50cm à 1m. En général, le dépôt a plusieurs mètres d'épaisseur.

Ce qui caractérise ces cendres, c'est la présence, voire l'abondance de l'épidote, qui témoigne d'une certaine forme de volcanisme. L'hypersthène est, en général, le minéral principal, mais la composition des cendres semble fortement influencée par les volcans situés le plus au voisinage qui peuvent avoir rejeté, soit des cendres à dominance d'hypersthène, soit des cendres à dominance d'olivine.

Variations de la composition des cendres du Sud vers le Nord : Influence des volcans

SUD

Les volcans

Volcan Villarica (olivine)

La coulée scoriacée de lave de 1971 qui a atteint le rivage Nord du lac Calafquen ne contient que de l'olivine. Au nord du volcan, près du lac Caburga, il y a dans un sol allophanique (E 349) une forte dominance d'olivine. Cette prépondérance est encore plus accentuée dans de minces couches de cendres durcies de 2 à 3cm d'épaisseur que l'on observe en profondeur en lignes continues : E 350.

Les abords du Villarica sont donc caractérisés par la dominance massive de l'olivine.

Lieu N° Profil	Hypersthène	Pyroxène mono	Olivine	Hornblende	Epidote	ML % S
E 349 b	7	16	76	1	-	13
E 350	0	9	91	0	0	10
Lave 1971	+	0	100	0	0	64

Volcans Tolguaca et Lonquimay. Les cratères sont proches l'un de l'autre (olivine)

Plusieurs profils, soit de sols à allophane, soit de stratifications de scories et ponces, alternant avec de minces bandes de cendres fines allophanisées, ont été prélevés. La prépondérance de l'olivine est partout très marquée.

Il y a une nette diminution à une vingtaine de kilomètres, près de Curacautin.

Lieu N° Profil	Hypers- sthène	Pyrox. mono	Olivine	Horn- blende	Epidote	ML% S	
A 1350 m. d'altitude							
E 365 ponce	2	17	80	1	-	6	
E 363 alloph. enfoui	2	+	98	0	0	11	
A 1200 m. d'altitude - sol à allophane							
E 366 a	34	6	60	0	0	22	Feldspaths
b	15	4	81	0	0	8	Feldspaths
A 800 m. d'altitude - sol à allophane							
E 367	8	7	85	0	0	7	Feldspaths rares quartz
A 800 m. d'altitude - cendres récentes de surface (Curacautin)							
E 359	22	15	55	6		8/Zircon	2

TABLEAU : Nature des minéraux lourds des cendres aux abords des volcans TOLGUACA et LONQUIMAY (très proches l'un de l'autre)

Volcan Llaima (hypersthène)

Il est situé entre le volcan Villarica et les volcans Tolguaca - Lonquimay. La nature des cendres ne nous est connue que par un seul profil situé sur les premiers contreforts du volcan. Ce sol à allophane (E 300) est caractérisé par la dominance de l'hypersthène et des pyroxènes mono-cliniques pratiquement sans olivine.

E 300b : Hy = 48, Pyrox.mono = 41, horn. = 7, Epidote = 4, ML% S = 7

Les sols

On remarque dans les variations suivantes :

Sols des plaines à l'ouest des volcans Villarica (ol) Llaima (Hy + ol)

Deux profils ont été examinés, l'un à Coipue entre Temuco et le lac Villarica, l'autre près de Cunco. La composition minéralogique est voisine, avec présence en quantité similaire d'hypersthène, pyroxènes mono-cliniques et olivine.

Sols des plaines à l'ouest des volcans Llaima (Hy + ol) et Tolguaca-Lonquimay (ol)

Les deux profils examinés ont une composition identique, avec nettement plus d'hypersthène et de hornblende et moins de pyroxènes mono-cliniques et olivine que plus au sud. Faut-il rattacher cet accroissement de l'hypersthène à l'influence du Llaima (cf. E 300). A noter le très faible pourcentage des minéraux lourds.

Sols des plaines à l'ouest des volcans Tolguaca-Lonquimay (ol)

On retrouve à nouveau davantage d'olivine et très peu de hornblende, au moins en surface, en correspondance donc avec les deux volcans voisins.

Les vastes plaines où les cendres recouvrant les collines ondulées, semblent donc caractérisées par la présence en quantité voisine d'hypersthène et d'olivine, avec cependant un net accroissement de l'hypersthène et surtout de la hornblende, en face du Llaima, sans doute sous l'influence de ce volcan ?

C'est ainsi qu'au sud de Curacautin, près de la cordillère, le niveau profond qui renferme de l'hailoysite en proportion notable, est riche en épidote alors que les horizons supérieurs en sont dépourvus (sols plus récents, plus allophaniques) et ont une importante proportion d'olivine attribuable à la proximité des volcans Tolguaca et Lonquimay.

N° Profil	Hypersthène	Pyrox.mono	Olivine	Hornblende	Epidote	ML % S
<u>Plaine à l'Ouest du Villarica-Llaima</u>						
E 389	32	32	32	3	1	5
E 354	20	30	36	7	7	8
<u>Plaine à l'Ouest du Llaima - Toquaca</u>						
E 301 b	40	15	23	22		1
c	33	23	36	8		8,1
E 356	38	16	24	22		1
<u>Ouest du Toquaca Lonquimay</u>						
E 357 b	41	23	35	1	-	14
d	33	12	20	8	27	9

Nature des minéraux lourds des cendres dans les plaines situées à l'Ouest des volcans Villarica, Llaima, Toquaca, Lonquimay.

CENTRE

Le volcan Antuco

Les abords du volcan sont constitués de coulées scoriacées ou de scories assez grossières. La cendre fine paraît plutôt rare. On en a prélevé cependant sur un replat, à proximité du volcan, à quelques dizaines de mètres d'une coulée du dernier siècle.

L'olivine domine très largement : 65%, suivie des pyroxènes mono-cliniques (31%).

Le volcan a rejeté d'énormes quantités de cendres noires grossières qui ont été charriées au loin, presque jusqu'au Pacifique, recouvrant de très vastes étendues planes près de Los Angelès et Concepcion qui constituent les sols Arrayan ; finement sableux en surface avec de plus en plus de sables grossiers en profondeur. Ces sables noirs grossiers sont à peine altérés, le plus souvent non cultivés ou reboisés en pins. D'après Laugénie, ils renfermeraient essentiellement de l'olivine.

Lieu N° Profil	Hyperst.	Pyrox. mono	Olivine	Horn-blende	Epidote	ML% S	
<u>Tout près de l'Antuco - A 1225 m. d'altitude</u>							
E 385 b	2	31	65	2	-	3	
<u>Sol Arrayan près Los Angelès</u>							
E 401 b	22	9	62	1	6	33	Quartz & Feld
d	7	7	86	0	-	24+	I zircon
<u>Sables noirs de l'Antuco-Lahar</u>							

Nature des minéraux lourds des cendres aux abords du volcan ANTUCO et dans les lahars de sables grossiers qui en dérivent.

Le volcan Chillan

Ce n'est plus de l'olivine, mais l'hypersthène qui caractérise les cendres du volcan Chillan. A 1 685m d'altitude, à proximité des Thermes, les recouvrements de cendres sont très épais avec une dominance presque exclusive de l'hypersthène.

A une vingtaine de kilomètres du volcan et 840m d'altitude, l'hypersthène domine encore nettement dans les sols à allophane et surtout dans l'horizon de ponces altérées de profondeur.

Lieu N° Profil	Hyperst.	Pyrox. mono	Olivine	Horn-blende	Epidote	MLXS	
<u>Tout près du volcan - 1 685m d'altitude</u>							
E 381	89	7	4	0	0	10	
<u>A 20 - 30 km et 840 d'altitude</u>							
E 384 A	54	16	19	5	6	17	
ponce C	66	11	7	7	9	34	Feldspaths

Les sols

Dans les profils Santa Barbara, Yungay, San Fabian et Talca situés déjà à une certaine distance de la cordillère, l'épidote est abondante. Elle est plus rare quand on se rapproche de la cordillère E 384 Chillan. A un dépôt riche en épidote, aurait donc succédé des cendres qui en renferment peu ou pas du tout. Le fait que près de Curacautin et des Andes, on retrouve en profondeur ce dépôt à épidote, montre que l'ensemble est peut-être postérieur aux dernières glaciations.

Le sol Santa Barbara aurait été rajeuni en surface par des cendres à olivine, ne modifiant guère la proportion des autres minéraux. Ces cendres à olivine pourraient provenir de l'Antuco au nord ou du Tolguaca - Longuimay au sud.

A San Fabian, au contraire, on serait sous l'influence des cendres à hypersthène du volcan Chillan, de même que pour E 384, plus proche de ce volcan. La proportion d'épidote et de hornblende augmente quand on s'éloigne du volcan et les quartz apparaissent. Ces deux profils sont les plus riches en hypersthène de la série des sols Santa Barbara.

Il est intéressant d'observer les résultats du profil Yungay, non loin de Santa Barbara, avec recouvrement peu épais de cendre sur le sol rouge argileux.

La composition du niveau de cendre est quasi-identique à celle du sol Santa Barbara E 386, mais le sol rouge argileux est très riche en épidote et hornblende avec beaucoup de quartz et peu de feldspaths. L'altération est évidemment très poussée.

NORD

Plus au nord à Talca, c'est de nouveau de l'olivine qui réapparaît en quantité notable, sans doute sous l'influence du Descabezado ? A noter l'abondance de l'épidote dans le niveau de surface. Il faudrait d'abord vérifier ces résultats pour s'assurer qu'il n'y a pas eu inversion des échantillons, avant de conclure à l'abondance des épidotes dans les manifestations explosives récentes de l'actif volcan Descabezado. Nous n'avons pas prélevé de cendres au sud de ce volcan.

Remarques sur la présence de l'épidote

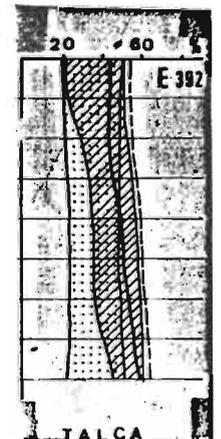
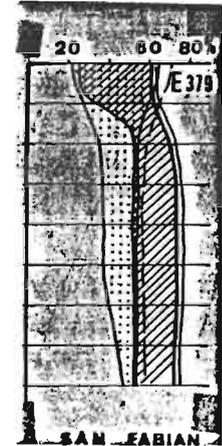
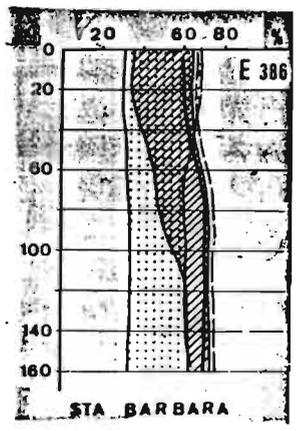
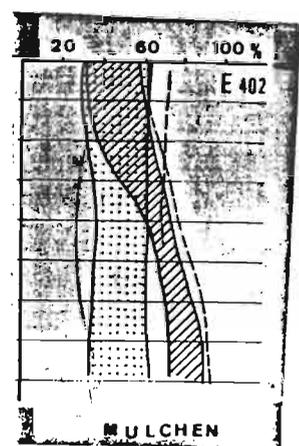
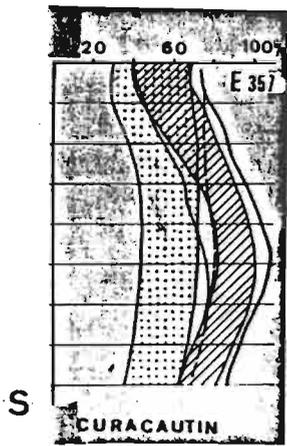
Ces formations à épidotes, hornblende et quartz sont donc comme dans la région de Chiloé, ou à l'ouest du volcan Osorno (Rio Frio, Osorno-Ville) les plus anciennes et correspondraient peut-être à une période interglaciaire, voire antérieure. Elles ne subsistent semble-t-il que sur les formations épargnées par les avancées des glaciers, ou au moins des derniers glaciers.

Par la suite, le volcanisme serait devenu plus basique avec, soit des centres d'émissions à hypersthène soit à olivine. La présence d'épidote correspondrait à une reprise de l'activité volcanique explosive, ou à une apparition de nouveaux cônes. Il n'est donc pas du tout exclu que les épidotes se rencontrent aussi dans les dépôts les plus récents s'il s'agit d'une reprise récente du volcanisme. Le cas du profil de Talca est à examiner plus en détail dans ce sens.

	Lieu N° Profil	Hyperst.	Pyrox. Mono.	Olivine	Horn- blende	Epidote	ML%S	
V. DECA- BEZADO	TALCA							
	E 392 B	42	6	24	3	25	10	
	D	45	5	33	13	4	13	
VOLCAN CHILLAN	SAN FABIAN							
	E 379 B	52	8	9	19	12	8	tr.zircon quartz et feldspaths
	D	46	9	16	13	16	10	
VOLCAN CHILLAN	CHILLAN - Formation plus récente							
	E 384 A	54	16	19	5	6	17	
	C	66	11	7	7	9	34	
VOLCAN ANTUCO	YUNGAY							
	E 412 B	35	7	13	18	27	7	
	Sol rouge enfoui D	10	2	4	44	40	4	quartz et rare feld- spaths
VOLCAN ANTUCO	STA BARBARA							
	E 386 B	24	5	22	22	27	9	
	D	31	1	7	28	32	9 + 1	tourmaline
V. TOLGUACA LONQUINAY	CURACAUTIN							
	1er dépôt rajeuni par des apports récents de recouvrements							
	E 357 B	41	23	35	1	0	14	
	2ème dépôt							
	D	33	12	20	8	27	9	

Nature des sables dans la série des sols de SANTA BARBARA.
Minéraux lourds et légers.

W

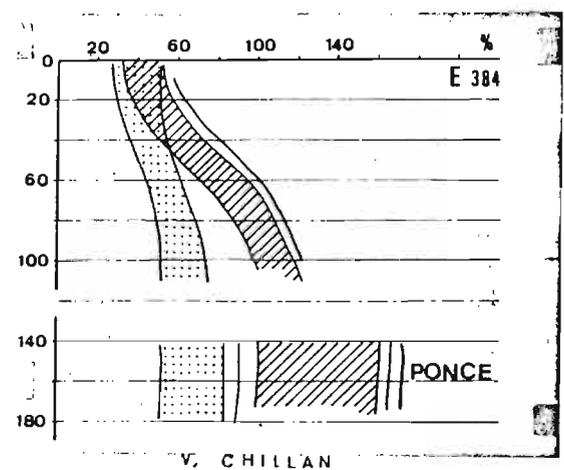


S

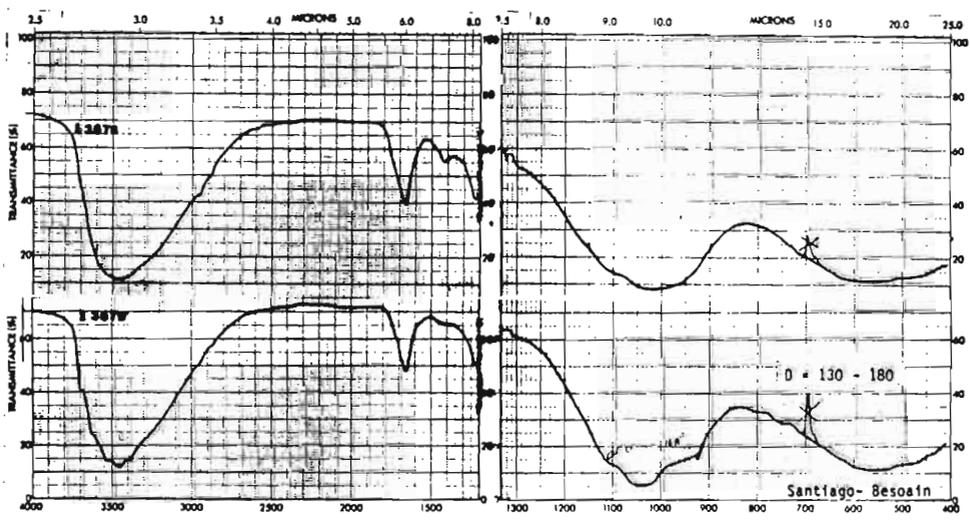
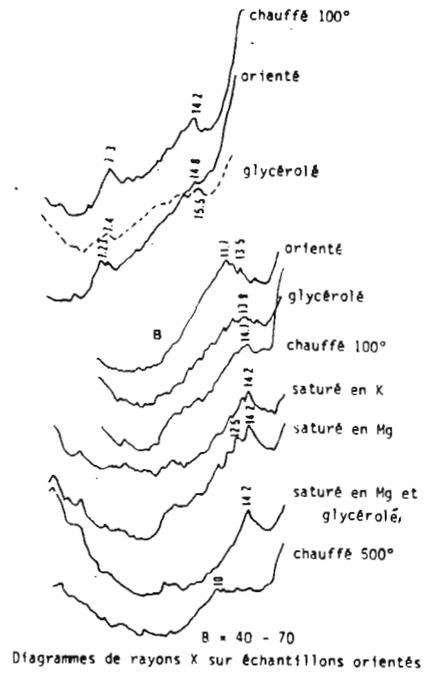
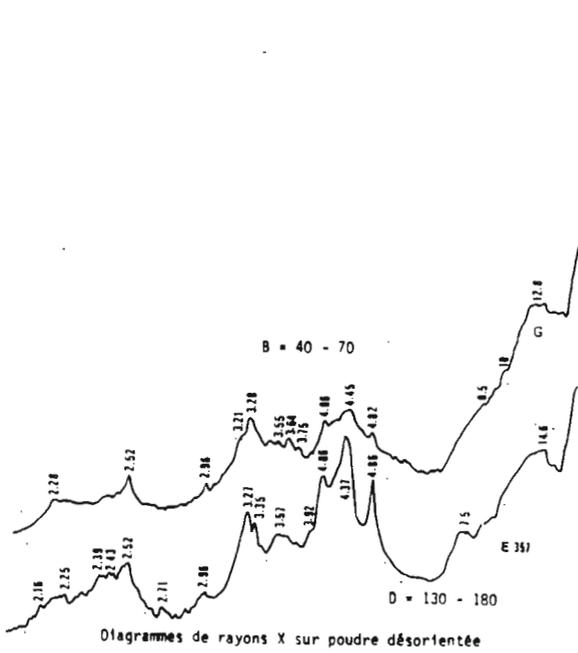
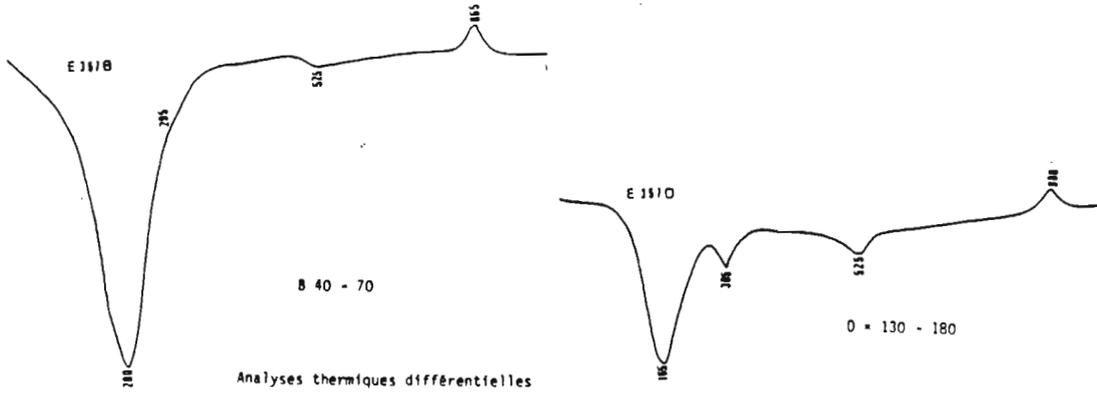
N

