

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS GRIGNON  
UNIVERSITE DE NANCY I  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE DE RENNES  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE DE MONTPELLIER

**DEA NATIONAL DE SCIENCE DU SOL**

**Jérôme POULENARD**

inscrit à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

**CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DE SOLS  
DERIVES DE CENDRES VOLCANIQUES RECENTES**

**(VOLCAN PICHINCHA. EQUATEUR)**

Stage effectué du 01/01/1996 au 30/06/1996  
Projet SISHILAD (ORSTOM/EMAP-Q), Quito, Equateur  
et CPB/CNRS, Vandoeuvre les-Nancy

Soutenu le 02/07/1996 devant le jury composé de :

Professeur A. HERBILLON, président  
Monsieur J. COLLINET  
Monsieur P. FAIVRE  
Monsieur M. GURY  
Monsieur E. JEANROY

A Quito, le 28 janvier 1928

Je te salue quand même, pays maudit d'Equateur  
Mais tu es bien sauvage,  
Région de Huygra, noire, noire, noire,  
Province du Chimborazo, haute, haute, haute,  
Les habitants des hauts plateaux, nombreux, sévères,  
étranges.

"Là- bas, voyez, Quito." [...]  
Quito est derrière cette montagne.  
Mais qu'y a t-il derrière cette montagne ?  
Quito est derrière cette montagne.  
Mais que verrai-je derrière cette montagne ? [...]  
Quito et ses montagnes.  
Elles tombent sur lui, puis s'étonnent, se retiennent. [...]

La première impression est terrible et proche du désespoir.  
L'horizon d'abord disparaît.  
Les nuages ne sont pas tous plus haut que nous.  
Infiniment et sans accidents, ce sont, où nous sommes,  
Les hauts plateaux des Andes qui s'étendent, qui s'étendent. [...]

Le sol est noir et sans accueil.  
Un sol venu du dedans.  
Il ne s'intéresse pas aux plantes.  
C'est une terre volcanique. [...]

Qui n'aime pas les nuages,  
Qu'il ne vienne pas à l'Equateur.  
Ce sont les chiens fidèles de la montagne,  
Grands chiens fidèles;  
Couronnent hautement l'altitude. [...]

Il nous fallut d'abord, pour entrer dans cette ville,  
payer l'impôt du visage.

Henri MICHAUX.

ECUADOR

## AVANT-PROPOS

A l'issue de ce travail, je souhaiterais exprimer mes remerciements à l'ensemble des personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à son élaboration.

J'ai bénéficié d'une équipe d'encadrement idéale : C. ZEBROWSKI m'a fait profiter de son immense connaissance des sols volcaniques équatoriens et son aide m'a été précieuse lors des travaux de terrain ; A. HERBILLON a toujours été disponible pour me prodiguer aides et conseils, tant au niveau de l'interprétation des résultats qu'au cours de la rédaction de ce mémoire. Qu'ils en soient, ici, tous deux vivement remerciés.

Je souhaiterais également exprimer ma profonde gratitude envers C.VALENTIN, responsable de l'unité de recherche 24 de l'ORSTOM, qui m'a témoigné, dès l'origine de cette étude, une confiance, des conseils et des encouragements essentiels.

J.COLLINET, tant sur le terrain qu'au cours de discussions, a fortement contribué à la réalisation de ce travail. Il a su surtout motiver mon désir de poursuivre mes premiers pas de jeune pédologue. J'ai conscience de lui devoir déjà beaucoup.

Les conseils de P. QUANTIN m'ont été très précieux et je lui exprime ici ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je tiens encore à remercier E. AYABACA et C. BOUVIER qui m'ont accueilli au sein du projet SISHILAD.

J.L. JANEAU, responsable des travaux de pédologie de ce projet, a constamment mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à mes travaux. Cette étude n'aurait pu être faite sans son indispensable et immense concours.

Je dois beaucoup à E. MENDOZA et à Edison pour leurs travaux d'analyses des sols en Equateur. Un grand merci également à E. JEANROY, G. BURTIN et D. MERLET qui ont mis à ma disposition leurs compétences et expériences des analyses des sols volcaniques.

Un immense merci à E. VANCRAEYENEST pour son aide et son appui constant.

A mes amis équatoriens et français du projet SISHILAD, à mes amis du Centre de Pédologie Biologique, je dois une mention toute spéciale de reconnaissance collective.

Ma plus profonde gratitude va à Marie et Jean-Louis JANEAU. Ils ont eu le courage de me supporter plusieurs mois chez eux, avec chaleur et amitié.

## RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une étude sur le fonctionnement hydrologique et les risques de coulées boueuses des versants du volcan Pichincha qui domine la ville de Quito (Equateur), une séquence de sols volcaniques dérivés de cendres récentes est étudiée. Les profils correspondent à des séries de sols formés sur une succession de dépôts quaternaires. L'ensemble du versant est constitué de sols jeunes en début de pédogenèse. Selon les conditions climatiques apparaissent des *Thaptics* et *Humics Vitricryands* en haut de versant et des *Vitrantic Troprothents* en bas de versant (Soil Survey Staff, 1994). Les synthèses de minéraux allophaniques sont très limitées pour le type Andisol. Les sols de bas de versant sont dépourvus de tous minéraux secondaires aussi bien d'allophanes que d'argiles. Le facteur limitant à une pleine évolution des sols semble être ici le temps : les sols actuels dérivent de matériaux trop jeunes et la succession trop rapide des éruptions a empêché l'évolution des horizons enfouis jusqu'au stade andique.

Les propriétés andiques, et en particulier les caractéristiques physiques particulières des Andosols, sont donc trop peu exprimées pour pouvoir être considérées comme responsables d'une instabilité des versants en condition de fortes pluies.

**Mots-clés :** Andisol, Cendres, Classification, Sols volcaniques, Verres, Andes, Equateur

## ABSTRACT

In the framework of a study on the hydrological functioning and muddy casting risks of slopes of the volcano Pichincha that dominates the city of Quito (Ecuador), a sequence of soils derived from recent ashes is studied. Profiles correspond to series of soils formed on a succession of quaternary deposits. The slope is made of young soils. According to climatic conditions appear *Thaptics* and *Humics Vitricryands* in the top of the landscape and *Vitrantic Troprothents* near Quito (Soil Survey Staff, 1994).

Syntheses of allophanics minerals are limited in the Andisol area and the Entisols don't have neither allophanics minerals nor phyllosilicates. The factor limiting to a complet evolution of soils seems to be here the time.

Actual soils derive from too young materials and the too rapid succession of eruptions limit the evolution of the paleosurfaces. Andics soils Properties, especially the physical characteristics of Andisols are too poorly expressed to be able to be considered as responsible for an instability of slopes in strong rain conditions.

**Key words :** Andisol, ashes, Clasification, Volcanic ash soils, Glasses, Andes, Ecuador

## RESUMEN

Dentro del marco de un estudio sobre el funcionamiento hidrológico y los riesgos de flujos lodosos de las vertientes del volcán Pichincha que domina la ciudad de Quito (Ecuador), es estudiada una secuencia de suelos volcánicos derivados de cenizas recientes. Los perfiles corresponden a series de suelos formados sobre una sucesión cuaternaria de depósitos. El conjunto de las vertientes está seguido de suelos jóvenes en principio de la edafogénesis. Según las condiciones climáticas aparecen los *Thaptics* y *Humics Vitricryands* arriba de las vertientes y los *Vitrantic Troporhents* por río abajo (Soil Survey staff, 1994).

Las síntesis de minerales alofánicos son muy limitadas por el tipo Andisol. los Entisols de la parte baja de la vertiente son vírgenes de todo mineral secundario así mismo tan alofánicos como filosilicatos. El factor limitante para una completa evolución de los suelos parece ser aquí el tiempo : los suelos actuales se derivan de materiales muy jóvenes y la sucesión muy rápida de las erupciones impiden la evolución de las paeosuperficies hasta el estado ándico.

Las propiedades ándicas son sea lo que sea muy poco expresadas para poder ser consideradas como responsables de una inestabilidad de las vertientes en condición de fuerte lluvia.