LEGENDE

- ordonnées : Profondeur du sol en cm
- abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C
- Différences entre l'humidité à pF 3 et celle à pF 4,2
 - déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
 - déterminé sur échantillon conservé humide
 - valeur de l'humidité à pF 2,5
 - Eau naturelle au moment du prélèvement de sol

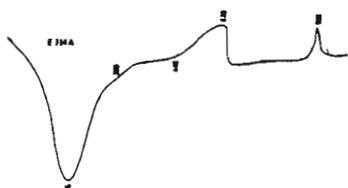


E

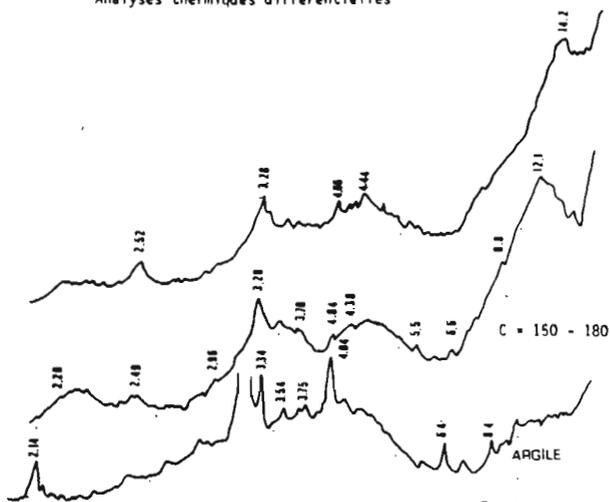


SOL A ALLOPHANE SANTA BARBARA
à début d'organisations: chlorite -
imogolite et halloysite - gibbsite
en profondeur

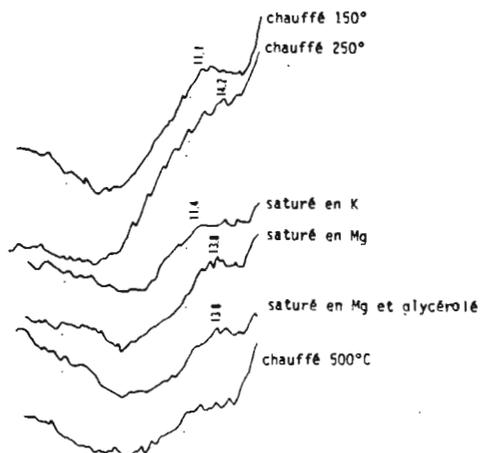
Profil E 357 - Curacautin
a = 0 - 25 b = 40 - 70 d = 130 - 180



Analyses thermiques différentielles



C: après 5 attaques acide/base E 384 C
Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée



Diagrammes de rayons X sur échantillon orienté

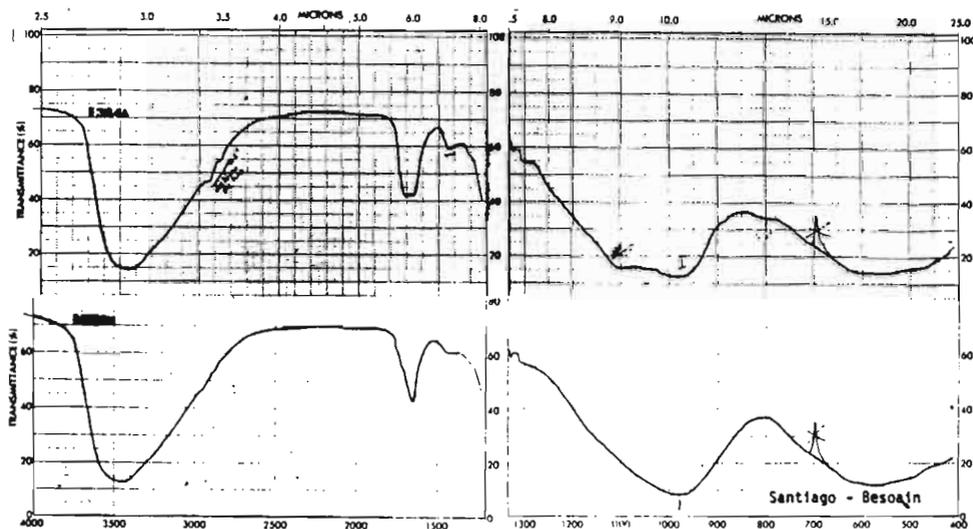
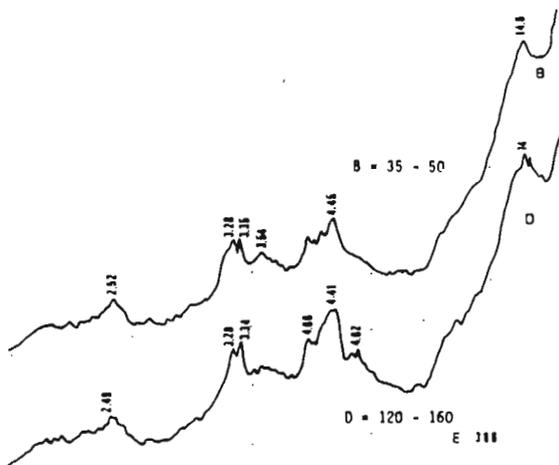
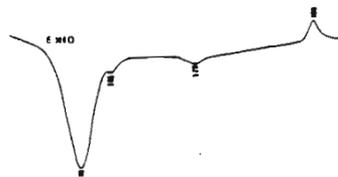


Diagramme d'absorption dans l'infra-rouge

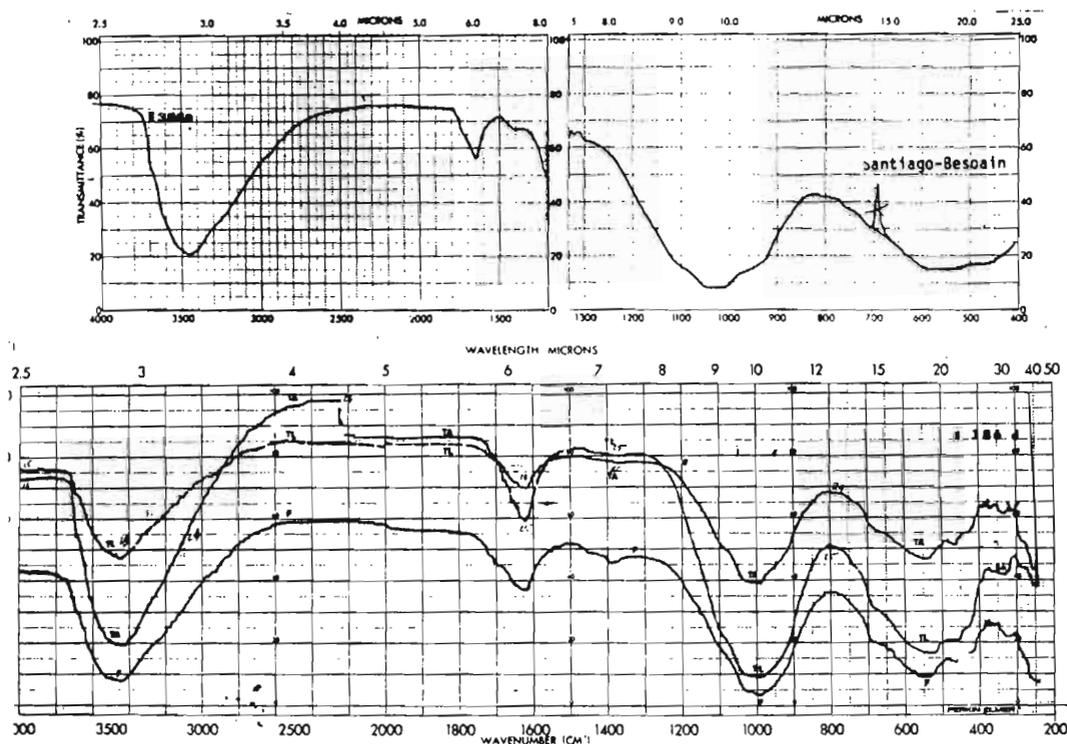
SOL A ALLOPHANE TRES FRIABLE - SANTA BARBARA
à début d'organisation
Profil E 384 - Chillan
a = 0 - 20 b = 60 - 80 c = 150 - 180 ponce



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée



Analyses thermiques différentielles



..TA : Argile séchée à l'air } argile totale
 TL : Argile lyophilisée }
 F : Argile séchée à l'air : fraction très fine

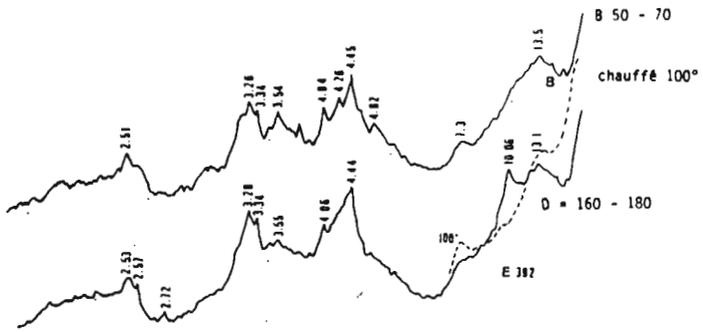
Diagramme d'absorption dans l'infra-rouge

SOL A ALLOPHANE TRES FRIABLE - SANTA BARBARA

A DÉBUT D'ORGANISATION (AH > AF)

Profil E 386 - Santa Barbara - Los Angeles

a = 0 - 20cm b = 35 - 50 c = 60 - 80 d = 100 - 160



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

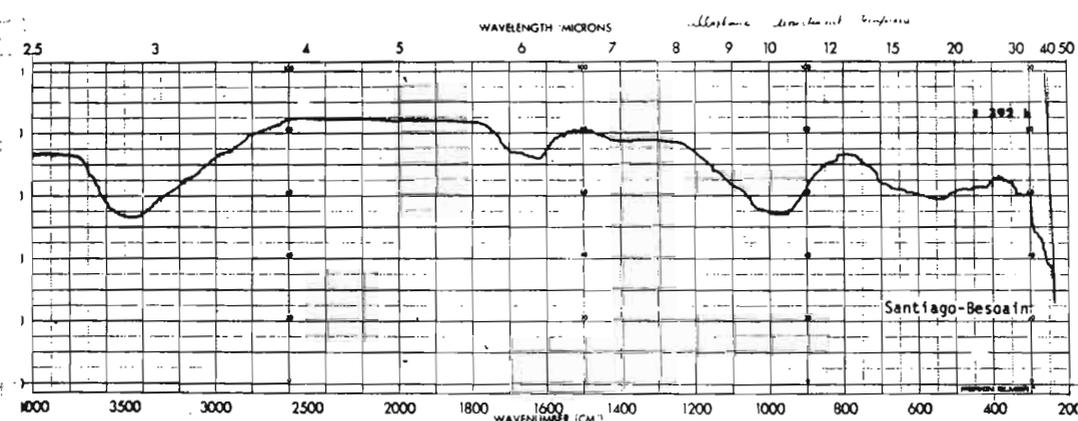


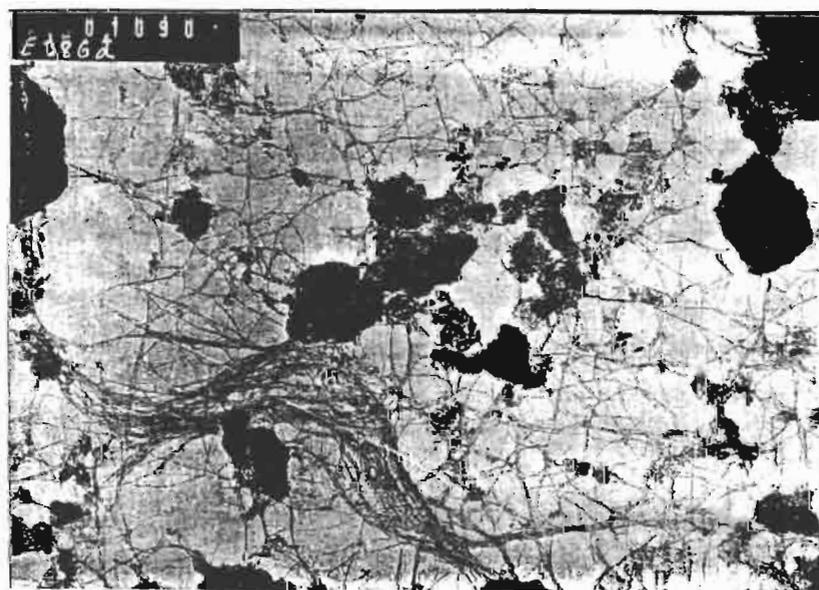
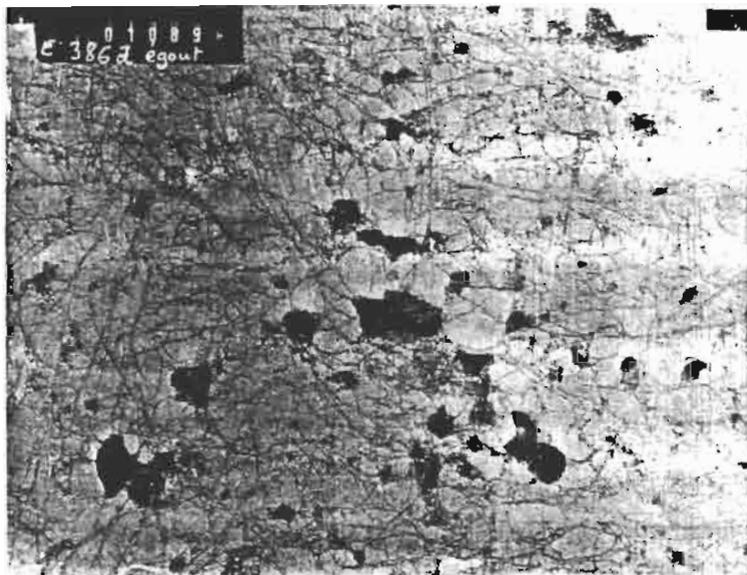
Diagramme d'absorption dans l'infrarouge

SOL A ALLOPHANE TRES FRIABLE (SANTA BARBARA)
 A DEBUT D'ORGANISATION
 Profil E 392 - Talca

a = 0 - 20cm b = 50 - 70cm c = 100 - 150cm d = 160 - 180cm

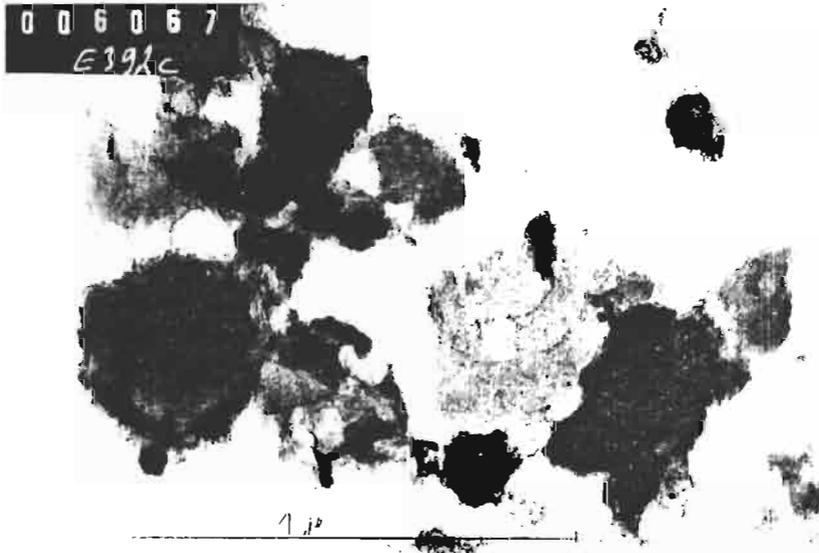
Cliché 10898 (TRICHET) E 386 d égout de centrifugation

Cliché 10901 (TRICHET) E 386 d

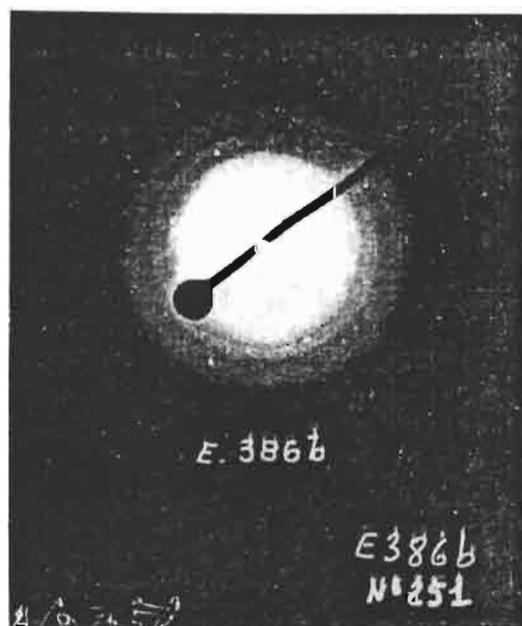


Cliché 6067 SIEFFERMANN E 392 c

Cliché 6068 SIEFFERMANN E 392 c



E 386 d Diffraction d'électron YOSHINAGA



Trois horizons de profondeur de ponces altérées, intercalés entre des horizons de sols à allophane, ont été examinés :

Au Sud, à proximité du fjord de Reloncavi, sous une pluviométrie très importante (sud Llanquihue - environ 4m par an). E 319.

Au Centre, près du lac Calafquen, avec une pluviométrie d'environ 3m par an. E 346c.

Au Nord, près de Chillan avec une pluviométrie de 2m environ. E 384c.

Toutes ces ponces s'écrasent entre les doigts, avec cependant quelques éléments durs. La consistance est onctueuse. La forme initiale de la ponce est conservée. On observe encore les nombreuses cavités qui séparent les graviers ponceux. Ces horizons ont donc une forte porosité (D.A. = 0.3 environ).

Ces horizons ponceux sont très hydratés : 150 à 200%, comme tous les sols à allophane perhydratés, mais le comportement de l'eau n'est pas le même.

On observe deux différences importantes :

1) Il y a un écart très important entre les humidités au pF3 (ou 2.5) et pF4.2 déterminées sur sol séché air ou conservé humide. L'eau utile est donc très importante. Ces sols se comportent donc un peu comme une éponge capable de réabsorber une forte quantité d'eau après l'avoir en partie perdue. Cette propriété distingue ces ponces des sols à allophane perhydratés en général, et en particulier des horizons à allophane situés au-dessus et en-dessous de ces niveaux de ponces altérées.

2) Dans les trois échantillons étudiés, l'humidité au pF3 déterminée après séchage préalable à l'air, demeure importante, même après dessiccation à l'étuve. Elle est cependant plus faible que sur échantillon conservé humide.

Ainsi, avec l'échantillon du sud E 319, l'humidité au pF3, après dessiccation à l'air ou à l'étuve à 105° est encore de 80% (au lieu de 178 sur sol humide).

Pour l'échantillon du centre (Calafquen), elle est encore de 95% après séchage à l'air et de 66% après dessiccation à l'étuve.

Des valeurs semblables (82 et 62%) sont trouvées pour l'échantillon du nord E 384c près de Chillan.

Dans tous les autres sols, et en particulier dans les sols à allophane fortement hydratés du sud, les valeurs de l'humidité au pF3, après séchage à l'air, s'effondrent à 35 - 45%, rarement 50%, surtout dans les horizons de profondeur.

(1) Humidité du sol %	horizons ponceux			Sols à allophane perhydraté		
	E 319 échantillons	E 384c du CHILI	E 346c du CHILI	E 370b CHILI	E 266c EQUATEUR	IS 59d ANTILLES
sans des- siccation	178	164	154	184	280	252
200				158	270	214
150	-	158	-	-	261	203
125	139	154	-142			
100	147?	149	-142	155	236	190
75	115	139	138	134		
50		133	133		187	
sec air	80	82	95	35	44	37
sec 105°		62	66	28	28	26
pF 4,2 sur sol frais	80	106	72	141	206	

(1) La première colonne indique l'humidité atteinte par le sol au cours d'une lente dessiccation à l'air au moment où il a été réhumidifié pour la mesure du pF 3.

Tableau : Valeurs de l'humidité au pF 3 déterminées après dessiccation modérée préalable plus ou moins poussée du sol à l'air à température ordinaire et à l'étuve à 105°C

Le tableau montre pour ces échantillons les valeurs du pF3 obtenues après une intensité variable de la dessiccation à l'air.

On remarque :

- 1) La résistance à l'effondrement du réseau. Le décrochage se produit lentement et essentiellement après une dessiccation poussée à l'air ou à l'étuve.
- 2) La réhydratation importante du sol même après une dessiccation déjà poussée.

MINÉRALOGIE DES ARGILES :

Les rayons X indiquent des minéraux primaires et des substances amorphes avec une raie notable à 12 Å, qui paraît gonfler un peu par chauffage à 200°C, mais on ne saurait l'affirmer avec certitude. Par saturation en Mg, cette raie passerait à 14 Å et à 11 Å avec le K. Il s'agit plutôt de renflements que de raies véritables. La raie disparaîtrait par chauffage à 500°.

Il y a donc présomption, mais pas certitude de l'imogolite.

Par spectrographie dans l'infrarouge, on remarque une forte absorption à 950cm^{-1} indiquant des Al^{IV} qui prédominent sur les Al^{VI} . L'absence d'épaulement sur le côté haute fréquence de la bande SiO indique un faible développement de la structure. Il y a peu de détails dans les bandes de vibrations caractéristiques de la silice vers $425 - 450\text{cm}^{-1}$, plus nette que dans les sols à allophane.

Il n'y a qu'une seule bande d'absorption à 1.620cm^{-1} dans la bande H_2O . Dans les allophanes, surtout les plus hydratés, on observe aussi un maximum à 1.725cm^{-1} . Dans tous les sols à halloysite plus ou moins bien cristallisés, on n'observe qu'une seule bande à 1.620cm^{-1} . Cette unique absorption à 1.620cm^{-1} peut indiquer que dans les allophanes, il y a davantage rétention de matières humiques que pour les substances mieux organisées.

Dans le cas présent tous ces horizons de ponces pourries sont situés en profondeur et renferment peu de matières organiques. Notons que l'absorption à 1.725cm^{-1} est cependant sensible dans la fraction très fine de l'argile.

L'absorption à $3.500 - 1.620 - 960\text{cm}^{-1}$ semble un peu plus forte sur les échantillons séchés par lyophilisation que sur ceux séchés à l'air. Par contre, elle semble plus faible ou similaire dans la fraction très fine de l'argile par rapport à la fraction plus grosse de l'inférieure à 2 microns.

Le microscope électronique

La microscopie électronique est très suggestive. Les fibres sont abondantes dans tous les échantillons et parfois presque aussi spectaculaires que pour les sols du Japon qui ont été traités de la même façon.

1) Dans l'échantillon 384c (Chillan), situé le plus au nord, les fibres sont particulièrement nettes, mélangées à des particules primaires. L'égout de centrifugation (à 40.000 tours à la Sharpless) se présente en masse uniforme, plus ou moins rétractée et enserrée dans une maille fibreuse.

Sur une plaque perforée (Yoshinaga), les fibres accolées de l'imogolite sont extrêmement nettes. La diffraction d'électron montre les raies caractéristiques de l'imogolite à 1.4 et 2.1 Å et celles de l'allophane à 2.25 - 3.3 Å.

Il y aurait donc, à la fois, de l'imogolite en quantité notable et de l'allophane.

La capacité d'échange varie beaucoup avec le pH, mais reste élevée.

E 384c- CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS à DIVERS H : sol humide et séché									
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve.									
sol conservé humide					sol séché à l'air				
Profondeur	pH4	pH7	pH9	pF3	pH4	pH7	pH9	pF3	eau
c :	150 à 180 cm	64.8	81	98	158	13.2	24.6	45.6	82

2) Dans l'échantillon de Calafquen (E 346c): plus au sud, les fibres sont aussi bien visibles sur grille ordinaire ou perforée (Yoshinaga). La présence d'imogolite est là aussi certaine. Sur l'un des clichés, on remarque une grappe de glomérules d'hallowysite agglomérés.

La capacité totale d'échange de cation décroît fortement sur sol séché à l'air, par rapport à celle mesurée sur sol conservé humide.

E 346c- CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS à DIVERS pH : sol humide ou séché air									
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve.									
	sol conservé humide			eau	sol séché à l'air			eau	
Profondeur	pH4	pH7	pH9	pF3	pH4	pH7	pH9	pF3	
c:	90 à 130 cm	62	67.7	80.8	152	17.6	29.9	41.5	95

Elle décroît fortement sur sol séché à l'air par rapport à la mesure sur sol conservé humide.

3) Dans l'échantillon de ponce altérée situé dans le sud, Reloncavi, E 319, on distingue quelques fibres dans une masse très fine de très petites particules plus ou moins agglomérées. Il y aurait moins d'imogolite. La capacité totale d'échange est également moins élevée : pH4 = 37, pH7 = 49 mé p. 100 sur sol humide.

4) A titre de comparaison, on a figuré les clichés de microscopie électronique d'un échantillon du Japon, extrait et obtenu dans exactement les mêmes conditions d'observations (Trichet). Les fibres sont beaucoup plus belles, mais les clichés obtenus sur l'égoût de centrifugation montrent des amas informes enserés dans un réseau fibreux tout à fait semblable à ceux que l'on observe dans les sols du Chili. La capacité totale d'échange de cations de cet échantillon du Japon est d'ailleurs plus faible, presque de moitié à celle mesurée sur ces ponces pourries du Chili (319 excepté).

E 392 - CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS A DIVERS pH - SOL SECHE AIR			
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve			
	pH 4	pH 7	pH 9
Sol du Japon	33	38,7	44,4

La dissolution différentielle

Ces trois échantillons de ponces du Chili ont été soumis à des attaques successives acide-base (Segalen) Après 5 attaques, 98% du produit inférieur à 2 microns est dissous. La dissolution de l'alumine et du fer est très importante dès la première attaque. Contrairement aux allophanes perhydratés du sud, il s'en dissout encore un peu dans les extractions suivantes. Cela indiquerait une meilleure organisation donc une plus grande résistance à la dissolution.

Pour ces trois échantillons, le rapport SiO_2/Al_2O_3 des produits solubilisés par la première extraction, est identique 1.1, puis il s'élève dans les extractions suivantes pour atteindre 1.3 - 1.4, pour la totalité de la substance dissoute par les 5 extractions.

Par l'allure des courbes de dissolution de l'alumine, de la silice et du fer, ces trois échantillons se placent sensiblement en position intermédiaire entre les sols à allophane perhydratés du sud et ceux modérément hydratés du nord. Les liaisons Al - Si sont plus énergiques que dans les premiers, mais moins fortes cependant que dans les seconds, mieux organisés, plus riches en Al^{VI}. Il faut noter la faible proportion de fer.

Ces ponces pourries sont donc constituées d'un minéral fibreux "imogolite" et d'allophane.

Elles ont certaines caractéristiques essentielles des sols à allophane perhydratés (hydrandeps) : forte rétention pour l'eau, faible teneur en bases échangeables, accroissement de la capacité d'échange de cations avec le pH, elle-même en soi déjà élevée et beaucoup plus faible sur sol séché à l'air, vive réaction au fluorure de sodium.

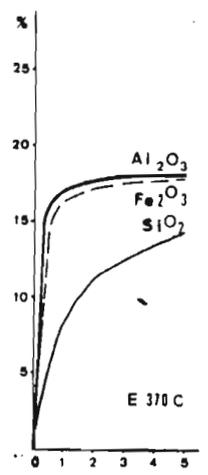
Elles s'en distinguent par un comportement hydrique particulier. L'effondrement du réseau par dessiccation à l'air n'est pas aussi total et irréversible que dans les allophanes perhydratés du sud ou les hydranthepts usuels. La rétention en eau dite "utile" sur sol conservé humide ou séché à l'air est importante. Le sol séché à l'air est donc capable de reprendre beaucoup plus d'eau que les sols à allophane hydratés du sud. Il est capable aussi d'en perdre beaucoup plus à pF4.2 sur sol frais. L'eau est donc moins fortement retenue, mais le sol est capable d'en reprendre davantage lorsqu'il a été séché à l'air. C'est en somme le comportement d'un matériau fibreux à large maille. En comparant un échantillon d'allophane perhydraté de Martinique et un sol à imogolite du Japon, Warkentin a pu montrer que l'"microporosité" déterminée par la rétention de vapeur d'eau, était nettement plus grosse dans le sol à imogolite, ce qui expliquerait et la perte d'eau plus importante à pF4.2 sur sol frais et la capacité du sol séché air à reprendre de l'eau.

Ces échantillons de ponces pourries sont particulièrement bien choisis pour montrer les modifications du comportement hydrique des substances fibreuses, un peu mieux organisées que les allophanes perhydratés du sud. La comparaison a, en effet, lieu sur des substances toutes très fortement hydratées.

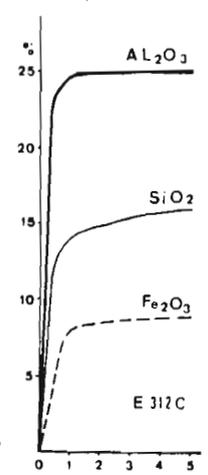
Ces modifications des propriétés hydriques qui se traduisent par cette capacité de reprendre de l'eau après séchage à l'air, se retrouvent dans les sols à allophane un peu mieux organisés, par exemple, dans la série des sols de Santa Barbara, mais l'hydratation, au départ, est beaucoup moins importante et les comparaisons donc moins séduisantes. Aux Antilles et en Equateur, cette capacité pour certains sols d'être fortement hydratés, jusqu'à 100%, et de reprendre l'eau après dessiccation à l'air, est observée dans les sols d'apparence allophanique, mais constitués en fait, d'halloysite jeune très hydratée, aisément soluble dans le réactif Segalen, mais présentant souvent de fort belles raies à 10 Å aux rayons X.

N° Ech.	S102	Al203	Fe203	eaul05°	Perte à 1000°	Résidu	Total
<u>Sols à allophane perhydratés sans gibbsite</u>							
E 312c	15,96	25,00	8,74	17,70	29,48	1,40	98,40
E 370c	14,35	18,03	17,82	13,80	26,59	6,60	97,20
E 321c	14,02	18,23	16,68	15,60	27,10	7,20	98,80
<u>Sols à allophane modérément hydratés, sans gibbsite</u>							
<u>TRUMAO OSORNO</u>							
E 323d	17,47	23,14	11,65	14,2	25,46	7,00	98,90
<u>TRUMAO SANTA BARBARA</u>							
E 386d	20,04	23,77	9,91	14,10	21,55	6,00	95,40
E 379b	16,60	22,72	11,64	14,34	22,58	11,20	99,10
<u>Horizons enfouis de ponces pourries</u>							
E 319	21,91	26,20	4,89	22,00	23,00	2,00	100,00
E 346c	21,46	26,58	5,16	23,50	20,30	5,6	102,60
E 384c	19,55	26,46	8,09	22,01	22,89	2,00	101,00
<u>Comparaison avec un sol perhydraté d'EQUATEUR - Versant amazonien -</u>							
E 224b	14,85	25,66	10,10	16,08	24,62	8,4	99,71
L'extraction a été réalisée sur 500mg. Le résidu est donc très faible de l'ordre de quelques milligrammes et de ce fait sa détermination imprécise. (Extraction effectuée aux Antilles, dosages à Paris).							

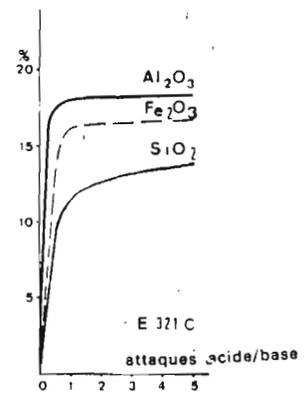
TABLEAU : Pourcentage des oxydes dissous par 5 attaques acide-base (SEGALIN) dans la fraction inférieure à 2 microns.