**Palabras claves :** Andisoles, Cenizas, Clasificación, Suelos volcánicos, Vidrios, Andes, Ecuador

# Caractérisation et classification de sols dérivés de cendres volcaniques récentes. Volcan Pichincha (Equateur).

<b>INTRODUCTION</b>	P. 1
<b>CHAPITRE I : Les "Volcanic ash soils" : revue bibliographique</b>	P. 3
<b>1.1. Les "Volcanic ash soils" : définition et classification</b>	P. 3
1.1.1. Concepts de base	P. 3
1.1.2. Classification	P. 3
1.1.2.1. Evolution des concepts de classification	
1.1.2.2. La soil taxonomy	
1.1.2.3. Le référentiel pédologique	
1.1.2.4. Choix du vocabulaire employé	
<b>1.2. Pédogenèse et stades d'évolution des Andisols</b>	P. 6
1.2.1. L'altération prépedologique	P. 6
1.2.2. Intervention de la matière organique	P. 7
1.2.3. Vieillessement des gels organo-minéraux	P. 7
<b>1.3. Ecologie et répartition des Andisols</b>	P. 8
1.3.1. Roches mères	P. 8
1.3.2. Conditions climatiques	P. 9
1.3.3. Temps de formation	P. 9
<b>1.4. Caractéristiques et propriétés des Andisols</b>	P. 10
1.4.1. Caractéristiques morphologiques	P. 10
1.4.1.1. Andisols andiques	
1.4.1.2. Andisols vitriques	
1.4.2. Caractéristiques minéralogiques	P. 10
1.4.2.1. Andisols andiques	
1.4.2.2. Andisols vitriques	
1.4.3. Caractéristiques chimiques et physico-chimiques	P. 11
1.4.3.1. Andisols andiques	
1.4.3.2. Andisols vitriques	
1.4.4. Caractéristiques physiques et hydriques	P. 12
1.4.4.1. Andisols andiques	
1.4.4.2. Andisols vitriques	
<b>1.5. "Volcanic ash soil" d'Equateur : travaux antérieurs</b>	P. 13

<b>CHAPITRE II : Matériels et méthodes</b>	P. 15
<b>2.1. Caractéristiques générales du milieu</b>	P. 15
2.1.1. Situation géographique	P. 15
2.1.2. Caractéristiques climatiques	P. 15
2.1.3. Caractéristiques géologiques	P. 17
2.1.4. Caractéristiques géomorphologiques	P. 18
2.1.5. Cadre pédologique de l'étude	P. 18
2.1.6. Végétation, occupation du sol	P. 19
<b>2.2. Choix des solums d'étude</b>	P. 19
<b>2.3. Méthode d'analyse</b>	P. 21
2.3.1. Tests et mesures de terrain : densité apparente, scissiométrie, test NaF	P. 21
2.3.2. Analyses courantes	P. 21
2.3.2.1. C, N, P	
2.3.2.2. CEC, taux de saturation	
2.3.2.3. Rétention d'eau à différents Pf	
2.3.2.4. Ph	
2.3.2.5. Limite de changement d'état	
2.3.3. Extraction Al, Fe et Si	P. 22
2.3.4. Rétention des Phosphates	P. 23
2.3.5. Teneur en verres volcaniques	P. 23
<b>CHAPITRE III : Résultats et discussions</b>	P. 24
<b>3.1. Chronoséquence des dépôts volcaniques</b>	P. 24
3.1.1. Examen des 45 profils	P. 24
3.1.2. Profil théorique et âge des dépôts	P. 25
<b>3.2. Les sols et leurs distributions</b>	P. 27
3.2.1. Morphologie	P. 27
3.2.2. Mise en évidence de paleosurfaces	P. 27
3.2.3. Caractérisation générale	P. 29
3.2.3.1. Critères andiques	
3.2.3.2. Constituants minéraux	
3.2.4. Propriétés caractéristiques des sols	P. 32
3.2.4.1. Caractéristiques physico-chimiques	
3.2.4.2. Caractéristiques physiques	
3.2.7. Classification	P. 39
3.2.7.1. Les sols de la partie haute du bassin	
3.2.7.2. Les sols de la partie basse du bassin	

<b>3.3. Discussion</b>	P. 43
3.3.1. Facteurs limitant l'andosolisation des sols de haut de bassin	P. 43
3.3.2. L'absence d'évolution des sols du bas de bassin	P. 43
3.3.3. Modèle d'organisation spatiale des sols	P. 44
<b>CONCLUSIONS GENERALES</b>	P. 45
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>ANNEXES</b>	



# INTRODUCTION

# INTRODUCTION

La position géographique de la ville de Quito, capitale de l'Équateur, en aval des flancs escarpés du volcan PICHINCHA, la soumet à des risques de mouvements en masse des versants. Ces événements sont susceptibles de provoquer de lourds dégâts tant pour les installations (voies de communication, conduites d'eau.....) que pour les centaines de milliers d'habitants qui y vivent.

Des exemples récents (flux de boues de Bogota, en 1983, plus de 500 victimes, lahar du volcan Nevado del Ruiz en 1985) ont parfaitement montré les conséquences catastrophiques qui peuvent résulter de ces flux solides ou plastiques.

Il semble que des situations particulières soient fréquemment à l'origine de ces mouvements (FAGEOLLET, 1989). Or si un certain nombre de conditions sont nécessaires au déclenchement de tels événements, celles-ci semblent à *priori* réunies pour la ville de Quito :

- Une éruption du volcan Pichincha et les fortes pluies qui suivent ce type de remise en activité volcanique, déclencheraient selon toute probabilité de nombreux glissements et coulées sur des cendres non-consolidées.

- Un événement sismique de forte intensité suffirait sans doute à rompre l'équilibre des versants.

Dans le cadre d'une convention internationale entre l'ORSTOM et l'EMAP-Q (entreprise d'eau potable de la municipalité de Quito) le projet SISHILAD a été mis en place afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique des versants du Pichincha et donc d'évaluer les risques de mouvements que ce fonctionnement pourrait induire.

Dans ce contexte, la connaissance des sols de ces mêmes versants constitue une étape prioritaire. En effet aucun travail précis sur les sols de ces versants n'est actuellement disponible.

Notre travail a donc pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les types de sols présents sur les flancs de ce bassin versant? (Ce point nécessite le rattachement scrupuleux des observations faites aux systèmes actuels de classification des sols.)

- Quelle est la répartition de ces types de sol selon les conditions de milieu et tout particulièrement selon l'altitude, la pente..?

- Quels sont les constituants minéraux présents dans chaque type de sol?

- Quels conséquences ces constituants ont-ils sur les propriétés physiques et physico-chimiques?

Dès l'origine nous sommes assurés du fait que nos sols dérivent de cendres volcaniques. Nous nous plaçons ainsi dans le cadre pédologique des "Volcanic Ash Soil" des auteurs anglo-saxons.

Dans une première partie de ce mémoire, nous préciserons ce que ces mots recouvrent. Sur la base de données bibliographiques nous rappellerons les concepts fondamentaux ainsi que les propriétés générales de ces sols. Enfin, une brève synthèse exposera les principaux travaux réalisés sur les sols dérivants de cendres volcaniques en Equateur.

Le second chapitre sera consacré aux matériels et méthodes. Nous y présenterons la logique de notre travail et la démarche qui nous a conduit à la sélection d'un certain nombre de sites d'étude. Les caractéristiques environnementales des solums étudiés et les techniques analytiques utilisées pour permettre leur classification et la description de leurs propriétés seront précisées dans ce même chapitre.

Enfin le troisième chapitre exposera les résultats obtenus puis s'attachera à les interpréter en mettant en relief les facteurs limitant le développement de la pédogenèse. Nous traiterons également des classifications de ces sols en référence à la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994) et au Référentiel pédologique (AFES, 1995).

# CHAPITRE I

## **CHAPITRE 1 :**

### **Les "volcanic ash soils" : revue bibliographique**

#### **1.1. Les "volcanic ash soils" : définition et classification**

##### **1.1.1. Concepts de base**

Les sols dérivés de cendres volcaniques ou les "volcanic ash soils" des Anglo-saxons appartiennent pour la plupart à l'ordre taxonomique des "Andosols ou Andisols", -suivant la classification employée-, avec lequel ils sont fréquemment confondus. Pourtant, cette relation entre "sols volcaniques" et "Andosols" n'est pas univoque : il existe des sols volcaniques n'appartenant pas aux groupes des "Andosols", et inversement de nombreux auteurs ont montré l'existence d'Andosols non volcaniques. On le voit, ces deux concepts regroupent des entités différentes. C'est le caractère particulier du substrat, à savoir la présence de cendres, qui conduit aux "volcanic ash soils", alors que c'est un ensemble de propriétés qui permet le rattachement d'un solum au taxon "Andosol". Les sols sur cendres volcaniques n'appartenant pas à l'ordre des Andisols peuvent être subdivisés en deux groupes : les sols trop peu évolués et, les sols subissant un processus de pédogenèse autre que l'Andosolisation. De plus, au sein même des andosols, les caractères andiques regroupent deux ensembles possédant des propriétés distinctes : les propriétés andiques et les propriétés vitriques.

Par association sémantique, il se crée une certaine confusion entre Andosol et propriétés andiques. Ce constat a conduit P. QUANTIN à distinguer, dans le Référentiel Pédologique 1995, les Andosols aux propriétés andiques des Vitrosols aux propriétés vitriques (QUANTIN, 1995). Au sein même des Andosols à propriétés andiques on doit encore distinguer deux ensembles : les Andosols allophaniques et les Andosols non-allophaniques.

Il apparaît immédiatement nécessaire de définir ces différents ensembles et le vocabulaire s'y rattachant. En effet, les différents termes employés correspondent à des définitions rigoureuses qu'il s'agit de bien considérer dans le cadre de leur système de référence ou de classification.