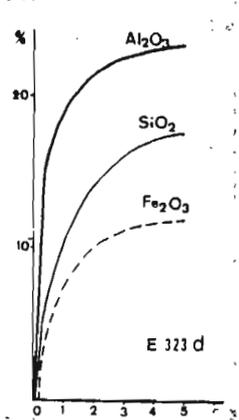
CHILOE



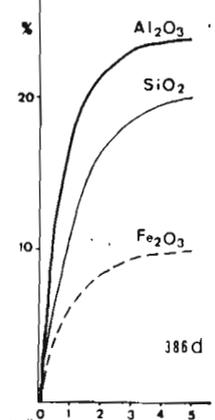
LOS RICHOS
Sol à allophane hydraté



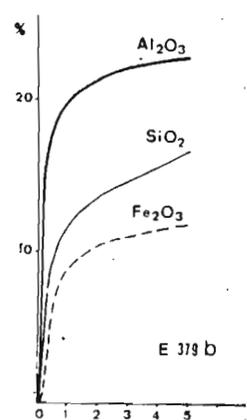
ANTILLANCA



TR. OSORNO

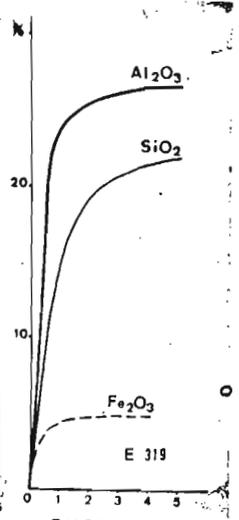


STA. BARBARA

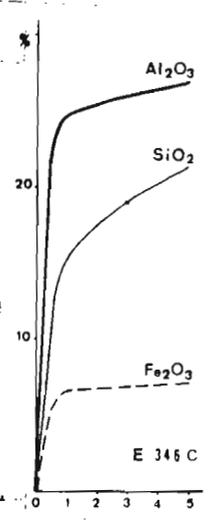


SAN FABIAN

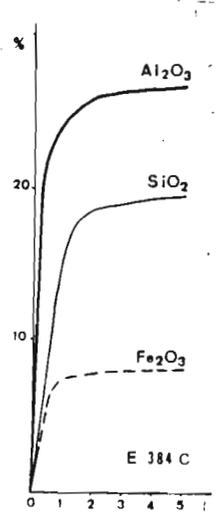
Sol à allophane



ENSENADA



CALAFUEN



CHILLAN

PONCES ALTEREES

Analyse thermique différentielle

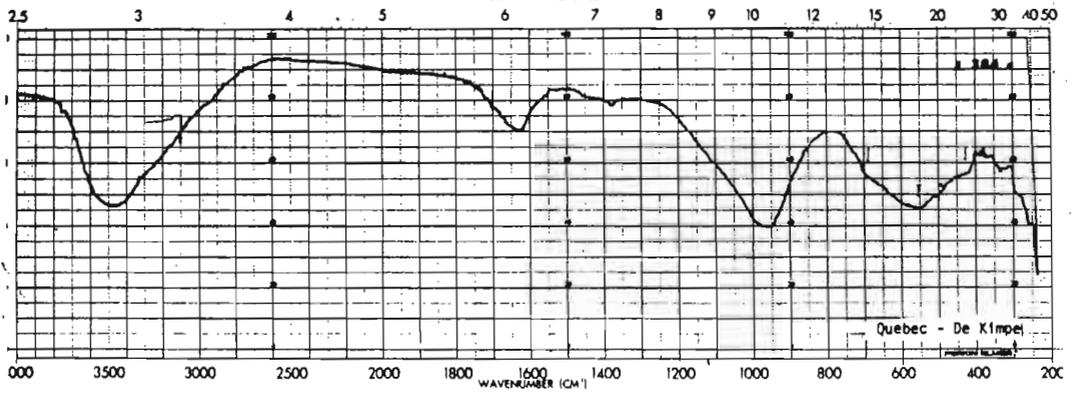
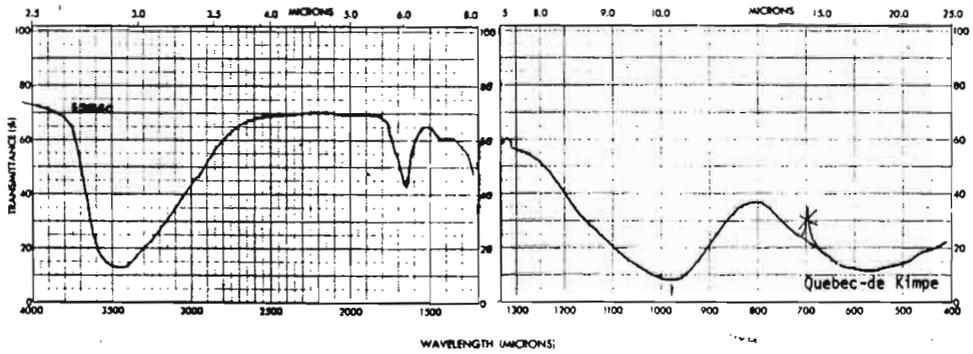
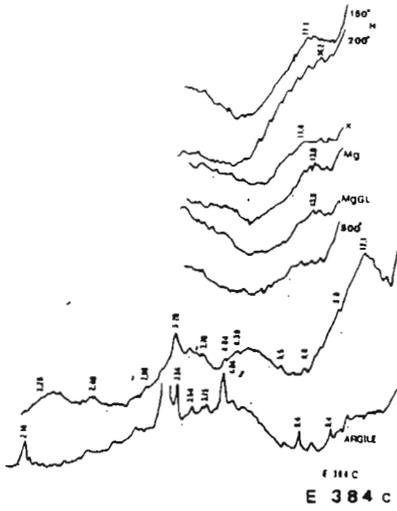
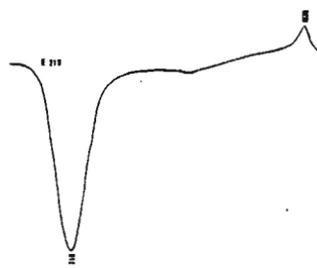


Diagramme d'absorption dans l'infrarouge

PONCES POURRIES
Echantillon E 384 c = Chilian
Profondeur 150 - 180cm



Analyse thermique différentielle

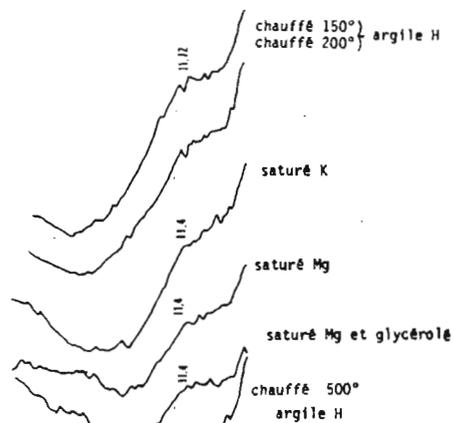
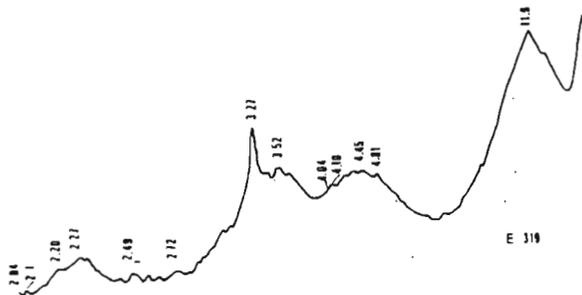
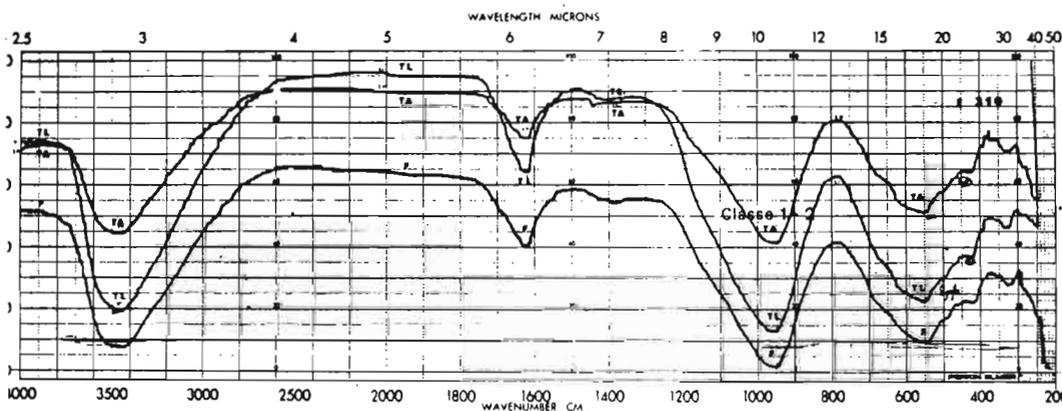
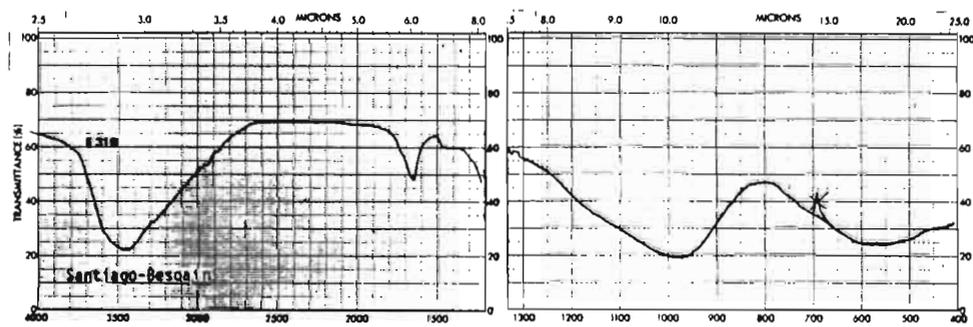


Diagramme de rayons X sur échantillon orienté après divers traitements



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

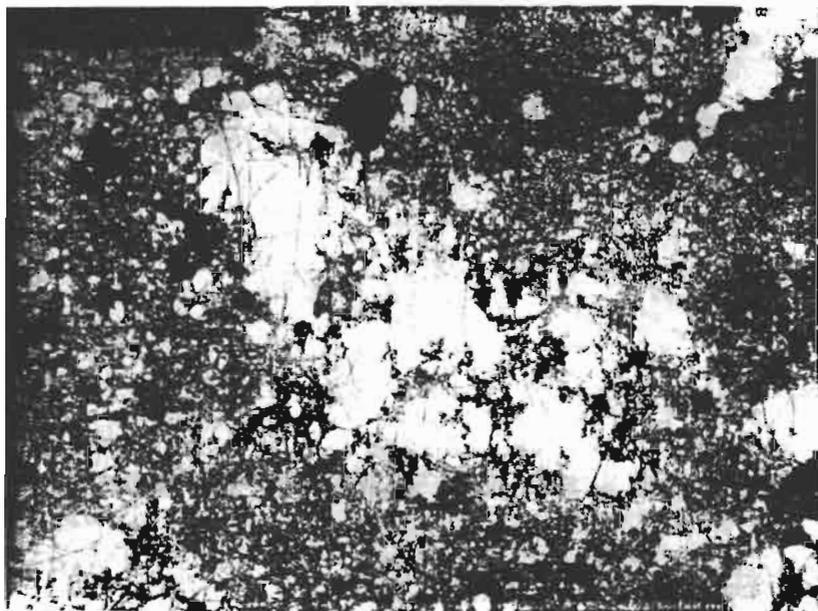
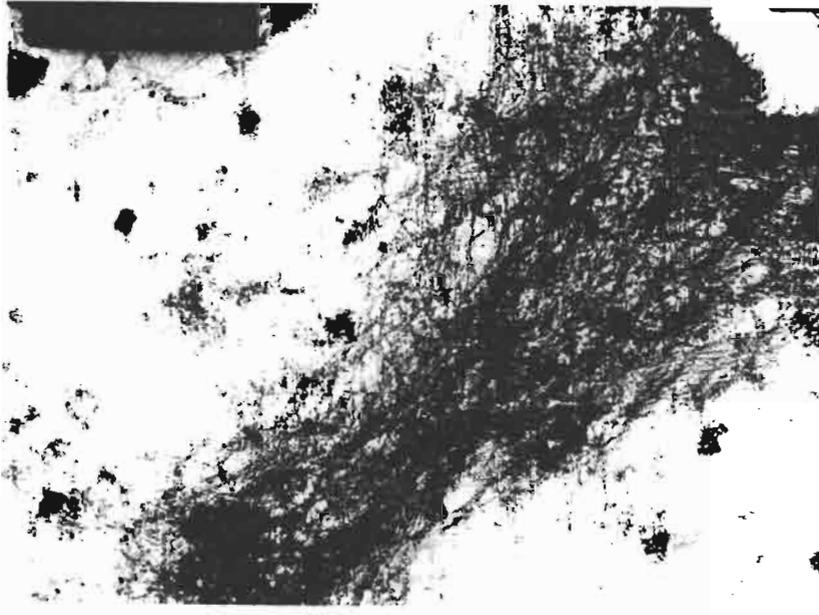


Diagrammes d'absorption dans l'infrarouge

PONCES POURRIES
 Echantillon E 319 = Ensenada
 Profondeur = plusieurs mètres

Cliché 7059 (TRICHET) E 384 c

Cliché 7061 (TRICHET) E 394 c



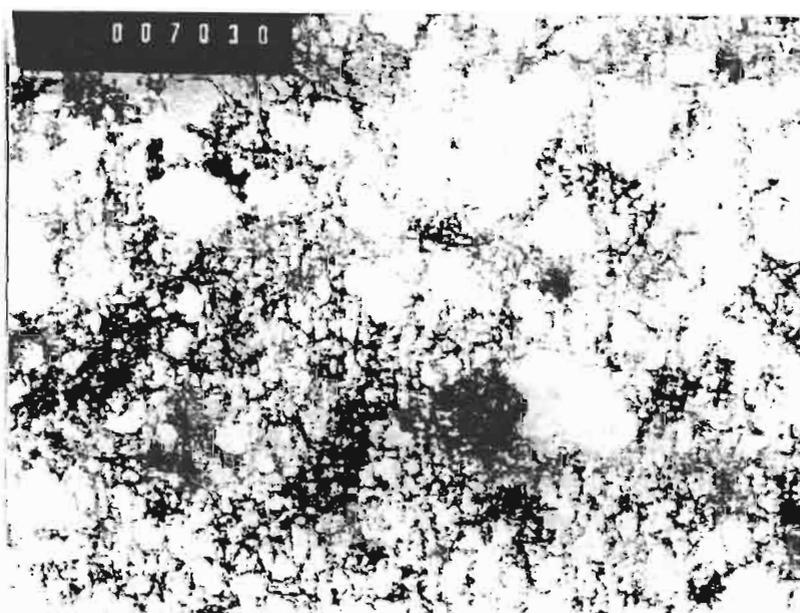
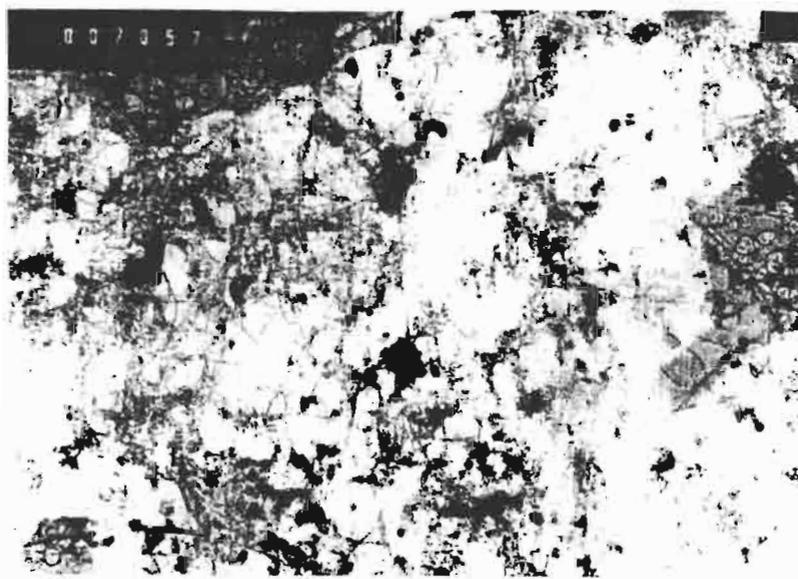
Cliches YOSHINAGE E 384 c et diffraction d'électron

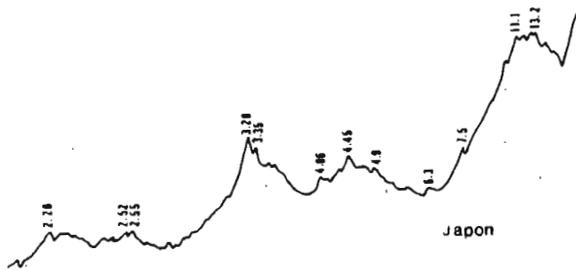


Cliché 7057 (TRICHET) E 346 c

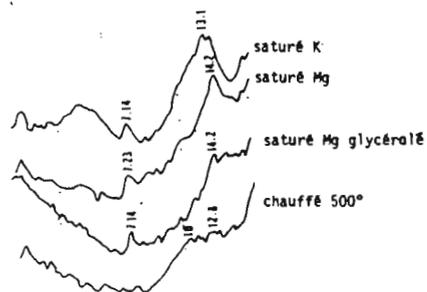
Cliché 7030 (TRICHET) E 319 c

Cliché YOSHINAGA





Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée



Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés après divers traitements

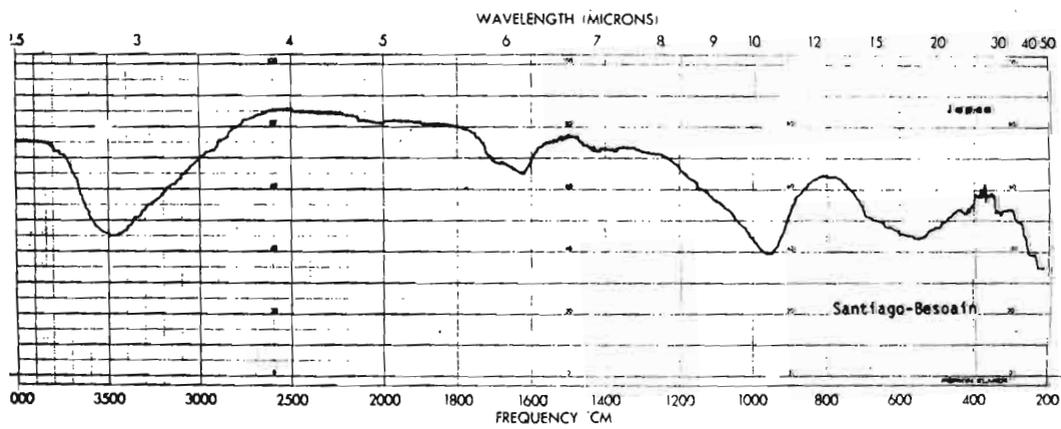
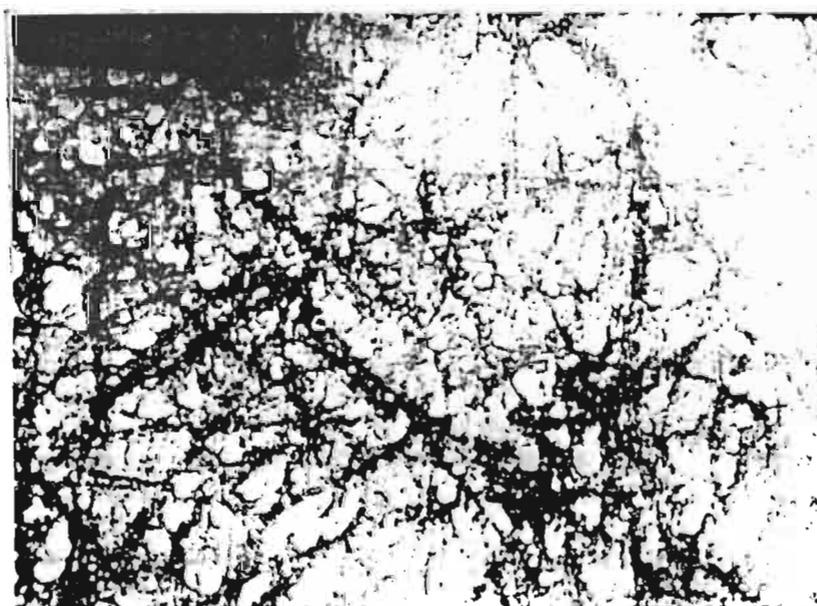
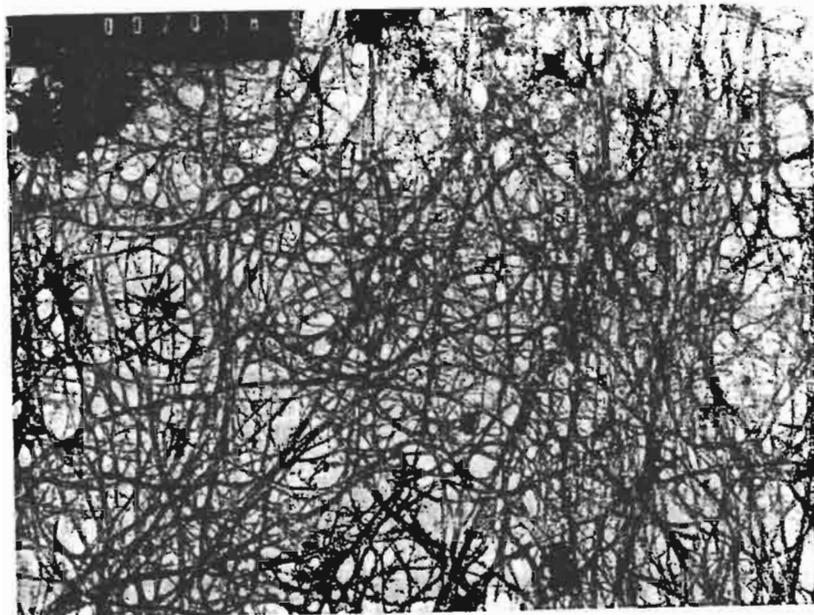


Diagramme d'absorption dans l'infra-rouge
 IMOGLITE DU JAPON
 (remis par Sieffermann)

Cliché 7018 (TRICHET) Imogolite du Japon

Cliché 7026 (TRICHET) égout de centrifugation de E chili



La présence d'allophane dans les sols semble en règle général liée à un milieu relativement bien drainé. Or c'est une particularité du Chili méridional de présenter de vastes étendues marécageuses de sols à allophane.