##### **1.1.2 Classification**

###### **1.1.2.1. Evolution des concepts de classification**

La classification des Andosols a subi de profondes modifications au fur et à mesure de l'évolution des connaissances. Ainsi, leur définition aussi bien que les différents critères diagnostics pour leur classification ont été profondément modifiés au cours des vingt dernières années.

Dans tous les anciens systèmes de classification ( Andosols de la FAO, 1975 ; Andepts de la Soil Taxonomy, 1975 ; Andosols de la CPCS, 1967) l'élément essentiel reposait sur l'abondance de matériaux amorphes dans la fraction granulométrique argileuse.

A ce critère s'associaient des conditions de densité apparente ( $< 0,85 \text{ g/cm}^3$ ) et de taux de matériaux pyroclastiques vitreux ( $> 60\%$  dans les fractions limoneuses et sableuses).

Par la suite, de gros efforts ont été réalisés, notamment par l'ICOMAND (International Committee on the Classification of Andisols), pour adapter les critères aux nouvelles connaissances acquises sur les Andosols. Il en a résulté une définition stricte des propriétés andiques. Ainsi, dans tous les systèmes actuels les Andisols ou Andosols sont caractérisés et classifiés à partir du repérage de propriétés bien définies. Il s'agit donc de rappeler quels sont les éléments permettant d'identifier l'existence de ces propriétés dans chaque système de classification.

#### 1.1.2.2. La Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994)

Les sols pouvant être rattachés à l'ordre des Andisols de la Soil Taxonomy sont définis comme des sols minéraux qui présentent des propriétés andiques sur une épaisseur minimale de 35 cm dans les 60 cm supérieurs (zone de contrôle andique), ou sur 60% de l'épaisseur totale du sol si un contact lithique apparaît à moins de 60 cm de profondeur.

Ces propriétés diagnostiques appartiennent à trois catégories distinctes (PARFITT et CLAYDEN, 1991) :

- "Première Catégorie"
  - $\text{Alox} + 1/2 \text{ Feox} > 2\%$  dans la fraction  $< 2 \text{ mm}$
  - Densité apparente  $< 0,9 \text{ g/cm}$
  - Rétention de phosphates  $> 85\%$
  
- "Deuxième Catégorie"
  - $\text{Alox} + 1/2 \text{ Feox} > 0,4\%$  dans la fraction  $< 2 \text{ mm}$
  - Au moins 30% de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2 mm
  
- "Troisième Catégorie" : ("the black hole" )

Au VI<sup>e</sup> Congrès International de classification des sols au Chili et en Equateur, en 1984, il est apparu nécessaire d'inclure dans l'ordre des Andisols, des sols qui possédaient des propriétés intermédiaires entre les deux groupes cités et qui se trouvaient exclus par les critères précédents. Ainsi un troisième groupe de propriétés andiques (d'où le nom de black hole) a été inclus dans les clefs d'entrée dans l'ordre :

Les sols possédant les caractéristiques suivantes :  $0,4\% < \text{Alox} + 1/2 \text{ Feox} < 2\%$  dans la fraction  $< 2 \text{ mm}$  et moins de 30 % de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2 mm doivent être situés sur un graphique  $\text{Alox} + 1/2 \text{ Feox} = f(\% \text{verres})$  au-dessus de la droite d'équation  $y = -15,625x + 36,25$  (C.f. Annexe I).

Ces différentes façons d'entrer dans l'ordre des Andisols présentent le grand intérêt d'être fixes, définies et ne laissant place à aucun doute quant à l'appartenance supposée d'un solum. Cependant, il est regrettable que ces critères initiaux (qui donnent naissance à ces trois ensembles) ne soient pas utilisés pour le classement en sous-ordres et groupes. En effet, ce sont les conditions de température et d'humidité (*temperature regime et moisture regime*) qui

permettent de préciser à quels sous-ordres se rattache un solum donné. Il est à noter que la classification de la FAO de 1989 a utilisé les trois catégories de propriétés andiques mentionnées ci-dessus pour l'entrée dans son *major soil group* (MSG) des Andosols.

### 1.1.2.3. Le Référentiel Pédologique

Le Référentiel Pédologique est construit sur la base d'horizons diagnostiques. Dans le Grand ensemble de référence (GER) des Andosols, on distingue les horizons suivants (QUANTIN, 1995) :

- Horizon vitrique : Avi
  - Da entre 0,9 et 1,2
  - Capacité de rétention de l'eau à 1500 Kpa < 25%
  - $0,4\% < \text{Alox} + 1/2 \text{Feox} < 2\%$
  - Rétention des phosphates < 85%

La présence de cet horizon conduit à rattacher le solum considéré à la référence Vitrosol

- Horizons Silandiques : And et Snd
  - Da < 0,9
  - $\text{Alox} + 1/2 \text{Feox} > 2\%$
  - $\text{SiOx} > 0,6\%$
  - $\text{Alpy}/\text{Alox} < 0,5$

And et Snd se dissocient eu égard à leur couleur et à leur teneur en carbone organique.

La présence de ces horizons conduit à la référence SilAndosols.

- Horizons Aluandiques : Alu et Slu
  - Da < 0,9
  - $\text{Alox} + 1/2 \text{Feox} > 2\%$
  - $\text{SiOx} < 0,6\%$
  - $\text{Alpy}/\text{Alox} > 0,5$

La présence de ces horizons conduit à la référence AluAndosols

On le voit, le Référentiel Pédologique a le mérite de rattacher à des références distinctes les différents types d'Andosols mis en évidence par de récents travaux. Ainsi, non seulement Vitrosols et Andosols sont dissociés mais Andosols allophaniques (SilAndosols) et Andosols à complexes organo-aluminiques (AluAndosols) sont également clairement séparés.

### 1.1.1.4. Choix du vocabulaire employé

On remarquera que le choix du terme Andisol ou Andosol n'est pas neutre puisqu'il renvoie explicitement à un système de classification différent. Dans ce mémoire, nous avons pris la décision de nous référer prioritairement à la Soil Taxonomy (qui est la classification de référence utilisée en Equateur).

La distinction fondamentale entre andique et vitrique n'apparaît pas, dans la soil taxonomy au niveau des critères d'entrées de l'ordre. Elle n'apparaît en effet qu'au niveau du grand groupe. Pourtant, pour plus de clarté, nous nous

autoriserons à considérer les sols possédant des propriétés de la première catégorie comme des Andisols andiques et ceux possédant les propriétés de la seconde et de la troisième catégories comme des Andisols vitriques. Dans un contexte pédogénétique, cette distinction peut apparaître comme sans intérêt puisqu'il ne fait pas de doute qu'andiques et vitriques appartiennent à une même dynamique génétique. Mais, dans une étude sur les fonctionnements et les propriétés des sols, une telle distinction est utile car leurs propriétés physico-chimiques aussi bien que physiques sont clairement distinctes.

Notre étude, de par sa problématique, nous place inévitablement dans une position intermédiaire entre ces deux conceptions. Ainsi, nous décrirons les stades d'évolution et la pédogénèse des Andisols au sens le plus large. Mais, quand il s'agira de préciser les propriétés particulières de ces sols, nous distinguerons les Andisols andiques des Andisols vitriques.

## **1.2. Pédogenèse et stades d'évolution des Andisols**

La pédogenèse des sols volcaniques a été étudiée par de très nombreux auteurs. En effet, ces sols représentent un véritable laboratoire naturel où l'interaction entre des phases minérales peu organisées et des phases organiques atteint une ampleur exceptionnelle (DUCHAUFOR, 1983). Classiquement, on distingue trois étapes essentielles dans la genèse des Andisols (HETIER, 1975) :

### **1.2.1. L'altération prépédologique**

Il s'agit de l'altération des matériaux pyroclastiques qui se produit dès leurs dépôts et ne fait pas intervenir une incorporation de matière organique. Cette étape d'altération chimique des verres volcaniques a été fort bien étudiée par TRICHET (TRICHET 1969).

Les verres volcaniques, qui proviennent d'un refroidissement rapide des magmas, sont très fréquemment la matrice (englobant des cristaux de microlites et phénoblastes) des roches magmatiques effusives. Ils se composent de particules subsphériques englobées dans une phase d'aspect poreux (MUXART et BIROT, 1976).

Le moteur de cette première étape d'altération est une hydratation de ces verres.

En régime de percolation, l'action de l'eau sur les verres consisterait principalement dans la dissolution du ciment et dans l'entraînement des sphères incluses (TRICHET 1969). Mais il existe incontestablement une dissolution des verres d'origine chimique. GARCIA HERNANDEZ et RODRIGUEZ RODRIGUEZ ont expérimentalement montré l'importance de la concentration en  $Si(OH)_4$  de la solution d'altération, sur l'évolution des cendres et la néogenèse des minéraux allophaniques (GARCIA HERNANDEZ et RODRIGUEZ RODRIGUEZ, 1990).

Ces billes sphériques, entièrement amorphes, auraient une teneur en silice bien supérieure à celle du verre dont elles sont issues. L'altération prépédologique des cendres conduirait donc à la production de composés concentrés en silice.

Ce point expliquerait la synthèse d'allophanes siliceux dans les stades juvéniles de l'andosolisation et à Ph proche de la neutralité (6-8) (HERBILLON, 1994). Puis les bases et la silice étant rapidement éliminées par voie soluble, le milieu s'acidifie. On observe alors la synthèse de précurseurs solubles des



minéraux allophaniques sous la forme d'ions polymériques hydroxyaluminosilicatés possédant des types de liaisons et de configuration proches de l'imogolite. Ultérieurement, quand ces ions coagulent, il y a précipitation de ce polymère en allophanes alumineux. Ces produits peuvent aussi subir, si les conditions pédoclimatiques le permettent, une resilification donnant naissance à des argiles plus riches en silice du type Halloysite.

Certains auteurs (WADA et INOUE, 1967 ; RODRIGUEZ PASCUAL et al. 1976) pensent que l'imogolite constituerait une étape dans l'évolution allophane-halloysite. Pourtant, SIEFFERMANN a observé que la formation d'halloysite directement à partir des minéraux primaires volcaniques était possible en milieu équatorial lors des saisons sèches (SIEFFERMANN, 1973).

### **1.2.2. Intervention de la matière organique**

L'incorporation au sol de grandes quantités de substances humiques, issues de la dégradation des litières, provoque une accélération de l'altération qui se transforme en une véritable acido-complexolyse. Les cations Al et Fe sont solubilisés à l'état de complexes et les composés humiques maintiennent ces gels minéraux à l'état amorphe.

Réciproquement, les amorphes exercent une action importante sur l'évolution de la matière organique : les conditions pédoclimatiques favorisant la décomposition de la matière organique et, dans le même temps, les éléments métalliques stabilisant et protégeant les composés humiques de la dégradation microbienne, on observe une accumulation relative considérable de ceux-ci.

C'est l'étape centrale de l'andosolisation.

### **1.2.3. Vieillissement des gels organo-minéraux**

Cette étape correspond à une évolution des complexes organo-métalliques vers des formes libres. Dans ces conditions, les actions réciproques des deux ensembles organique et minéral sont ralenties, voire disparaissent, et l'on retrouve un contexte favorable à la cristallisation des gels. S'ensuivent alors des synthèses de kaolinite voire de gibbsite, et une diminution massive des stocks organiques. Les sols sortent alors du cadre de l'andosolisation pour se placer dans le schéma pédogénétique de la brunification ou, dans les cas de climat chaud, de la ferrallitisation.

Ainsi l'Andosolisation est un processus génétique qui conduit un sol à passer par une succession de stades d'évolution (Cf. Fig n°1)

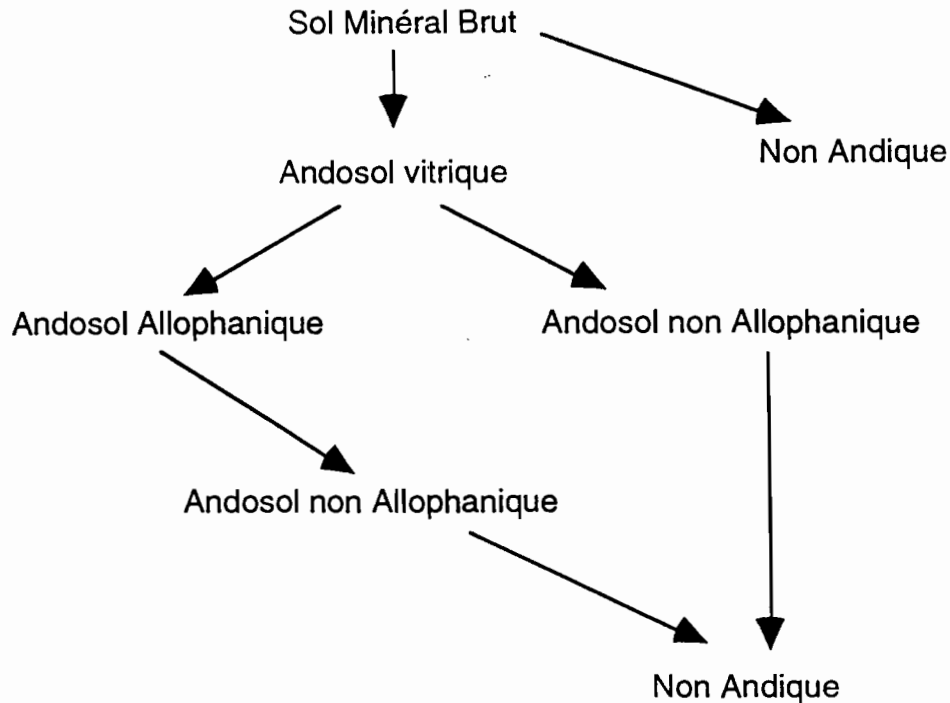


Fig n°1 : Schéma de synthèse des stades d'évolution des "volcanic ash soil"

Ces différentes étapes de l'andosolisation sont sous la dépendance étroite des conditions pédoclimatiques. Nous observons également qu'elle n'est en aucun cas un processus obligatoire. A plusieurs stades, les conditions peuvent conduire un sol à sortir du cadre de l'andosolisation. Réciproquement, si le sol ne connaît pas de période de dessiccation, la dernière étape n'intervient pas et l'on peut conserver un "Andosol vrai" sur de très longues périodes.

### 1.3. Ecologie et répartition des Andisols

Il s'agit en fait d'observer l'occurrence des Andisols et de déterminer les facteurs principaux de l'apparition de ce type de sol. Ces facteurs sont évidemment, comme nous venons de l'observer, intimement liés aux processus pédogénétiques. Nous nous référons ici à de nombreux auteurs qui ont décrit, dans des travaux de synthèse, les conditions de formation des Andisols : (SHOJI, 1993 ; QUANTIN, 1972 ; HETIER, 1975 ; PARFITT et CLAYDEN, 1991)

#### 1.3.1. Roches-mères

La roche-mère est évidemment un caractère fondamental de la formation de Andisols comme le suggère le terme de "volcanic ash soil". Ainsi, à l'échelle du globe, on observe une excellente corrélation entre zone d'apparition des Andisols et zone d'activité volcanique actuelle ou récente.

On a longtemps pensé que la présence de verres volcaniques était une condition indispensable à l'andosolisation. Aujourd'hui il semble, en fait, que ce soit la vitesse d'altération du matériau qui soit à son origine.

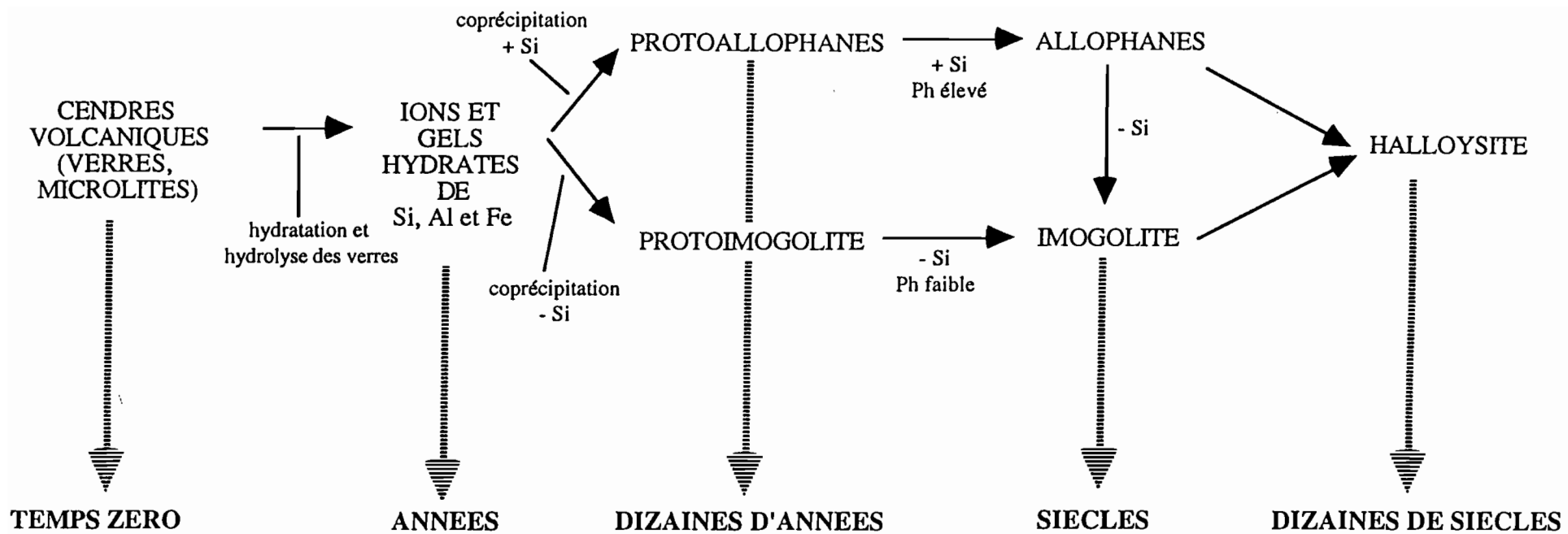


Fig n°2 : Temps de formation des principaux minéraux types des Andisols (BESOAIN et Al., 1981)

Dans ce cadre, les verres volcaniques sont effectivement un matériau très favorable puisque considérés comme étant "les moins résistants à l'altération de tous les minéraux primaires" (SHOJI et al. 1993). Pourtant HETIER, par exemple, a montré que les Andisols se rencontraient également sur roche mère entièrement cristallisée dans le cas où leurs minéraux sont susceptibles d'une évolution rapide (HETIER, 1975). Dans le contexte de notre étude, le caractère pyroclastique du substrat ne fait aucun doute et nous ne détaillerons donc pas les conditions de formation des Andisols non-volcaniques.