Ces sols dérivent des cendres qui ont recouvert les épandages fluvio-glaciaires de cailloutis consolidés, plus ou moins cimentés mais relativement perméables. Ces vastes étendues de cailloutis sont quasi planes ou en très légères pentes. Elles se présentent parfois en terrasses successives.

L'écoulement des eaux est très lent et les sols souvent engorgés. Beaucoup de ces régions étaient encore, il y a peu de temps, couvertes de forêts et certaines le sont encore.

MINERALOGIE DES SABLES

Les niadis sont situés dans le périmètre délimité par les transversales que nous avons étudiées : Volcan Osorno vers Rio Frio, et volcan Antillanca vers Osorno-ville.

L'hypersthène domine très largement.

Ce qui est intéressant à signaler c'est l'abondance des éléments lourds dans les horizons minéraux en comparaison des sols des plaines ondulées ou des collines voisines. La proportion par rapport aux sables totaux atteint 45 à 50%.

Il y a donc eu lors du ruissellement dans ces parties bien planes un triage avec dépôt préférentiel des particules les plus lourdes.

Il faut noter aussi dans les horizons organiques de surface, la grande abondance des verres mais peut-être s'agit-il de phytolithes.

PROFILS	Hypersthène	Pyroxène mono clinique	Olivine	hornblende	Epidote	ML%S	Minéraux légers
<u>E 313 Niadi Alerce</u>							
a	91	+	3	6	11		Verres très abondants-Phytolithes (raie à 4.04Å) trace zircon trace grenat
b	70	11	0	11	8	49%	
c	68	10	-	17	5	44%	
<u>Niadi Frutillar</u>							
E 307 - partie sud - horizon de profondeur seulement (entre Puerto Varas et Purranque)							
b	65	20	0	15		41%	
d	80	13	0	7		50%	
E 325 - partie nord-est de la ville d'Osorno							
a	61	26	4	9		1.2%	Verres très abondants, feldspaths
b	72	23	2	3	0	4.0%	
c	80	13	+	5	2	43%	
d	78	11	0	9	2	29%	

Composition des sables dans les niadis : minéraux lourds et légers.

MORPHOLOGIE

En surface, sur 20 à 30cm le sol est bien noir, chroma de 1 à 2, parfois 0, avec des teneurs en matières organiques de 25 à 40%. Le sol est donc parfois franchement tourbeux, spongieux et laisse filtrer l'eau lentement en profondeur.

La coloration s'éclaircit rapidement vers 50cm, où il y a encore 10 à 12% de matière organique, puis devient jaune, parfois un peu rougeâtre et onctueux, bien allophanique.

Juste au-dessus des cailloutis, vers 1m ou 1,5m de profondeur, il semble que l'échantillon prenne une structure granulaire due à des enrobements ferrugineux sur 4 à 5cm d'épaisseur.

Un mince liseré de croute brune ferrugineuse est observé en continuité dans les tranchées de route, à la limite du recouvrement de cendres et des cailloutis fluvioglaciaux. En période de pluie, les sols sont gorgés d'eau et il ne nous a pas été possible d'observer dans les profils que nous avons examinés, si cette croute tapisait les cailloutis en recouvrement uniforme et imperméable. Il est probable qu'il y a des discontinuités rendant possible un lent écoulement de l'eau dans les cailloutis.

PROPRIETES

On retrouve dans ces sols toutes les caractéristiques des sols à allophane perhydratés :

Il y a une forte hydratation du sol avec une très nette dessiccation irréversible à l'air. La densité apparente est voisine de 0.5.

La capacité totale d'échange de cation est très forte mesurée sur sol humide (100 mé p. 100) et s'accroît de plus du double si on opère à pH9 au lieu de pH4.

E 313 - CAPACITE TOTALE D'ECHANGE DE CATIONS A DIVERS pH : SOL CONSERVE HUMIDE OU SECHE A L'AIR											
Acétate d'ammonium - Normal - Détermination sur l'équivalent de 2gr de sol séché étuve - Résultats en mé. pour 100gr de sol sec étuve.											
<u>Niadi Alerce</u>		sol conservé humide					sol séché à l'air				
Profondeur		pH4	pH7	pH9	M.O. %	pF3	pH4	pH7	pH9	pF3	
a	7 - 25	53.5	81.1	96.9	43%	180	40.7	64.8	96	64	
b	30 - 50	52.9	81.3	103.1	18%	126	41.1	66.1	108	55	
<u>Niadi Frutillar</u>											
45 - 65								33	44	66	

Elle est plus faible sur sol séché à l'air que sur sol humide sauf à pH9 comme c'est le cas avec la plupart des sols à allophane riches en matières organiques.

L'état de saturation en bases est très faible et les pH lorsqu'ils sont mesurés dans le chlorure de potassium sont souvent plus élevés que dans l'eau.

Dans les horizons de surface ayant 20 à 25% de matière organique, la proportion des AH et AF sont voisines. Il y a davantage d'AH dans les horizons tourbeux qui sont les seuls à ne pas réagir vivement au test FNa. En profondeur, par contre, il y a dans tous les cas, prépondérance des AF sur les AH, parfois dans le rapport de 10 à 1.

MINÉRALOGIE DES ARGILES - CAPACITÉ D'ÉCHANGENiadi Alerce : E 313

Les rayons X indiquent dans l'horizon de surface et seulement dans l'horizon de surface très organique (43% de M.O.) l'abondance de la cristobalite opale. Il s'agit probablement de phytolithes.

Plus en profondeur il y aurait essentiellement des substances amorphes. On remarque la présence d'une raie à 14 Å qui demeure inchangée après défférication, saturation en K ou Mg et glycérolage et passerait à 11.4 Å à 500°C. La gibbsite paraît un peu plus importante en profondeur. Toutes ces raies sont peu prononcées.

L'analyse thermique différentielle confirme la présence de petites quantités d'argiles cristallines (crochet à 470°) et de gibbsite (crochet à 320°).

L'absorption dans l'infrarouge montre bien qu'il s'agit de substances allophaniques.

Dans l'horizon minéral situé à la base de l'horizon organique de surface le maximum d'absorption est observé à 970 cm^{-1} . Il passe à 1.000 cm^{-1} dans les horizons plus profonds avec encore un très large renflement à 970 cm^{-1} .

L'absorption à 1.725 cm^{-1} et à 1.440 cm^{-1} est nettement plus importante en profondeur qu'en surface, contrairement à ce que l'on observe d'habitude dans les sols à allophane. Ces deux bandes doivent-elles être attribuées aux acides fulviques dont la proportion par rapport aux acides humiques est bien plus élevée en profondeur $AF/AH = 7/1$ que plus en surface $AF/AH \neq 2.5$ juste sous l'horizon organique qui lui renferme deux fois plus d'AH que d'AF. Il est possible que la fixation des AF sur les substances allophaniques soit beaucoup plus importante ainsi que dans l'horizon de surface, cette association ayant bien résisté aux attaques eau oxygénée.

Le microscope électronique montre des substances amorphes rétractées avec quelques particules primaires, quelques fibres

Niadi Frutillar : E 307 et E 325

Les diagrammes de rayons X sont analogues à ceux du Niadi Alerce. Dans deux profils on observe un peu de gibbsite et de goéthite à la base inférieure du recouvrement de cendres, près des cailloutis fluvio-glaciaires. La goéthite est rare dans les sols à allophane sauf dans les croutes ferrugineuses des horizons laciques, ce qui est le cas à ce niveau de contact.

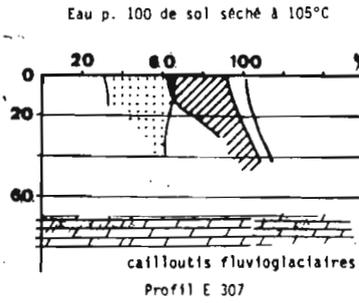
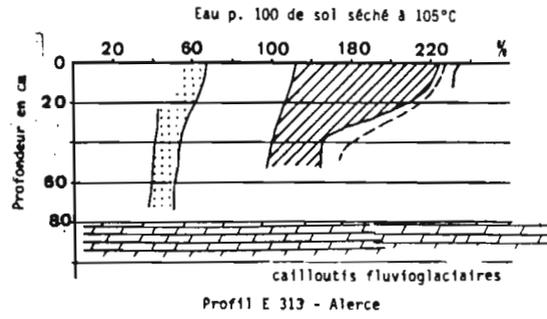
L'absorption dans l'infrarouge révèle un maximum à 1.725 cm^{-1} et une bande importante à 1.440 cm^{-1} sans doute attribuables aux AF fixés sur l'allophane. Les AF dans cet horizon sont dix fois plus importants que les AH. L'importance des bandes à 2.850 cm^{-1} et 1.280 cm^{-1} est peut être aussi attribuable à la présence de ces substances organiques.

L'absorption est maximum à 950 cm^{-1} montrant ainsi l'abondance des Al^{IV} mais elle est également très forte à 1.100 cm^{-1} pour une raison incertaine (silice amorphe ??). On doit d'ailleurs remarquer la capacité du sol à reprendre l'eau après dessiccation à l'air en quantité plus importante que dans les sols à allophanes classiques, ce qui témoigne d'une certaine organisation du réseau allophanique.

CONCLUSION

Nous n'avons pas voulu nous étendre sur ces sols de niadis très particuliers, et dont nous n'avons pas rencontré d'exemples similaires en régions tropicales. Il était cependant intéressant de signaler leur existence dans des conditions que certains auraient estimé incompatibles avec la présence d'allophane.

En fait il semble que dans ces sols il y ait un certain soutirage de l'eau par les cailloutis glaciaires mais que l'infiltration dans les horizons supérieurs, très lente, le manque d'écoulement latéral entraîne une certaine stagnation des eaux en période pluvieuse.

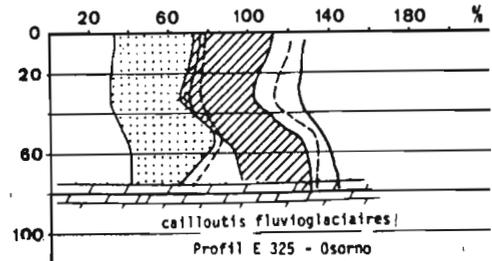


LEGENDE

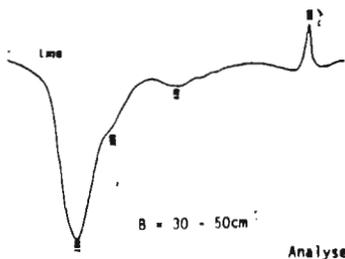
ordonnées : Profondeur du sol en cm
abscisse : Eau p. 100 de sol séché à 105° C

Différences entre l'humidité à pf 3 et celle à pf 4,2

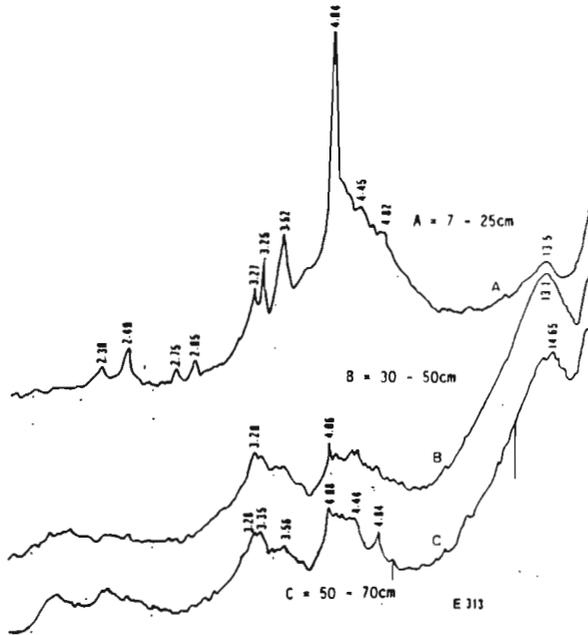
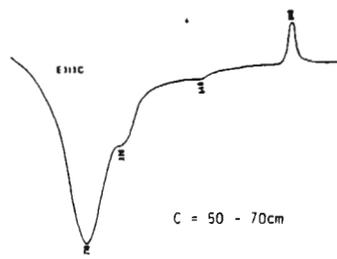
- déterminée sur échantillon préalablement séché à l'air
- déterminé sur échantillon conservé humide
- valeur de l'humidité à pf 2,5
- Eau naturelle au moment du prélèvement de sol



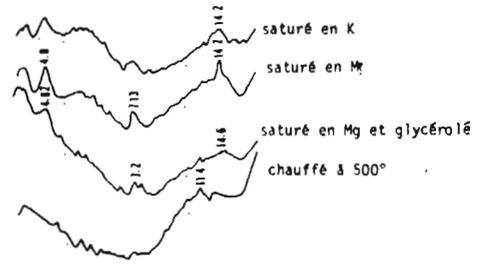
RETENTION EN EAU DES SOLS A ALLOPHANE A DIVERS pf
 sols conservés humides ou préalablement séchés à l'air
 SOLS DE NADI
 Sols de marécages sur les épandages caillouteux fluvio-glaciaires



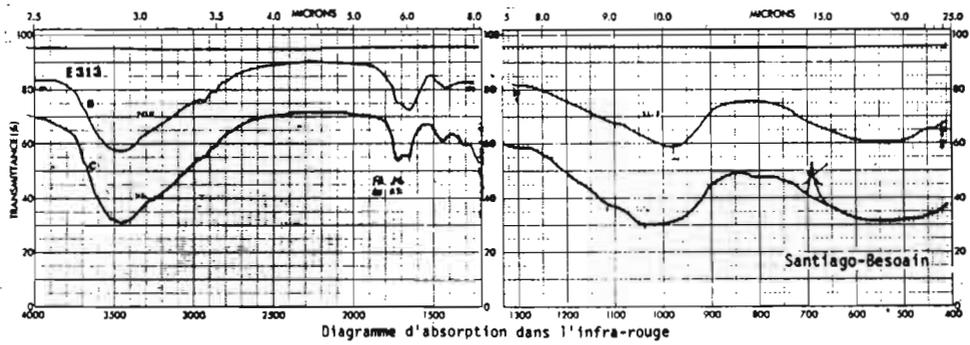
Analyses thermiques différentielles



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée



Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés après divers traitements



SOL A ALLOPHANE DE NADIS (marécages)
Profil E 313 - Niadi Alerce
a = 7 - 25cm b = 30 - 50cm c = 50 - 70cm

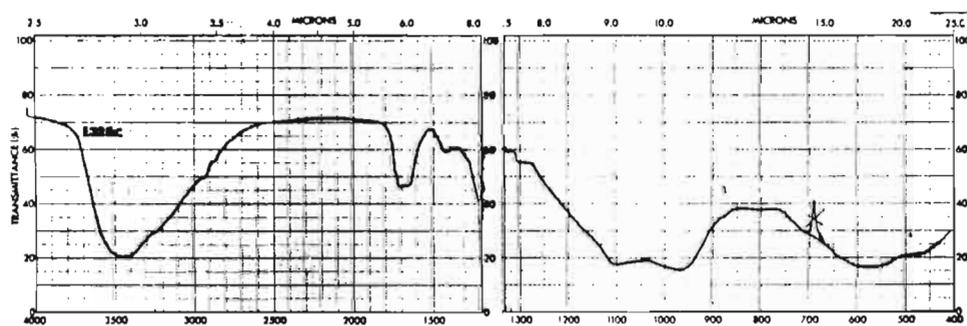
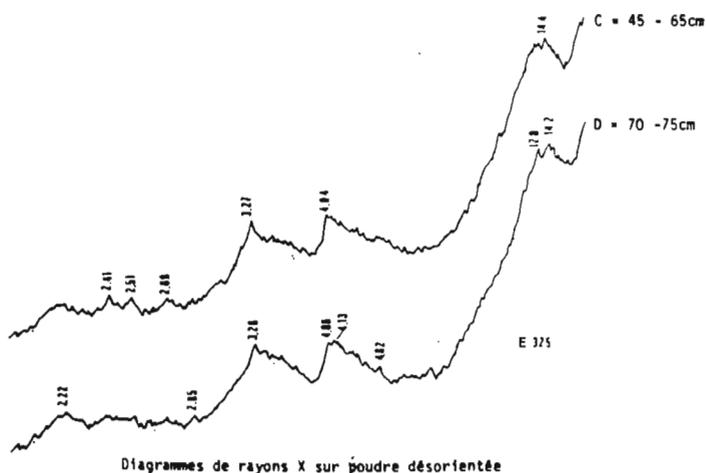
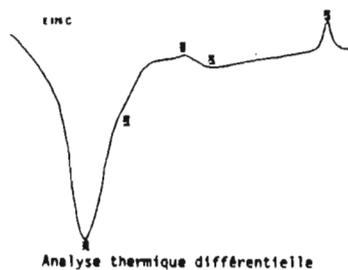
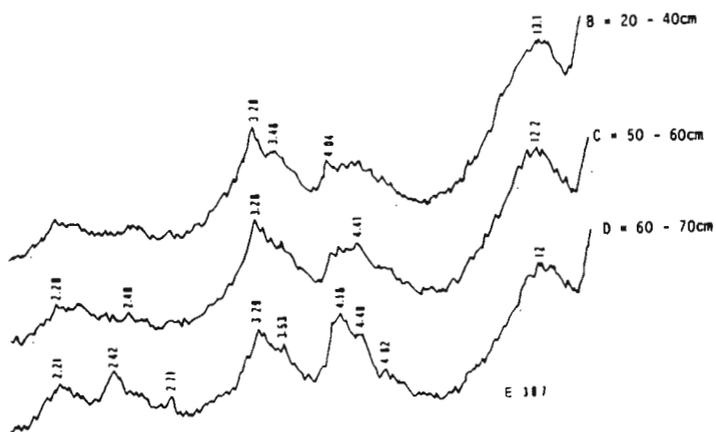