### 1.3.2. Conditions climatiques

Il existe de très nombreux travaux relatifs aux conditions de formation des composés minéraux allophaniques (PARFITT et al, 1984 ; PARFITT et KIMBLE, 1989 ; PARFITT, 1990 ; UGOLINI et DAHLGREN, 1991...). Il ressort de ces études que deux conditions essentielles sont indispensables à ces formations :

- La permanence de l'humidité ; Nous avons vu que la permanence de l'humidité est une condition *sine qua non* aussi bien de l'altération initiale des verres que du maintien du stade andique.

- Un bon drainage ; PARFITT et al, 1984 ont montré que, sur le même lit de cendres volcaniques, des conditions de bon drainage (> 200 mm/an) conduisaient à la formation d'allophanes alors qu'un drainage plus faible (< 200 mm/an) conduisait à celle de l'hallowysite. Si le drainage est un facteur de formation des minéraux, il est également un facteur de conservation de l' "état allophanique".

### 1.3.3. Temps de formation

Il est toujours difficile de préciser les temps de formation de tel ou tel minéral et plus encore de déterminer avec précision la durée d'un processus de pédogenèse telle l'Andosolisation.

Cependant, les sols volcaniques présentent un avantage fondamental du fait que le temps zéro de leur évolution soit fixe puisque défini au moment du dépôt volcanique. Pourtant, assez peu d'auteurs se sont risqués à préciser des temps de formation : HETIER a montré par une étude chronologique dans le Massif Central que les Andisols atteignent leur maturité en 4 à 5000 ans sous climat tempéré (HETIER, 1975). Au Japon les propriétés vitriques ( $A_{lox+1/2Feox} > 0,4\%$ ) seraient atteintes en quelques centaines d'années alors que les propriétés andiques ( $A_{lox+1/2Feox} > 2\%$ ) n'apparaîtraient qu'en quelques milliers d'années à partir du temps zéro (SHOJI et al., 1993).

La figure n°2 (ci-contre) reprend les résultats d'une étude réalisée sur les temps de formation des minéraux caractéristiques, au Chili dans un milieu plus comparable à celui qui nous préoccupe (BESOAIN et SEPULVEDA, 1980). Nous observons donc que le temps nécessaire à la formation des minéraux allophaniques s'exprime en siècles.

## **1.4. Caractéristiques et propriétés des andisols**

### **1.4.1. Caractéristiques morphologiques**

#### **1.4.1.1. Andisols andiques**

Les caractéristiques morphologiques des Andisols (anciennement appelés Andosols) sont à l'origine même de leur nom. En effet, ce terme dérive du japonais An=noir et Do=sol. Il est à noter d'ailleurs que ce terme, employé dans toutes les classifications, est très peu usité au Japon où l'on préfère utiliser le terme "volcanic ash soil" (Cf. supra).

Ainsi la morphologie des Andisols est souvent associée à la présence d'un horizon A noir (très riche en matière organique). Cependant, en fonction des stades d'évolution, la morphologie des solums connaît de fortes variations puisqu'ils peuvent être successivement de type (A)C, AC, A(B)C ou ABC de l'ancienne classification française (CPCS 1967).

L'horizon morphologiquement diagnostique est toujours naturellement le A dont la propriété de thixotropie est traditionnellement associée aux stades allophaniques. Ce caractère thixotropique est très fréquemment utilisé à tort. En effet, il s'agit de ne pas confondre le toucher onctueux en conditions humides, du changement d'état (de semi-rigide à fluide) sous pression, qui seul peut être appelé thixotropie ; la thixotropie, dans son véritable sens, est exceptionnelle chez les Andisols (QUANTIN, 1995). Quoi qu'il en soit, cet horizon présente une structure finement grumeleuse, microagrégée et une texture apparente limoneuse.

Ces caractéristiques classiques des horizons A d'Andisol (LEAMY et al. 1980) ne s'appliquent en fait que pour des solums évolués ou ce A présente des propriétés andiques.

#### **1.4.1.2. Andisols vitriques**

La morphologie des horizons A vitriques est encore trop liée à celle des dépôts pyroclastiques parentaux pour être caractéristique. Ainsi "les limites d'horizons ne sont pas seulement dues à la pédogenèse mais peuvent être celles des dépôts" (QUANTIN, 1995). Ces solums polygénétiques ont donc une morphologie si particulière que le concept d'horizon pédologique s'en trouve modifié et l'utilisation de ce terme est donc quelque peu contestable. Relativement peu d'études ont été consacrées à ce type d'Andosol dont la morphologie peut être d'une complexité effrayante quand le nombre de ces dépôts pyroclastiques successifs devient très élevé (CRONIN et al., 1996).

### **1.4.2. Caractéristiques minéralogiques**

#### **1.4.2.1. Andisols andiques**

La fraction argileuse des Andisols a, comme nous l'avons vu, une composition variable en fonction du stade d'évolution du sol. Pourtant, les constituants minéraux types des Andisols sont des minéraux particuliers, à

organisation cristalline à courte distance (HERBILLON, 1983), longtemps appelés amorphes.

Ces minéraux ont été le sujet de très nombreux travaux (QUANTIN, 1991 ; DAHLGREN et al. 1993 ; WADA, 1989 ; YOSGINAGA, 1988 ; WADA, 1980 ; WADA, 1986) et sont donc désormais fort bien connus. Il existe deux groupes de constituants majeurs dans la phase colloïdale des Andisols : les minéraux allophaniques (Allophanes et/ou Imogolite) et des complexes organo-aluminiques ou organo-ferriques. Ces deux pôles correspondent aux différentes conditions physico-chimiques déjà mentionnées : proche de la neutralité pour le pôle allophanique et acide pour les complexes. Les allophanes - expression préférée à allophane car la gamme de composition molaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est large (entre 2 et 1 voire moins de 1)- sont constitués de petites sphères creuses de 3,5 à 5,5 nm de diamètre, constituées elles-mêmes par une seule couche octaédrique enrobant une couche tétraédrique incomplète (ROBERT et HERBILLON, 1990).

Par ailleurs, la présence d'argile du type halloysite et kaolinite est un élément récurrent dans les descriptions de la phase minérale fine des Andisols.

Naturellement, la minéralogie des fractions sableuses est sous la dépendance directe du matériau originel. En milieu pyroclastique, ce sont les verres volcaniques souvent associés à des plagioclases qui dominent cette fraction.

#### 1.4.3.2. Andisols vitriques

Par définition, la constitution minéralogique de ces sols est dominée par les verres volcaniques et autres minéraux primaires cristallisés. Les minéraux secondaires du type précédent sont encore peu présents ou sous une forme juvénile mal définie du type proto-allophane et/ou proto-imogolite.

### 1.4.4. Caractéristiques chimiques et physico-chimiques

#### 1.4.4.1. Andisols andiques

Les Andisols sont des sols à charges électriques variables où la présence de charges positives et négatives est sous la dépendance du Ph et de la concentration en électrolytes de la solution.

Il en résulte de très fortes variations de la capacité d'échange (anionique et cationique) avec le Ph : La CEC augmente avec le Ph alors que naturellement la CEA diminue. La saturation en base est généralement faible hormis dans les Andisols juvénils.

La présence en quantité importante de groupements fonctionnels du type Al-OH et Fe-OH explique les réactions spécifiques de ces sols avec divers ions, notamment les phosphates et les fluorures.

#### 1.4.4.2. Andisols vitriques

Les caractères précédents sont moins affirmés pour les Andisols vitriques. Les variations de CEC sont plus faibles ainsi que la valeur absolue de cette CEC qui est en général inférieure à 25 meq/100g. Corrolairement, les taux de

saturation sont toujours plus élevés. Les Andisols vitriques sont très fréquemment eutriques (QUANTIN, 1992).