Diagramme d'absorption dans l'infrarouge

SOL A ALLOPHANE DE NADI
 Profil E 325 - Nadi Osorno
 a = 0 - 20 b = 25 - 45 c = 45 - 65
 d = 70 - 75
 à 75cm = cailloutis fluvioglaciers



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

SOL A ALLOPHANE DE NADI (marécages)

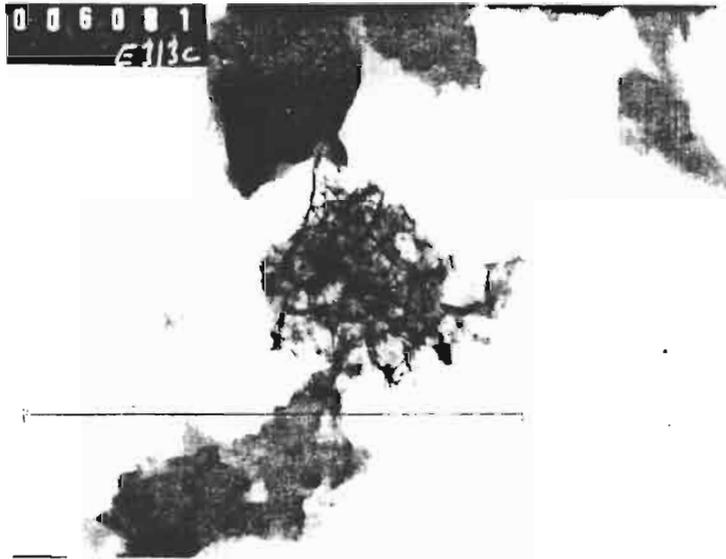
Profil E 307 - Frutillar

a = 0 - 20 b = 20 - 40 c = 50 - 60

d = 60 - 70cm

Cliché 6081

Cliché 6081 E 313 c



On les rencontre au-delà des dépôts de cendres en s'éloignant vers l'Ouest de la Cordillère des Andes.

Dans la zone de transition le recouvrement de cendre ayant donné des sols limono sableux est fréquemment visible sur 10 à 20 cm d'épaisseur dans les replats, les parties concaves protégées du ruissellement.

En se rapprochant de la Cordillère, le dépôt supérieur de cendres allophanisé augmente l'épaisseur (cf profil E 412) 60 à 80 cm. Puis les sols rouges disparaissent vraisemblablement découpés par les glaciers du quaternaire. Les dépôts de cendres allophanisés reposent alors directement sur les moraines ou les nappes de charriages fluvio-glaciaires.

Les sols sont rougeâtres 2,5 YR à 5 YR argileux, compacts, très durs, lorsqu'ils sont secs, un peu gras sous la main quoique peu adhérent. Il semble, suivant les cas que les revêtements soient bien nets ou peu visibles.

Les pF mesurés sur sol conservé humide (lorsque c'est possible) ou sur sol séché à l'air sont les mêmes. La réaction au test fluorure de sodium est nulle ou très lente.

Ces sols rouges conservent beaucoup moins fortement l'eau que les sols à allophane. Il sont difficiles à travailler en période d'humidité, fin de l'hiver, et se dessèchent rapidement en été.

Les sols sont acides (pH 5) avec des teneurs en bases échangeables modérées de 6 à 10 mé p.100. La capacité totale d'échange varie peu ou pas du tout avec le pH.

Capacité d'échange de cations à divers pH : mép.100 de sol				
	pH 4	pH 7	pH 9	
E 387 c	30	28	28	Collipuli
E 390 b	20	23,7	25	Padre Las Casas

L'argile est constituée d'un mélange de métahalloysite et de fire-clay. La raie à 4,45 Å sur spectre de poudre est très prononcée, de même que les raies à 3,56 et 7,2. Elle diminue d'intensité, en comparaison avec ces deux dernières raies sur échantillon orienté. Il y aurait de la goethite et un peu de gibbsite.

Ce sont des ferrisols et pour la plupart des ultisols.

SOLS BRUN-ROUILLE À HALLOYSITE

Sous les tropiques les sols brun-rouille à halloysite sont très aisés à caractériser. Ils dérivent des cendres volcaniques dans les régions où les sols sont soumis à des alternances d'humidité et de dessiccation plus ou moins prononcées. Ces conditions paraissent propices à la formation de l'halloysite alors que les sols de même âge en régions toujours humides sont souvent encore allophaniques.

Ils peuvent résulter aussi d'un vieillissement de certains sols à allophanes avec apparition progressive de l'halloysite dans le profil.

Nous n'avons observé ces sols brun-rouille qu'entre la cordillère côtière et la côte, donc bien au-delà de l'avancée des glaciers du quaternaire. Nous nous sommes essentiellement, au cours de cette mission, concentrés sur les sols à allophane. Il est donc possible que ces sols existent entre les deux cordillères et que leur présence nous ait échappée jusqu'ici.

1) FACIES EVOLUÉ, BIEN ARGILEUX - E 407 - ALFISOL

Le sol a été observé à Canête près du littoral Pacifique.

Le sol est argilo-limoneux de couleur brun-rouille foncée, avec des revêtements très nets. La couleur du sol écrasé est beaucoup plus claire.

Vers 60 cm à 100 cm de profondeur, il y a de très abondants revêtements ferro-manganiques noirâtres et des concrétions noires. Puis c'est la cendre dure à hyperstène, hornblende, épidote, sans doute un dépôt plus dur à l'origine.

Les rayons X montrent avec évidence la présence d'halloysite. Il y a affaissement de la bande à 10 Å par chauffage à 100° et renforcement de la raie à 7,3 Å. La raie à 4,45 Å est très forte. La goéthite est peu visible ou absente comme dans les sols similaires des tropiques. Les minéraux primaires peu altérés sont encore abondants.

2) FACIES LEGER DE TRANSITION ALLOPHANIQUE 408

Certains faciès, dans la même région, paraissent moins évolués et forment transition entre les sols à allophane et les sols argileux à halloysite. Le sol est limono-argileux en surface, puis davantage limoneux en profondeur jusqu'à 1 m avec une légère sensation d'argile au toucher. Les revêtements foncés sont abondants et le sol écrasé est de couleur nettement plus claire.

Les différences entre pF, mesurés sur sols conservées humides ou préalablement séché à l'air, sont nulles en surface, mais notables en profondeur. Dans les horizons profonds la capacité d'échange varie avec le pH et la réaction au test fluorure de sodium est assez prononcée.

Capacité d'échange de cations à divers pH : mé p.100 de sol			
	pH 4	pH 7	pH 9
prof.	25,4	33,3	42,9

Bien que la sensation d'argile au toucher soit peu apparente dans l'horizon de profondeur, la raie à 4,45 Å est très marquée. Les raies à 7 et 10 sont peu prononcées. Il y aurait un minéral à 14 Å. L'existence de gibbsite est à vérifier par l'ATD.

Le sol forme donc transition entre les sols à allophane et les sols à halloysite. C'est un alfisol.

SOLS À HORIZON OXIC = OXISOLS = SOLS FERRALLITIQUES FRIABLES

On les remarque sur les flancs très arrosés et ennuagés de la cordillère côtière, face au Pacifique et sur les piedmonts de cette cordillère, ils sont parfois cultivés, mais surtout plantés en pins.

Ces sols dérivent vraisemblablement de dépôts de cendres qui ont recouvert sur une forte épaisseur les formations anciennes altérées précambriennes. Il s'agirait de cendres très anciennes, très antérieures aux glaciations.

Les sols sont rouges, très uniformes sur 4 à 5 m d'épaisseur, de structure d'ensemble continue. Bien que pétri entre les doigts le sol paraisse à l'état humide, très argileux, ils sont extrêmement friables. Les blocs éclatent dans les doigts en pseudo-sables sans agrégats de taille intermédiaire.

Les talus de route demeurent verticaux sans éboulement, indice de l'absence de gonflement et d'une grande stabilité des agrégats.

L'argile serait constitué d'un mélange de métahalloysite et de fire-clay. La raie à 4,45 Å est très importante et plus forte que la raie à 7,3 dans le diagramme de poudre. Sur échantillon orienté il y a une nette décroissance de la raie à 4,45 par rapport aux raies à 7,3 et 4,86 Å ce qui indiquerait la présence notable d'argiles orientables du type fire-clay.

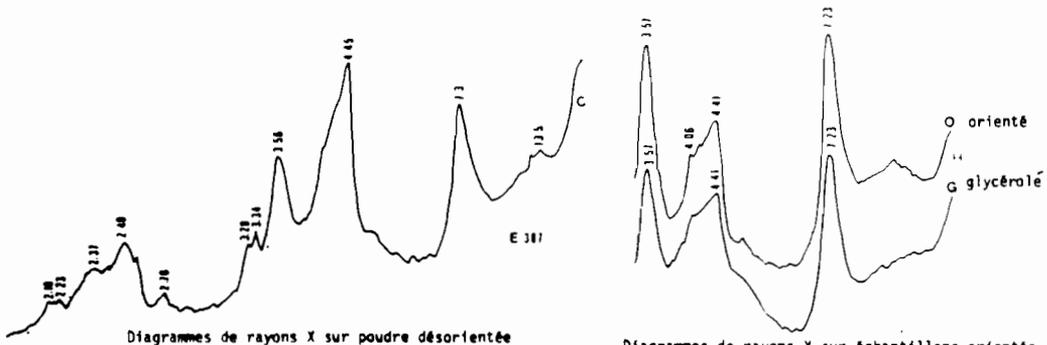
La gibbsite est abondante, et la goéthite est présente en quantité modérée. Par saturation en K, Mg, glycérolage, la raie à 14 Å qui se dédouble à 11 et 14 Å est peu modifiée. Elle passe à 10,5 très nettement à 500°. Il y aurait sans doute une vermiculite alumineuse.

Les pF mesurés sur sol conservé humide ou préalablement séché à l'air sont les mêmes. Un pF 3 de 40% indiquerait un très fort pourcentage d'argile, près de 100% d'argile de type kaolinique.

Le sol est désaturé avec moins de 3 mé % de base échangeable et des pH eau voisins de 5,2 plus faibles dans le KCl.

La capacité d'échange varie peu avec le pH (25 mé) et est un peu trop élevée pour que ces sols puissent être rangés parmi les oxisols typiques bien que la morphologie de l'horizon oxic soit très évidente.

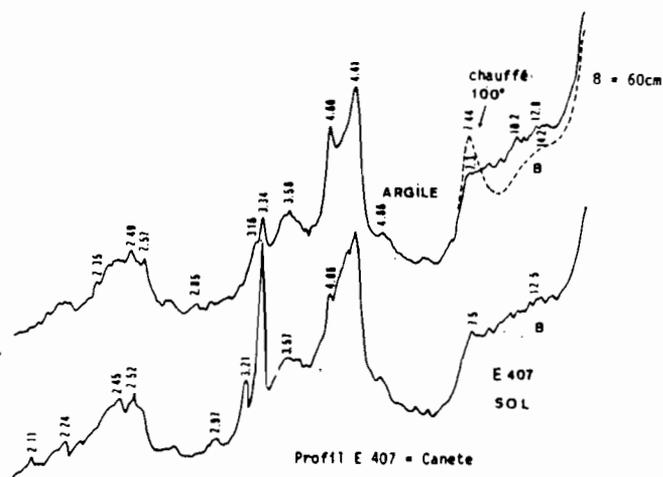
Il s'agirait de dystropeptic haplorthox.



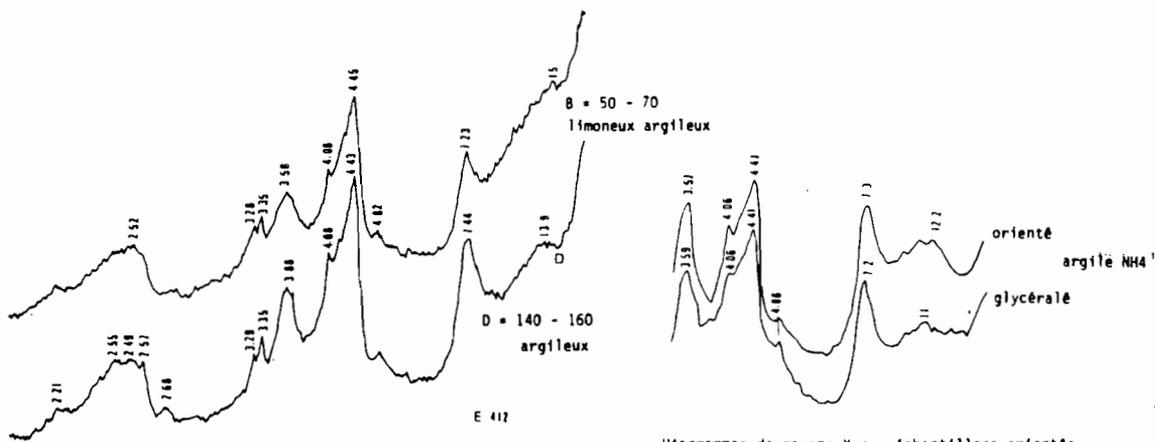
Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés

Profil E 387 = Collipull
a = 0 - 20 b = 40 - 70 c = 70 - 100



Profil E 407 = Canete



Diagrammes de rayons X sur poudre désorientée

Diagrammes de rayons X sur échantillons orientés

Profil E 412 - Yungay
a = 0 - 20 b = 50 - 70 d = 140 - 160
SOLS ARGILEUX A HALLOYSITE

C O N C L U S I O N

I - ANALOGIES AVEC LES SOLS A ALLOPHANE DES TROPIQUES

On retrouve donc au CHILI, des sols à allophane très semblables par leurs propriétés et par leur évolution en fonction du temps et des données climatiques, essentiellement les variations de la pluviométrie à ceux que nous avons déjà étudiés dans les régions tropicales des ANTILLES, d'EQUATEUR, du COSTA RICA, NICARAGUA, COLOMBIE.

On peut établir les mêmes distinctions entre les sols allophane fortement hydratés ceux à faible dessiccation temporaire de surface et ceux en régions plus sèches, qui sont modérément hydratés. La comparaison des pF mesurés sur sols conservés humides ou préalablement séchés à l'air, permet cette distinction et il y a de très bonnes relations avec la minéralogie et les propriétés d'ensemble de ces sols.

Relation : minéralogie des fractions très fines et caractéristiques hydriques.

1) Les propriétés hydriques de rétention pour l'eau sont essentielles.

a) On remarque dans les sols à allophane fortement hydratés à humidité permanente du Sud, l'effondrement irréversible du réseau après dessiccation à l'air. Le sol est incapable de reprendre de l'eau après avoir été desséché et les valeurs de l'eau dite "utilisable" sont alors très faibles, mesurées sur sol séché air.

b) Par contre, dans les allophanes, disons un peu mieux organisés du Centre et du Nord, le sol retient beaucoup moins d'eau à l'état naturel, mais il est capable d'en réabsorber la majeure partie et de la retenir après séchage à l'air à pF 3. L'eau dite "utilisable" sur sol séché air est plus importante.

Cette relation entre la minéralogie des fractions fines et les propriétés hydriques est particulièrement suggestive pour les horizons de ponces pourries, riches en minéral fibreux du type "imogolite". Ces ponces pourries sont aussi hydratées que les sols fortement allophaniques du Sud : elles retiennent moins bien cette eau au pF 4,2 mesuré sur sol conservé humide, mais elles sont capables d'en réabsorber beaucoup plus que ces derniers, après dessiccation préalable à l'air. C'est le comportement d'un minéral fibreux à microporosité interne plus grosse?

Ces propriétés sont également bien observées dans certains sols d'EQUATEUR et des ANTILLES qui ont bien l'apparence de sols à allophane, mais sont en fait, constitués d'halloysite jeune hydratée, avec de très belles raies à 10 Å.

a) Les sols fortement hydratés : hydrandepts

Dans les sols à allophane fortement hydratés, on remarque, comme sous les tropiques, la dominance des Al^{IV} correspondant à une forte absorption dans l'infra-rouge à 950 cm^{-1} , du moins dans les sols sans gibbsite. Cette absorption est parfois un peu plus marquée dans la fraction très fine de l'argile que dans la fraction grossière où elle peut dépasser 1000 cm^{-1} . Dans beaucoup de sols il n'y a pas de différence entre les fractions fines et grossières, comme c'est le cas avec bien des hydrandepts des tropiques. L'ensemble est donc constitué d'allophane riche en Al^{IV} . C'est aussi le cas des ponces pourries à allophane et imogolite.

On remarque deux maximum d'absorption dans la bande H_2O à 1650 et 1725 cm^{-1} ce dernier probablement dû aux substances humiques qui sont restées fixées sur l'allophane, en dépit des attaques H_2O_2 . Cette fixation serait particulièrement importante dans la fraction très fine de l'argile souvent plus allophanique, plus riche en Al^{IV} .

On observe au microscope électronique le même aspect amorphe rétracté que dans les sols des tropiques et dans certains échantillons, des fibres analogues à l'imogolite. Il y a la même difficulté pour identifier le minéral à 14 Å dont la raie demeure inchangée après saturation en K, Mg, glycérolage et souvent chauffage à 150° - 200° - 250°. Cette raie disparaît ou passe à 11 - 12 Å à 500°. Toutefois, les déterminations de rayons X ont été effectuées sur les échantillons chauffés, puis refroidis. Il est possible que, pour la détermination de l'imogolite, le passage à 18-20 Å de la raie 14 Å aurait pu être observé si les échantillons avaient été conservés chauds dans le goniomètre.

b) Les sols modérément hydratés

Dans les sols à allophane modérément hydratés, soumis à des dessiccations temporaires, au moins en surface et parfois sur l'ensemble du profil, le maximum d'absorption dans l'infra-rouge est généralement situé au-dessus de 1000 cm-1, avec des renflements à 950 et 1100 cm-1. Le maximum dans certains sols peut descendre en dessous de 1000 cm-1 mais seulement dans la fraction très fine de l'argile. Quelques différenciations apparaissent dans les bandes hautes et basses fréquences.

Aux rayons X, la raie à 4,45 Å est déjà visible, surtout en profondeur dans les dépôts plus anciens, où la composition minéralogique des sables est souvent distincte. La raie à 10 Å est visible dans les horizons de profondeur, mais jamais avec autant d'intensité que dans les sols similaires des ANTILLES.

Les glomérules et les tubes d'hallowysite sont pourtant bien nets.

Les teneurs en bases échangeables sont un peu plus élevées, mais sont loin d'atteindre 50% de la capacité d'échange, même lorsque celle-ci est déterminée au pH 4.

c) Les sols à gibbsite

La gibbsite est présente dans les formations plus anciennes et les teneurs s'accroissent généralement en profondeur. On la trouve dans les sols modérément ou fortement hydratés, mais c'est seulement, comme aux ANTILLES, dans les régions très humides, que la proposition peut être très importante (régions très humides de CHILOE, cordillère côtière de VALDIVIA).

II - DIFFERENCES AVEC LES SOLS DES TROPIQUES

Quelques différences notables apparaissent entre les sols à allophane du CHILI et ceux des tropiques :

a) Morphologie - couleur

Les sols fortement hydratés sont moins onctueux, plus finement friables, et ne présentent pas avec autant d'évidence cette cohésion allophanique des hydrandeps des tropiques, qui est si caractéristique (ponces pourries exceptées).

Les sols sont, en général, plus noirs que ceux des régions chaudes tropicales, mais les chroma atteignent rarement 0 ou 1. L'horizon de coloration foncée est plus profond, plus épais que sous les tropiques. Les chroma très noirs ne s'observent que dans les sols du niadi, ou dans certains recouvrements de cendres récentes sur des formations anciennes moins perméables, donc en conditions d'hydromorphie temporaire. Les sols ne sont jamais aussi noirs que les sols situés à plus de 3000m d'altitude d'Equateur. Les teneurs en matières organiques sont, en général, plus importantes que dans les régions chaudes tropicales, mais les différences ne sont pas considérables. Certains sols d'altitude ou des régions chaudes très humides des tropiques présentent des teneurs équivalentes. On constate la même dominance des AF en régions très humides et des AH en régions plus sèches, avec souvent accroissement des AF en profondeur.

b) Les faciès de l'halloysite

Sous les tropiques les sols argileux ou limoneux dérivés de cendres présentent souvent la belle raie à 10 Å de l'halloysite. Cette raie est particulièrement intense et effilée dans certains sols qui forment transition entre les sols à allophane (dystrandept) et les sols à halloysite limoneux (molli-sols) et présentent quelques aspects et propriétés des sols à allophane.

Au CHILI, l'apparition de l'halloysite est très nette dans certains sols, soit dans l'ensemble du profil, en régions modérément arrosées, soit en profondeur seulement dans les dépôts anciens recouverts par des cendres plus récentes. La raie à 4,45 Å est alors bien marquée sans pour autant que la raie à 10 Å soit particulièrement nette ou forte.

Il semble donc que certains facteurs au CHILI freinent l'apparition de cette halloysite jeune à 10 Å que l'on observe de manière souvent si spectaculaire sous les tropiques. C'est ce qu'avait déjà signalé BESOAIN (1969) qui indiquait surtout la présence de métahalloysite.

Cette "résistance" de l'allophane, cette persistance, dans des régions où l'on aurait cru pouvoir trouver l'halloysite jeune, est-elle attribuable à une nature de la matière organique différente sous climats tempérés, de celle des tropiques? La composition des acides fulviques, en particulier, serait à étudier. L'abondance de la matière organique et la faible teneur en bases échangeables, accentuée davantage que sous les tropiques, le caractère acide des sols.

Il est curieux de remarquer que dans les fractions inférieures à 2 microns des sols à allophane du CHILI, les raies des particules primaires sont rarement aussi marquées que dans les sols des tropiques, sauf pour certains sols encore très jeunes et sableux sur les flancs des volcans (OSORNO, TOGUALCA, CHILLAN) or, tous ces échantillons du CHILI ont été traités de la même manière, très exactement, que ceux d'EQUATEUR et des ANTILLES. Il est donc possible de penser que les très fines particules primaires ont disparu par altération, dans les sols du CHILI, et que seules subsistent encore les particules plus grossières et plus résistantes des limons et des sables. Les fractions légères des horizons les plus anciens ne renferment plus parfois que des quartz et très peu de feldspaths.

Sous les tropiques l'apparition de l'allophane et des diverses formes d'halloysite 10 Å est probablement beaucoup plus rapide qu'au CHILI, ce qui explique que l'on puisse trouver des sols qui renferment, soit seulement de l'allophane, et c'est aussi le cas des sols à allophane perhydratés du Sud du CHILI, soit des sols qui contiennent aussi une importante proportion d'halloysite jeune hydratée à 10 Å et enfin des sols à halloysite- métahalloysite plus anciens.

Si au CHILI comme nous le supposons, ces transformations sont beaucoup plus lentes et étalées dans le temps, l'halloysite jeune hydratée à 10 Å en admettant qu'elle se forme aussi, n'existerait qu'en petite quantité, son apparition lente étant suivie de la transformation progressive en métahalloysite. Cette phase intermédiaire, instable, à halloysite jeune 10 Å serait difficilement observable. On aurait pu s'attendre à en trouver dans la série des sols SANTA BARBARA, mais le caractère allophanique de ceux-ci est encore trop marqué, quoique la différenciation soit sensible avec les sols du Sud moins bien organisés.

Il semble que sous les tropiques les phases, soit allophaniques, soit halloysitiques, soient mieux séparées qu'au CHILI, sans doute par suite de variations pluviométriques dans l'espace plus tranchées, d'alternances de dessications et d'humidité très fréquentes au cours de l'année et plus prononcées qu'au CHILI dues à l'intensité de l'évapotranspiration, de l'absence d'une saison froide humide hivernale durant laquelle ces alternances d'humidité et de dessication sont très réduites ou inexistantes.

Mélange d'argile :

Au CHILI, les sols à allophane des régions modérément arrosées ou issus de formations relativement anciennes en climat à alternance de saisons humides et sèches, il semble que l'on ait souvent affaire à un mélange d'allophane, imogolite, halloysite, métahalloysite et d'argiles à 14 Å mal définies. Cette raie à 14 Å peut d'ailleurs parfois correspondre à l'imogolite.

Il semble que les mélanges d'argiles soient fréquents également dans les régions tempérées du JAPON. L'étude "du degré d'organisation relative" de l'allophane est alors plus difficile. Il n'est pas sûr en effet que ce qui apparaît comme un mélange ne corresponde pas dans certains sols à une meilleure organisation d'ensemble des substances allophaniques.

C'est par l'étude des caractéristiques hydriques (pF sur sol humide et sur sol préalablement séché air, complètement ou jusqu'à certains paliers d'humidité, des échanges de cations et d'anions, et peut-être des formes des matières humiques?) que nous apprécierons les liaisons entre la constitution des sols et leurs caractéristiques physico-chimique.

C'est ainsi que la présence ou l'absence de gibbsite est un critère de distinction en liaison avec la fixation du phosphore, qui est très importante dans les allophanes à hauts rapports Al/Si.

SOLS ARGILEUX A HALLOYSITE

Entre les sols rouges bien argileux à métahalloysite fire-clay et les sols à allophane plus ou moins organisés, on ne rencontre pas toute la série des sols brun-rouille à halloysite des tropiques, qui vont depuis mollisols pour les plus jeunes jusqu'aux alfisols pour les plus évolués.

Entre ces deux grands ensembles de sols qui correspondent à des périodes de temps bien distinctes y-a-t-il eu une longue époque sans dépôts de cendres.

On peut imaginer que les cendres ont été décapées durant l'avancée des glaciers, seuls les sols rouges situés au-delà de cette avancée ayant été épargnés. Cette hypothèse expliquerait l'absence de toute une gamme de sols que l'on aurait pu s'attendre à rencontrer.

Le fait que c'est seulement dans la région côtière de CANETE, épargnée par les glaciers, entre la cordillère côtière et le Pacifique renforce cette hypothèse que nous avons pu observer de vrais sols brun-rouille à halloysite comme sous les tropiques.

OXISOLS

Sur les flancs de la cordillère, très arrosée, on observe d'épais sols rouges ferralitiques, à pseudo-sables, qui dérivent vraisemblablement d'un dépôt de cendres de 2 à 3 m d'épaisseur. Ces cendres sont certainement très antérieures aux glaciations. Doit-on penser que la présence de ces sols ferralitiques ou oxisols, implique un climat jadis plus chaud, ou que seul le temps, dans des matériaux riches en fer et perméables comme les cendres, peut expliquer la formation de tels sols en climat tempéré très humide.

3ème Edition de Novembre 1978

(2ème version de Mai 1974 avec quelques illustrations et des compléments; et une nouvelle mise en page). — PUBLICATION n° 85 bis de l'ORSTOM-ANTILLES

METHODES D'ANALYSES

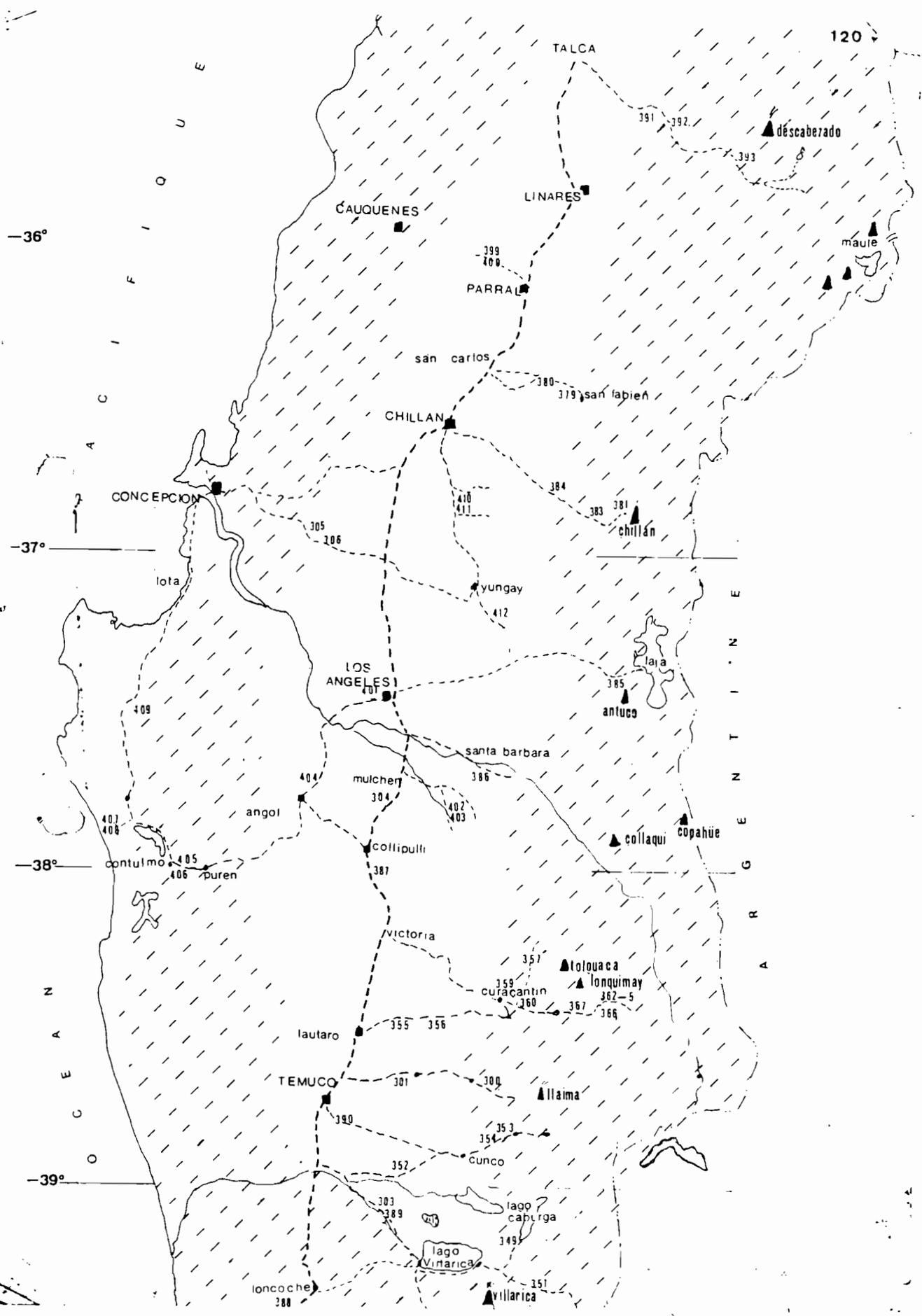
- Test fluorure de sodium : ---- Instantané, coloration intense en moins de 15"
 - Coloration intense en moins de 30"
 - Coloration modérée en une minute
 - Faible couleur après 2 minutes environ
 - 0 Rien après plusieurs minutes.
- Matière organique : Méthode Ann bichomate à ébullition 5 minutes
Méthode par combustion au Coulomètre - Les résultats sont voisins de la méthode par voie humide, un peu plus forts.
- Azote : Par Kejdhall
- Densité apparente : cylindre de 100cc au champs. Poids sec étuve 105°
- Cations échangeables : par acétate d'ammonium Neutre Normal sur sol humide ou sec en mé p. 100 sol séc étuve.
- pH : Rapport eau/sol = 2,5 environ, sur sol ramené par calcul en poids sec air effectué sur sol conservé humide.
- pF : sur sol conservé humide ou séché à l'air durant plusieurs mois aux Antilles.
- Acides humiques et fulviques par
- P205 Truog, acide N/500
- Capacité totale d'échange de cations : sur équivalent de 2gr de sol sec. Effectué sur sol conservé humide ou séché plusieurs mois à l'air. Ac NH₄ Normal aux pH indiqués, lavage alcool, extraction KCl, distillation NH₄ à la centrifugeuse avec remise en suspension des culots au vortex.
- Extraction des argiles : sur sol humide, attaque H₂O₂ à froid, ultra-sons, dispersion H ou NH₄, décantation, centrifugation à la Sharpless, 40 000 tours durant minutes, buse de mm.
- Séparation dans le tube de centrifugation :
 - Egoût de centrifugation, quand trouble, pour, remise en suspension et microscopie électronique.
 - Argile très fine -14-20, classes 4-5, haut du tube, séchée air et pesée
 - Argile moyenne -10-12 classe 3, milieu du tube, séchée air et pesée
 - Argile grossière - 2- 8 classes 2-8, bas du tube, séchée air et pesée
 - Limon grossier de 20 à 50 microns
 - Sable fin de 50 à 200 microns
 - Sable grossier de 200 à 2000 microns.
- Traitements au chlorure de potassium, chlorure de magnésium, chaud pour saturation

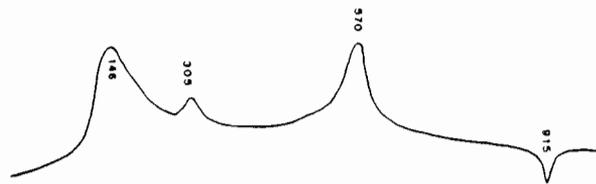
Une partie de l'argile moyenne est conservée en suspension pour passage au microscope électronique.

Analyse thermique différentielle sur échantillons mis en présence plusieurs jours de Nitrate de magnésie saturé (humidité relative de 56%). Vitesse de chauffe 10°/minute appareil Netzsh.

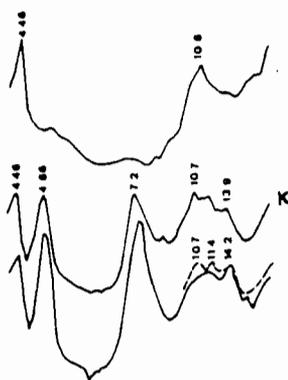
Diffraction X avec anticathode de Co.

Infrarouge avec pastilles de KBr.



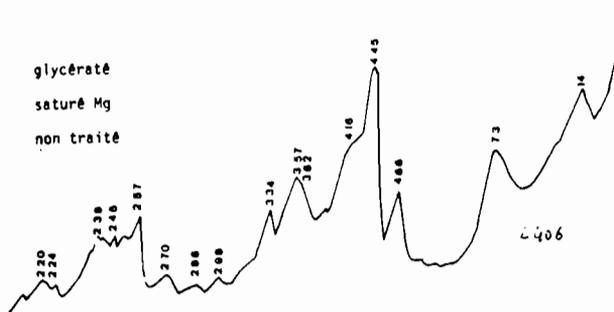


ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE



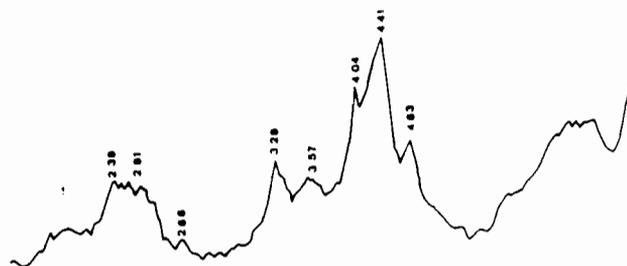
chauffé 500°
orienté
saturé NH4

glycératé
saturé Mg
non traité



Diagrammes de rayons X sur poudre

SOL FERRALLITIQUE FRIABLE : OXISOL
Cordillère côtière
PROFIL E 406



SOL BRUN ROUILLE A HALLOYSITE
Côte Pacifique : CANETE
Profil E 408

B) Note sur les limons volcaniques des
piémonts glaciaires chiliens
méridionaux

(*Bull. Assoc. Geogr. Franc.*, 1975, n°426,)
p.188-193

Claude LAUGENIE, François COLMET-DAAGE,
Eduardo BESOAIN, Mireille DELAUNE *

NOTE SUR LES LIMONS VOLCANIQUES DES PIÉMONTS
GLACIAIRES CHILIENS MÉRIDIONAUX

RESUME. - Un ample manteau de limons couvre les piémonts glaciaires chiliens entre le 38° et le 41° de latitude. On y discerne plusieurs générations de dépôts par rapport aux trois glaciations quaternaires andines : Fresia, Colegual, Llanquihue. La coupe de Coipue, près de Villarica, est particulièrement étudiée. On y discerne 17 séries de cendres qui représentent le dernier inter-glaciaire (Sangamon) et la dernière époque glaciaire (Llanquihue, homologue de Wisconsin). Dans l'ensemble de la région, on distingue : des sols rouges argileux à métahalloysite et fire-clay sur les cendres prémindeliennes ; des sols à métahalloysite et allophane sur les cendres d'âge Sangamon ; enfin, des sols à allophane seule sur les cendres Llanquihue-Wisconsin et holocènes.