### 1.4.5. Caractéristiques physiques et hydriques

#### 1.4.5.1. Andisols andiques

De faibles densités apparentes (0,4 à 0,9) sont caractéristiques des Andisols. Ce caractère n'est pas dû, comme on pourrait le penser, à une densité réelle des constituants particulièrement faible (les allophanes ont une  $D_r$  de 2,5 à 2,7) mais au développement d'une bonne structure porale. La distribution des pores connaît d'ailleurs une évolution notable et si, de jeunes Andisols possèdent généralement de nombreux macropores ( $> 100\mu\text{m}$ ) et peu de micropores ( $< 6\mu\text{m}$ ) le spectre poral semble inversé pour des Andisols plus âgés (NANZYO et al. 1993).

Le haut pouvoir de rétention en eau des Andisols est d'abord dû à ce grand volume poral avant de pouvoir être mis en relation avec la structure sphérique des allophanes qui peuvent piéger des molécules d'eau dans des espaces intrasphériques. On rencontre fréquemment des teneurs en eau supérieures à 100%, et la teneur en eau disponible (RU) est en général plus élevée que pour d'autres types de sol (valeur de 1 à 2,6 mm/cm) (NANZYO et al. 1993).

Il est bien connu que la rétention en eau des "volcanic ash soil" montre une forte hystérèse après dessiccation. On a ainsi une diminution de la rétention après séchage des échantillons à 1500 Kpa qui peut atteindre 90%. Cette dessiccation irréversible semble reliée aux teneurs en gels allophaniques (ANDRIESE et al. 1976).

Les sols allophaniques ont une haute limite de liquidité (LL) (parfois  $> 350\%$ ) et de plasticité (parfois  $> 150\%$ ) ; Certains ont même suggéré que ce caractère pouvait servir de critère pour estimer leurs teneurs en allophanes (WARKENTIN et MAEDA, 1980). Sur un graphique  $LL=f(IP)$  ( $IP$ =indice de plasticité) les points correspondant à des sols andiques sont situés sous la *A-line* d'Equation  $y= 0,7294x-11,1767$  et d'autant plus éloignés de celle-ci que les teneurs en allophanes sont élevées (C.f. Annexe II). Des études récentes ont confirmé l'hypothèse d'une réduction de l'indice de plasticité au séchage dans des sols contenant beaucoup d'amorphes (IWATA et al., 1990).

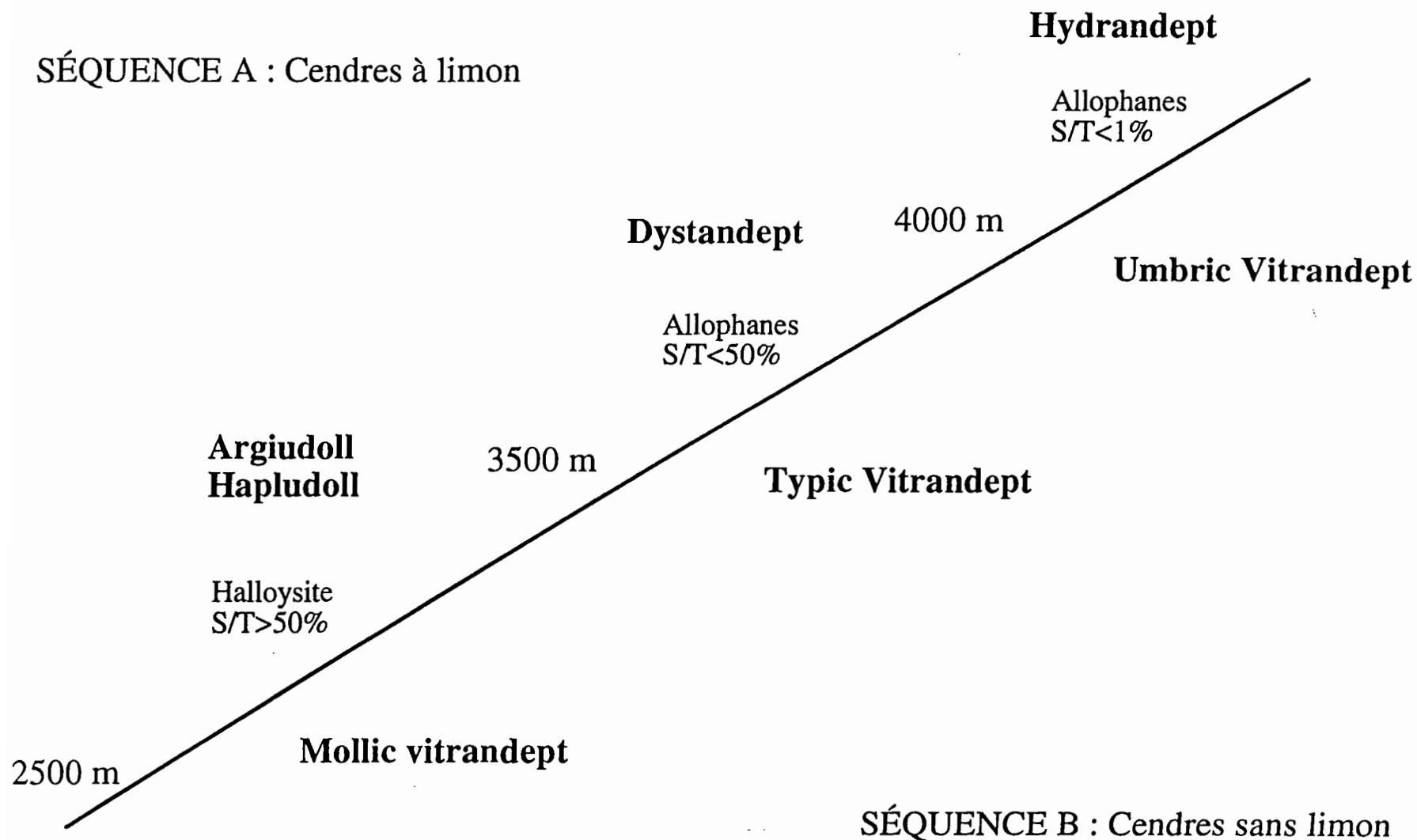
Les "Andisols vrais" semblent, de par la stabilité de leurs agrégats, peu sensibles à l'érosion hydrique. Il existe, d'ailleurs, une excellente corrélation entre ces deux paramètres d'érodibilité et de stabilité, comme l'a très bien montré EGASHIRA (EGASHIRA et al. 1983).

Pourtant, lors d'épisodes de dessèchement, la cohésion inter-agrégats et inter-particules faiblit. Alors la susceptibilité à l'érosion deviendrait très élevée.

#### 1.4.5.2. Andosols vitriques

Les Andisols vitriques ont des propriétés physiques beaucoup moins caractéristiques. Les  $D_a$  sont plus élevées, la rétention en eau plus faible (inférieure à 45% à la capacité de rétention et inférieure à 25% au point de flétrissement) (QUANTIN, 1985). On utilise d'ailleurs, comme critère de classification de la soil taxonomy pour distinguer les vitrands, le fait que la

Fig n°3 : Séquence de sols sur cendres volcaniques de la Sierra Equatorienne  
(COLMET-DAAGE, 1975)





rétenion en eau à 1500 Kpa soit inférieure à 15% (après séchage à l'air) ou inférieure à 30% (non séché). L'hystérèse entre dessiccation et humectation est encore supérieure à 40%. Mais, aucune relation simple n'a pu être établie entre taux de verres et changements des propriétés physiques (WARKENTIN et al. 1988).

### **1.5. "Volcanic ash soil" d'Equateur : travaux antérieurs.**

Les principaux travaux relatifs aux sols volcaniques d'Equateur sont dûs à COLMET-DAAGE et ses collaborateurs. De 1967 à 1969 cette équipe a publié une série d'articles sous le titre de "Caractéristiques de quelques groupes de sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques" (COLMET-DAAGE et al., 1967a ; 1967b ; 1969). Ces publications font un excellent inventaire des différents types de sols rencontrés sur ces cendres volcaniques depuis les régions tropicales chaudes jusqu'aux sommets Andins. Dans cet ensemble, nous nous concentrerons sur les éléments consacrés aux sols d'altitude et aux sols des régions relativement humides des vallées interandines telle celle de Quito :

- Les sols des hautes altitudes-Paramon

Ces sols sont fréquemment constitués d'une succession de niveaux de cendres séparés par des couches de ponces beiges grossières. L'horizon de surface est très noir et bien pourvu en matière organique ; COLMET-DAAGE note l'existence de sol noir enfoui vers 40 cm de profondeur. L'ensemble de ces sols ne présente ni la capacité en eau ni les C.E.C. élevées des sols fortement allophaniques que l'on rencontre sur le versant pacifique.

- Les sols des régions humides de la vallée interandine

En zone plus basse (2300 à 3000 m d'altitude), on trouve des profils comportant plusieurs niveaux de cendres et ponces superposés et la régularité des couches séparées par des niveaux ponceux permet de penser qu'il s'agit de dépôts aériens successifs non remaniés. Vers 5 m de profondeur on passe brutalement à la cangahua ou tuf durci.