ABSTRACT. - Loams cover widely the glacial piedmonts of Chile between 38 and 41° South. Several generations of deposits are observed, through three quaternary Andean glaciations. The section at Coipue, near Villarica, is studied especially. 17 ash fall layers are to be counted, representing the last interglacial and glacial epoch (Llanquihue, equivalent of Wisconsin). On the whole of the country, three kinds of soils may be distinguished : red clayey soils, with metahalloysite and fire-clay, on pre-Mindel ashes ; meta-halloysitic and allophanic soils on Sangamon ashes ; allophanic soils on Llanquihue-Wisconsin and postglacial ashes.

Entre le 39° et le 41° de latitude, les glaciers quaternaires andins s'étaient dans les dépressions centrales chiliennes en énormes lobes de type alaskien, d'importance croissante vers le Sud. C'est la région des Lacs du Chili méridional, un piémont glaciaire hyperhumide et tempéré : plus de 1 500 mm de précipitations annuelles dans les plaines, des hivers humides et frais, deux à trois mois secs seulement au cœur de l'été ; enfin, une forêt tempérée de la pluie, prodigieuse tant par sa vigueur que par la profusion et la variété des espèces qui la composent.

Mais l'originalité essentielle de ces piémonts est d'ordre morphologique. Ce ne sont pas seulement des piémonts glaciaires ; ce sont aussi des piémonts volcaniques. Ce diptyque glaciaire-volcanisme est une des constantes du quaternaire des Andes. L'un et l'autre se per-

(*) CNRS, U.E.R. de Géographie, Bordeaux III, ORSTOM Antilles ; S.A.G. Sant'Agio du Chili ; ORSTOM, Géologie, Bondy.

turbent, s'ajoutent ou s'annulent en une dialectique qui conjugue à la fois rythmes éruptifs et facteurs zonaux.

Au Sud de la vallée de l'Allipen, les dépôts volcaniques se réduisent à trois catégories essentielles :

- de grands lahars de plaines qui coïncident avec des périodes de moindre activité morphologique (phases de retraits glaciaires ou même inter-glaciaires) ;
- des formes d'envoyage post-glaciaires dans les vallées andines (lahars, coulées, cônes de débâcles etc.) ;
- enfin des modelés d'ensevelissements éoliens de cendres d'âges divers qui voilent moraines et terrasses, de la simple aspersion jusqu'à l'enfouissement complet.

L'étude de ces cendres présente un triple intérêt :

- du point de vue des sols, d'abord, puisque ceux-ci ne se développent jamais à partir des moraines ou des terrasses mais des cendres qui les recouvrent ;
- du point de vue stratigraphique, ensuite. On peut espérer, en effet, établir des corrélations entre les dépôts glaciaires en pratiquant la téphrochronologie ;
- sur un plan paléoclimatique, enfin, l'analyse des sols enfouis est susceptible d'éclaircir les alternations passées et plus particulièrement celles des interglaciaires.

Il va sans dire que ces trois perspectives sont étroitement liées. Les sols sur cendres sont souvent polygéniques. Les sols enfouis servent de jalons pédologiques et même stratigraphiques. Inversement, les dépôts glaciaires définissent les générations de cendres (1).

I. LES GÉNÉRATIONS DE CENDRES ET LES MODELÉS D'ENSEVELISSEMENT

Trois grands ensembles d'amphithéâtres morainiques rythment les oscillations glaciaires andines. Ils sont particulièrement bien identifiables dans la région du lac Llanquihue. Le plus ancien, le moins net aussi, celui de *Fresia* s'avance loin vers l'Ouest, presque au pied de la cordillère côtière. En retrait, les grands vallums de Colegual dessinent deux amphithéâtres continus. Enfin, les moraines très fraîches qui ceignent le lac appartiennent à la dernière glaciation (Llanquihue) que des datations au C14 permettent d'assimiler au Wisconsin (fig. 1 et 2).

Chaque groupe d'amphithéâtres et de terrasses associées comporte sa propre couverture de cendres. Les plus anciens cumulent l'ensemble (ou presque) des aspersion éoliennes. Les plus récents sont simplement voilés de cendres post-glaciaires.

Les moraines et nappes du dernier glaciaire sont ainsi saupoudrées de limons dont l'épaisseur ne dépasse pas 1,5 m. Les remaniements

(1) Les données du problème appellent une approche interdisciplinaire. De fait, ce travail est le résultat d'une étroite collaboration entre pédologues, géographes et minéralogistes. Il est le fruit de missions de coopération culturelle et technique du Ministère des

y sont rares et n'altèrent pas les formes originelles des dépôts, excepté à proximité des volcans où s'ajoutent des épandages sub-actuels.

Par contre, les piémonts fluvioglaciaires Colegual disparaissent sous une épaisse chappe de dépôts qui totalisent les accumulations éoliennes du dernier inter-glaciaire, du dernier glaciaire et de l'holocène. Ce sont des piémonts enfouis sous 15 à 20 m de limons parfois. La dissection propre des cendres, les couloirs, les cuvettes d'érosion éoliennes ajoutent à la confusion des modelés. Il est souvent bien difficile de retrouver ou déceler les formes ensevelies sous une telle couverture.

Tout oppose donc les piémonts saupoudrés de la dernière époque froide aux piémonts glaciaires anciens enfouis. A cet égard, l'inter-glaciaire Colegual-Llanquihue représente une coupure majeure du point de vue des modelés. Les cendres inter-*Fresia*-Colegual sont moins épaisses et souvent remaniées. Les moraines *Fresia* fossilisent à leur tour des séries argileuses rouges qui reposent soit sur des terrasses très altérées soit sur les altérites du socle paléozoïque.

On peut ainsi distinguer plusieurs générations de cendres : les séries sub-actuelles et post-glaciaires, deux séries inter-glaciaires dont la plus épaisse est celle de Llanquihue-Colegual, enfin des séries argileuses rouges plus anciennes. En apparence, ces séries occupent une position semblable à celle des loess quaternaires de l'Europe du Nord. Elles s'en distinguent pourtant radicalement.

II. LES COUPES DE COIPUE PRES DE VILLARICA

L'exemple des coupes de Coipue permet de préciser ces données. Elles se situent à 24 km à l'Ouest du lac Villarica et concernent les deux nappes fluvioglaciaires d'âge Llanquihue et Colegual. La basse terrasse associée aux moraines qui bordent le lac est recouverte d'1,5 m de cendres. Elle est dominée d'une trentaine de mètres par une haute terrasse où les dépôts fluvioglaciaires Colegual, particulièrement altérés sont ensevelis sous une couverture de 20 m de limons.

Les cendres de la basse terrasse présentent une granulométrie fine et uniforme. Les densités apparentes sont très faibles et caractéristiques de dépôts éoliens. De couleur jaune brun (10 YR 3/4), elles sont altérées dans la masse. Cette altération homogène efface les stratifications initiales (2).

La composition minéralogique révèle, elle aussi, une assez grande homogénéité. Ce sont des cendres à olivine, augite et hypersthène. On

(2) Il est alors difficile de pratiquer une téphrochronologie précise, à partir de couches témoins particulièrement identifiables, excepté dans le cas de cendres incluses dans des tourbes ou proches des volcans. Il n'en va pas de même sur le versant argentin sous le vent. Dans la Patagonie subdésertique et froide, les altérations sont moins poussées. Vaino AUER a pu ainsi déceler de proche en proche des séries caractéristiques qui servent de jalons téphrochronologiques des sédiments holocènes.

les retrouve au sommet de la haute terrasse (couche 17). Elles sont d'âge post-glaciaire. Plus au Sud, il est parfois possible de les dater grâce à des intercalations de tourbes.

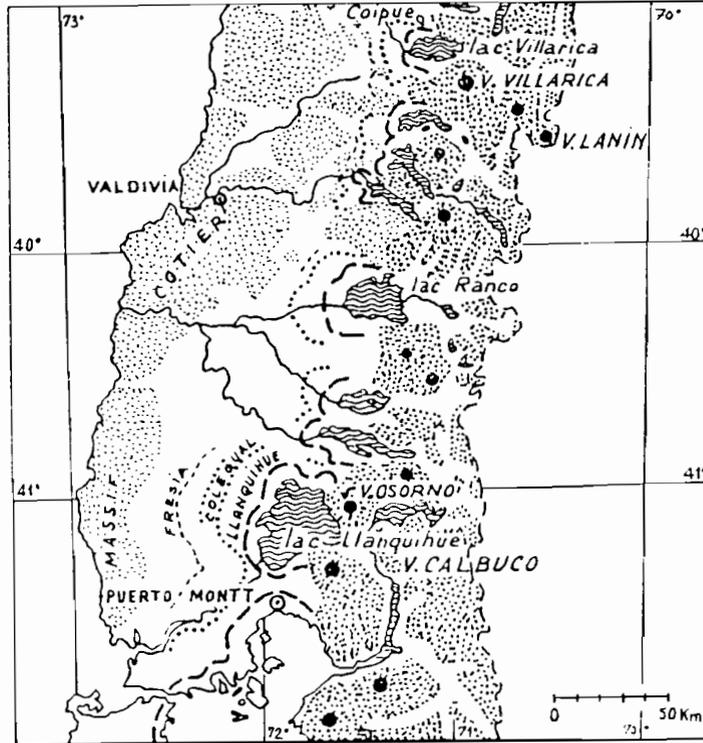


Fig. 1. - CROQUIS DE SITUATION : Points noirs : principaux volcans. En tireté : les amphithéâtres morainiques des trois glaciations andines : FRESIA - COLEQUAL - LLANQUIHUE.

Les grandes séries de cendres qui couvrent la haute terrasse Colequal sont plus complexes. Sur 20 m d'épaisseur on y distingue 17 unités principales bien soulignées par les différences de couleurs. Les lits d'épaisseur variable sont très réguliers et suivent la pente de la terrasse. En amont, on les retrouve sur les moraines épousant fidèlement le profil des vallums. On n'y observe aucune trace de déflation, de solifluxion ou de cryoturbation. Les stratifications sont sagement concordantes. Tout semble donc indiquer que ces dépôts se sont réalisés en période de biostase ; sans doute même sous couvert forestier.

L'analyse des minéraux lourds confirme pour la plupart des dépôts leur origine strictement volcanique. Toutefois l'hypothèse de loess purs et simples n'est pas à écarter totalement. Les séries les plus anciennes (couche 1, par exemple) montrent une prédominance suspecte de l'épidote. On retrouve dans d'autres sites ces limons à épidote au contact même des terrasses fluvioglaciaires. Or les spectres des matrices de terrasses et de moraines présentent eux aussi des maxima à épidote. Des analyses en cours permettront de préciser ce problème.

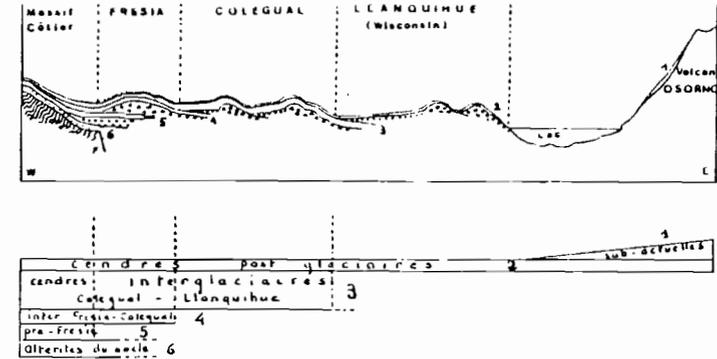


Fig. 2. - Les générations de Cendres volcaniques des plateaux glaciaires chiliens.

	Echantillon	Oliv.	Pyr.	Hyp.	Horn.	Epi	Allo.	Gibs.	Metah.	F-Cl. Kaol.
1	E 311	73	15	12			**			
2	E 312 C	8	2	89	1		**			
3	E 314 B	4	9	59	28		**	**	.	
4	E 315 C			23	31	44		**	**	
5	M 5/3				8	81		.	.	**

Légende des abréviations : Olivine, Pyroxène monoclinique, Hypersthène Hornblende, Epidote, Allophane, Gibbsite, Métahalloysite, Fire-clay, Kaolinite.

Chaque séquence est définie par des faciès granulométriques homogènes qui conditionnent les altérations. Les éléments sont très fins. Ils se partagent entre limons et argiles. Les sables ne représentent au mieux que 10 % du total. On ne discerne pas d'horizons pédologiques au sens propre du terme. Pas d'horizons humifères, de zones décolorées ou tachetées. Il est donc malaisé de saisir les discontinuités de dépôts. A la limite, on peut discuter le terme de palé sols et lui préférer celui de sols enfouis à altérations polygéniques ou cumulées. Prise une à une, ces séquences n'ont pas de signification paléoclimatique. Il n'est donc pas question de les utiliser comme principe d'une

chronostratigraphie. Par contre, il est possible de tirer des indications globales des générations de cendres à condition de pouvoir les dater.

Si l'on ne trouve pas de faunes malacologiques dans ces dépôts, on peut toutefois aborder le problème de leur datation par le biais des corrélations. La base de la série est ici bien datée par les cailloutis d'âge Colegual. Le sommet est post-glaciaire. Mais on peut aller plus loin. Près de Villarica, les moraines du glacier Calafquen fossilisent un dépôt de cendres à olivines, pyroxènes et hypersthènes que l'on peut mettre en parallèle avec la couche 12a de Coipue. D'autres corrélations le suggèrent. On peut en déduire que les séquences 1 à 12 représentent le dernier inter-glaciaire. Cette coupure se confirme au niveau des analyses d'argiles. Dans les séries inter-glaciaires, on trouve des allophanes mais aussi des métahalloysites (excepté les cas à granulométries plus grossières) associées à de la gibbsite. Au-dessus, les argiles disparaissent ; l'allophane domine seule.

III. LES TYPES D'ALTERATIONS

A l'échelle du piémont, chaque génération de cendres révèle ainsi un type d'altération particulier.

Les sols développés sur les cendres du dernier glaciaire et de l'holocène sont des sols à allophanes plus ou moins évolués. On n'y trouve jamais d'halloysite. Ils sont l'expression de climats humides à lessivage presque constant. L'attaque des minéraux et des verres est très rapide. Elle est fonction d'une granulométrie toujours fine. Mais les sols ne dépassent pas le stade de l'allophanisation dont l'évolution est ensuite très lente.

Les sols enfouis du dernier inter-glaciaire sont déjà plus évolués. La présence de métahalloysite suggère des climats à saison d'été plus sèche. Toutefois, la permanence de l'allophane y est remarquable. Sa transformation est encore lente et il faut en déduire que les climats inter-glaciaires n'étaient pas très différents des climats actuels.

Les sols d'âge Fresia-Colegual ne représentent qu'une variante plus évoluée des précédents. Plus argileux, sans doute. Ils révèlent les mêmes mélanges de minéraux : allophanes, halloysites, métahalloysites et des argiles à 14 Å mal définies.

Par contre, les sols antérieurs aux moraines Fresia sont des sols argileux francs. On les retrouve à l'Ouest sur le socle paléozoïque, les surfaces qui recoupent le Tertiaire continental ou les terrasses à altérations rouges pre-Fresia. Ce sont des sols ferrallitiques à halloysite, fire-clay et même kaolinite en tous points semblables à ceux des Tropiques. Ils évoquent une longue évolution, en milieu climatique plus chaud et à rythme pluviométrique plus tranché.

CONCLUSION

Pour conclure, les successions de cendres qui feurent les piémonts glaciaires chiliens ne sont pas assimilables aux loess de période froide de l'hémisphère Nord sur lesquels est fondée la chronostratigraphie du Quaternaire de l'Europe par exemple. Ce sont des pseudo-loess volcaniques.

On peut toutefois tirer des enseignements des altérations globales de chaque génération de cendres. A cet égard, la gamme des altérations présente une discontinuité essentielle entre les sols ferrallitiques anciens et les sols interglaciaires. Il manque, en particulier, dans l'éventail les séries de transition brun-rouille à halloysites que l'on trouve dans les sols tropicaux (F. Colmet-Daage). L'hypothèse d'une coupure paléoclimatique s'impose donc.

Par contre, l'amplitude des variations climatiques des périodes glaciaires et inter-glaciaires se situe dans une fourchette singulièrement réduite. Il n'y a pas lieu de s'en étonner. Sur cette façade pacifique, l'influence océanique est une donnée fondamentale. Les modelés glaciaires le prouvent. La dynamique actuelle aussi. Plus au Sud, en Patagonie, les glaciers bousculent les forêts...

DISCUSSION

QUESTIONS. - Ne peut-on mettre en doute les interprétations paléoclimatiques ? Ne peut-on expliquer les différences de sols par les différences de temps d'altération entre les fossilisations par les cendres ?

REPONSES. - Certes, mais il faut tout de même constater que dans l'ensemble du piémont, les séries d'âge glaciaire et interglaciaire n'ont jamais abouti à des sols ferrallitiques, que les séries interglaciaires vont jusqu'à la métahalloysite et que les séries post-glaciaires ne vont que jusqu'aux allophanes, et cela quel que soit l'intervalle de temps avant l'enfouissement et quel que soit le cas (sols scellées, enfouies ou polycycliques).