Quelques années plus tard, une grande campagne de cartographie des sols d'Equateur a été effectuée (COLMET-DAAGE et ZEBROWSKI, 1982-1984). La notice générale réalisée par COLMET-DAAGE présente des séquences types de sols volcaniques dans différents milieux. Il est ainsi fait état d'une répartition altitudinale des sols le long de grandes séquences d'évolution pédogénétique. Cette répartition en séquences altitudinales est classique et a été observée depuis très longtemps dans d'autres milieux volcaniques (ZEBROWSKY, 1975 ; QUANTIN et al., 1978 ; LULLI et al. 1988...). Pour ce qui nous concerne directement, COLMET-DAAGE définit ainsi deux types de séquences altitudinales de sols dérivés de cendres : une séquence sur "cendres récentes à limon" et enfin sur "cendres récentes sans limon". La figure n°3 présente ces séquences simplifiées.

Ces éléments sont naturellement d'une grande importance et il s'agira de nous y référer à l'issue de notre propre étude. Pourtant, l'examen de ces séquences ne va pas sans poser un certain nombre de questions :

- COLMET-DAAGE ne définit pas les limites et les conditions d'appartenance à ces deux ensembles (cendres à limon et cendres sans limon). Ces concepts sont si flous, si mal définis, que leur utilisation est rendue difficile, voire impossible.

- Comme ZIDA, dans son travail sur les Andisols des Vosges, nous nous heurtons à un obstacle majeur dans les changements de critères de classification et les modifications des techniques analytiques employées (ZIDA, 1994) ; ZIDA conclut même que les comparaisons d'études réalisées avec les méthodes anciennes (réactif de TAMM + Dithionite de Na ; méthode SEGALLEN) et avec les techniques analytiques actuelles sont, en toute rigueur, impossibles. En effet, les réactifs autrefois employés pour solubiliser les constituants amorphes, conduisent à une surestimation permanente des teneurs en minéraux allophaniques (WADA, 1989).

- Bien qu'ayant signalé la présence d'horizon enfoui, COLMET-DAAGE a négligé l'aspect chronoséquentiel de la couverture pédologique, et les différents paleosols témoins de l'évolution des matériaux.

Depuis quelques années un grand effort a été réalisé sur l'étude des sols volcaniques indurés de la sierra Equatorienne (WINCKELL et ZEBROWSKY, VERA et LOPEZ, CUSTODE et al, 1993), la cangahua, qui résulte de cendres anciennes (ante-glaciaire). On a par contre largement délaissé l'étude des zones à cendres récentes (post-glaciaires).

Les travaux sur ces sols volcaniques Equatoriens sont donc tous relativement anciens. De plus, comme nous avons pu le constater, les différents travaux existants sur les sols volcaniques d'Equateur se placent dans des logiques de diagnostics à petite échelle alors que notre démarche de travail sur un bassin versant exige une résolution bien supérieure.

## CHAPITRE II

## **CHAPITRE II : Matériels et méthodes**

### **2.1. Caractéristiques générales du milieu**

#### **2.1.1. Situation géographique**

La ville de Quito est située à 15 Km au sud du parallèle zéro qui a donné son nom au pays. Cette capitale s'est construite sur un large replat du Pichincha, sorte de gradin au coeur de la vallée interandine. De par cette morphologie initiale la dynamique d'extension urbaine s'est développée dans l'axe de cette "marche" et ainsi la ville est aujourd'hui un long et fin couloir perpendiculaire à la ligne de plus grande pente du Pichincha.

Considérant les bassins versants élémentaires surplombant Quito, nous avons décidé de consacrer notre étude à l'un d'entre-eux : le bassin versant de la Rumihurcu. Ce choix s'explique par le fait que les opérations conjointes, menées par l'équipe du projet SISHILAD, d'analyse du fonctionnement hydrologique et du fonctionnement érosif, ont lieu sur ce même bassin. Le choix de cette équipe provient du fait que la représentativité de ce bassin par rapport à l'ensemble des flancs du Pichincha paraît excellente.

Ce bassin, d'une surface totale de 10,5 Km<sup>2</sup> s'étage de la ville de Quito à 2800 m d'altitude jusqu'au sommet du Volcan RUCU PICHINCHA à 4600 m d'altitude (Cf. ANNEXE III).

Les limites géographiques de ce bassin versant de la Rhumiurcu sont les suivantes :

Au Nord : 0°24'59" de latitude Sud  
78°35'56" de longitude Ouest  
Au Sud : 0°3'15" de latitude Sud  
78°24'12" de longitude Ouest

#### **2.1.2. Caractéristiques climatiques**

Le climat général des vallées interandine est difficile à déchiffrer de premier abord, puisqu'aux éléments de latitude et d'altitude (classique en milieu de montagne) se surimposent une dynamique des masses d'air particulièrement complexe. Nous sommes donc contraints de ne garder que les éléments principaux.

Ainsi pour QUITO (Voir ANNEXE IV) :

- température moyenne annuelle : 13° avec une variabilité moyenne faible (température moyenne minimale de 8°C)

- pluviométrie moyenne annuelle : 1250 mm

Existence d'une saison plus sèche marquée de juin à septembre avec des précipitations moyennes mensuelles de 55 mm contre 135 mm pour les autres mois.

- Humidité relative moyenne annuelle : 75 %

Ces valeurs moyennes ont le mérite de donner une idée globale des conditions climatiques rencontrées dans cette zone, mais elles sont largement insuffisantes pour décrire celles qui président à l'évolution des sols. Une étude détaillée de ces différentes conditions est en cours. A l'heure actuelle, nous ne disposons que de quelques résultats globaux (CANADAS, 1983) :

- Partie basse du bassin : de 2500 à 3000 m
  - + Précipitation moyenne annuelle entre 1000 et 2000 mm
  - + Température moyenne annuelle entre 12 et 18°C
- Partie moyenne du bassin : de 3000 à 3500 m
  - + Précipitation moyenne annuelle entre 1500 et 2000 mm
  - + Température moyenne annuelle entre 6 et 12°C
- Partie Haute du bassin : de 3500 à 5000 m
  - + Précipitation moyenne annuelle entre 500 et 1000 mm
  - + Température moyenne annuelle entre 3 et 6°C

Ainsi, la partie la plus haute du bassin versant étudié devrait connaître une pluviométrie plus faible. Pourtant, il ne fait pas de doute que l'humidité relative y est de manière permanente très élevée de par la raréfaction et le refroidissement de l'air qui abaissent son point de saturation.

Nous disposons par ailleurs de mesures de température du sol à Quito (COLMET-DAAGE, 1967) :

Profondeur	Température moyenne annuelle	Temp. moy. du mois la plus	
		Faible	Forte
30 cm	16,2	15,4	17,6
50 cm	16,7	15,8	18,0

Tableau n°1 : Température du sol à Quito

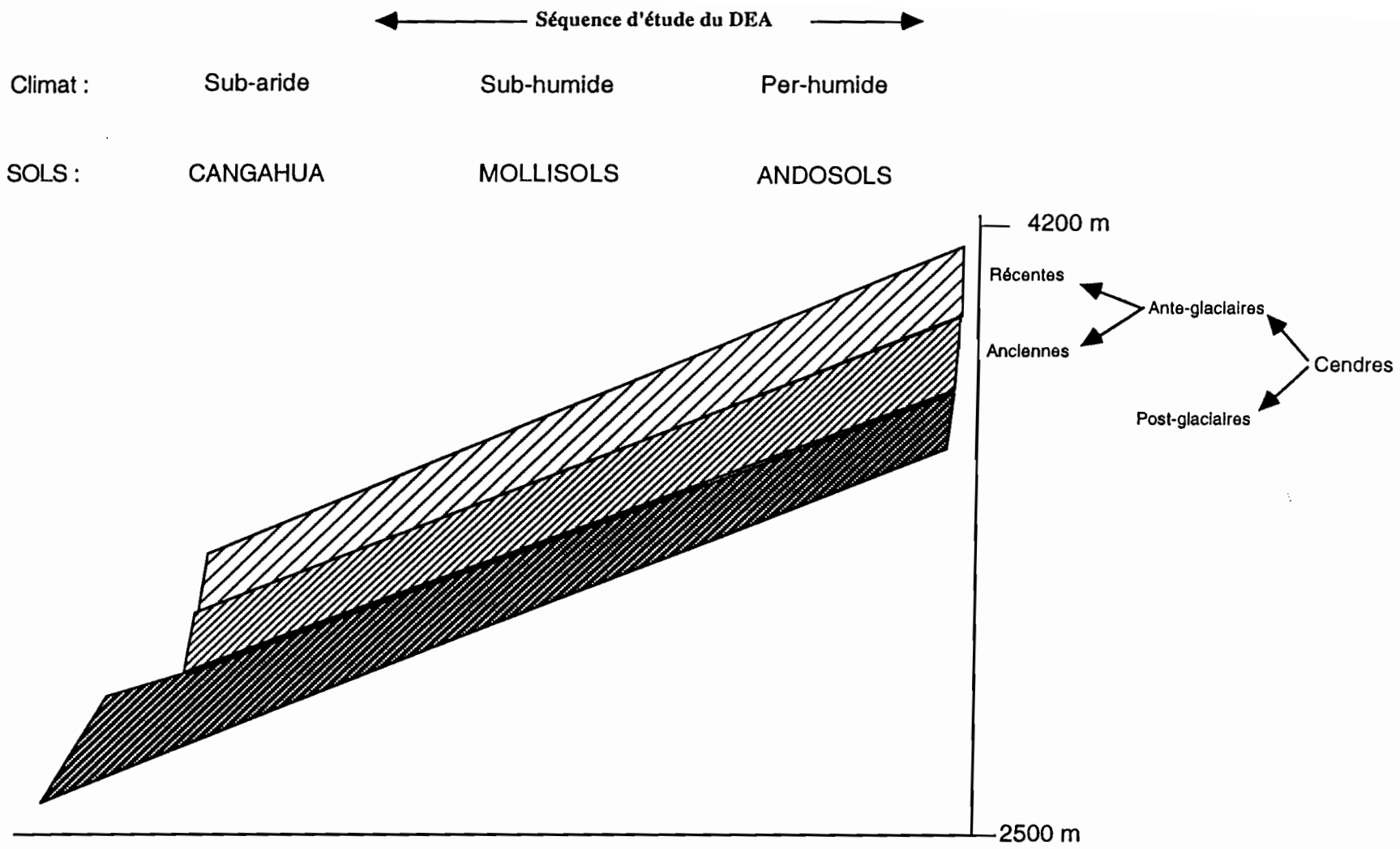
Les variations journalières de la couche la plus superficielle (5 cm) sont quant à elles les suivantes :

- à 7 h le matin : 12,4 °C
- à 13 h : 19,2 °C
- à 19 h : 18,2 °C

Dans les horizons plus profonds (30 cm), on ne note aucune variation journalière.

Afin d'alimenter par la suite, la clef de classification de la Soil Taxonomy, nous nous devons de caractériser, à partir de nos données, les régimes climatiques des différentes zones. Un certain nombre de critères de définition de ces régimes nous faisaient défaut et nous avons donc défini les conditions existantes par une simple élimination des autres régimes possibles (élimination des régimes Xérique, Ustic...).

Dans un soucis de simplification nous ne considérerons que les deux situations extrêmes : Paramo (4600-3800) et Quito (3800-2800).



**Fig n°4 : Climatoposéquence globale des sols de la vallée interandine de Quito (QUANTIN, 1993)**

	PARAMO	QUITO
SOIL MOISTURE REGIME	UDIC Courte saison sèche	UDIC Courte saison sèche
SOIL TEMPERATURE REGIME	ISOFRIGID T° Moyenne < 8°C Moins de 5°C de Variation Annuelle à 50 cm	ISOMESIC 8°C < T° Moyenne < 15°C Moins de 5°C de Variation Annuelle à 50 cm

Tableau n°2 : Les régimes climatiques de la Soil Taxonomy pour la zone d'étude

### 2.1.3 Caractéristiques géologiques

La roche en place est constituée, depuis le sommet du Pichincha jusqu'à la ville de Quito, par des laves andésitiques résultantes d'éruptions quaternaires.

La composition de ces laves est la suivante : (KENNERLY, 1980 cité par LACHOWICZ, 1991)

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
59,2	0,68	18,10	6,6	0,1	3,1	5,85	4,95	1,15	99,73

Tableau n°3 : Composition de l'andésite du Pichincha

Cette lave est enfouie sous les dépôts résultant des éruptions successives du Quaternaire. Deux générations de projections pyroclastiques marquent le volcanisme Quaternaire Equatorien. Les dépôts anciens sont antérieurs et contemporains de la dernière glaciation. Les projections récentes sont, par contre, postérieures à la dernière débacle glaciaire. La première génération, ou cendres anciennes, a globalement un aspect de tuf soudé dans lequel sont intercalées d'épaisses couches de lapilli et de ponce. Ce sont ces formations qui ont subi une induration liée, pour une part, à des conditions géologiques de mise en place et d'autre part à des évolutions pédogénétiques. Ces formations prennent le nom local de Cangahua (équivalant plus ou moins au Tepetates mexicains). La deuxième génération, ou cendres récentes, se caractérise par une superposition de couches décimétriques à multi-décimétriques de lapilli et de cendres de tailles diverses. Ces retombées qui recouvrent uniformément les paysages interandins, semblent concordantes avec la topographie actuelle et sont les seuls pyroclastes présents sur les hautes terres froides des paramos. (WINCKELL et ZEBROWSKY, 1993). Il est établi que les conditions climatiques d'évolution ont été bouleversées entre ces deux époques : conditions humides et chaudes pour les cendres anciennes et conditions plus sèches pour les dépôts post-glaciaires.

Il faut souligner que notre bassin d'étude est constitué de dépôts de la seconde phase éruptive sans que l'érosion n'ait mis à nu la cangahua antérieure (C.f Figure n°4 ci-contre d'après P. QUANTIN, 1993) .

Ces pyroclastes plus récents, sont plus acides et caractérisés par la présence de phénocristaux et de microphénocristaux d'amphibole et plus rarement de biotite. Les verres volcaniques possèdent le plus souvent des inclusions composées d'hypersthènes et de plagioclases basiques (An 35-49) (LACHOWICZ, 1991).

#### **2.1.4. Caractéristiques géomorphologiques**

A l'examen des données ci-dessus, et notamment de la concordance entre dépôts et relief, on peut affirmer que les traits géomorphologiques majeurs sont relativement figés depuis 10 000 ans. Le relief de notre bassin d'étude, comme celui de toute la zone, est évidemment fortement marqué par les derniers épisodes glaciaires. En effet, le bas de notre bassin présente (par photo-interprétation) la morphologie classique des cônes de déjection glaciaire.

Notre bassin-versant se caractérise par ailleurs par la présence de pentes très fortes : 60% du bassin est constitué de pentes > à 60%.

Les profils topographiques transversaux de ce bassin versant se modifient sensiblement de sa partie supérieure à sa partie inférieure :

- Partie haute : pentes fortes du thalweg et versants légèrement concaves.
- Partie médiane : section en V (parfois assez ouverte) et versants légèrement convexes.
- Partie basse : section en U à bordures verticales (canyon...).

La quasi absence d'activité érosive hiérarchisée de type rigole et ravine doit être notée. Par contre, on assiste à de fréquents mouvements de terrain en masse. A l'heure actuelle, ces mouvements de natures diverses (coups de cuillère, sapements de berges..) ont une ampleur modeste. Aucune relation simple et évidente ne peut expliquer la répartition spatiale de ces faciès puisqu'ils s'observent aussi bien dans le Paramo que dans la partie médiane. Il semble toutefois qu'un certain nombre d'activités humaines (pâturages mais aussi réseau hydraulique défectueux) soit à l'origine de ces mouvements (JANEAU et RISSER, communication personnelle)

#### **2.1.5. Cadre pédologique de l'étude**

L'unique document récent sur les sols de ce bassin réside dans la cartographie des paysages naturels d'Equateur réalisée en 1989 par WINCKELL, ZEBROWSKY et SOURDAT. Cette carte au 1/1 000 000 ne permet évidemment pas de répondre de façon satisfaisante à notre problématique, mais elle a le mérite d'aborder les grands types de sols présents sur les flancs du Pichincha. Les auteurs ont ici distingué trois types en étagement altitudinal sur couverture de projections pyroclastiques récentes.

Depuis le sommet du volcan jusqu'à Quito on trouverait successivement (WINCKELL et al., 1989) :

- Des Andosols bruns désaturés
- Des sols isohumiques noirs limono sableux
- Des sols peu évolués sableux sur cendres récentes



### 2.1.6. Végétation, occupation du sol

On distingue classiquement dans cette zone de montagne un étagement altitudinal des différents types de végétation ou d'occupation du sol (JANEAU, 1996).

- de 2800 à 3000 m : zone périurbaine de Quito. Ce sont des quartiers populaires d'installation récente et illégale. On assiste à une extension rapide de cette zone suivant une dynamique de front pionnier qui remonte peu à peu la pente.

- de 3000 à 3300 m : ancien cordon vert protecteur de QUITO. On observe des lambeaux de forêts d'Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) brûlées peu à peu et remplacées par des zones de culture (pomme de terre (*Solanum tuberosum*), haricots (*Phaseolus vulgaris*), maïs (*Zea mays*), quinoa. (*Chenopodium*)

- de 3300 m à 3700 m : pâturages (bovins, lamas), végétation herbacée, dont en partie des prairies artificielles de kikyou (*Pennisetum clandestinum*) associées avec des légumineuses du type trèfle blanc (*trifolium repens*). Cette zone semble soumise à un surpâturage intensif. Ce fait se marque aussi bien par la présence de terrassettes de surpâturage que par le faible couvert végétal résiduel après passage des troupeaux.

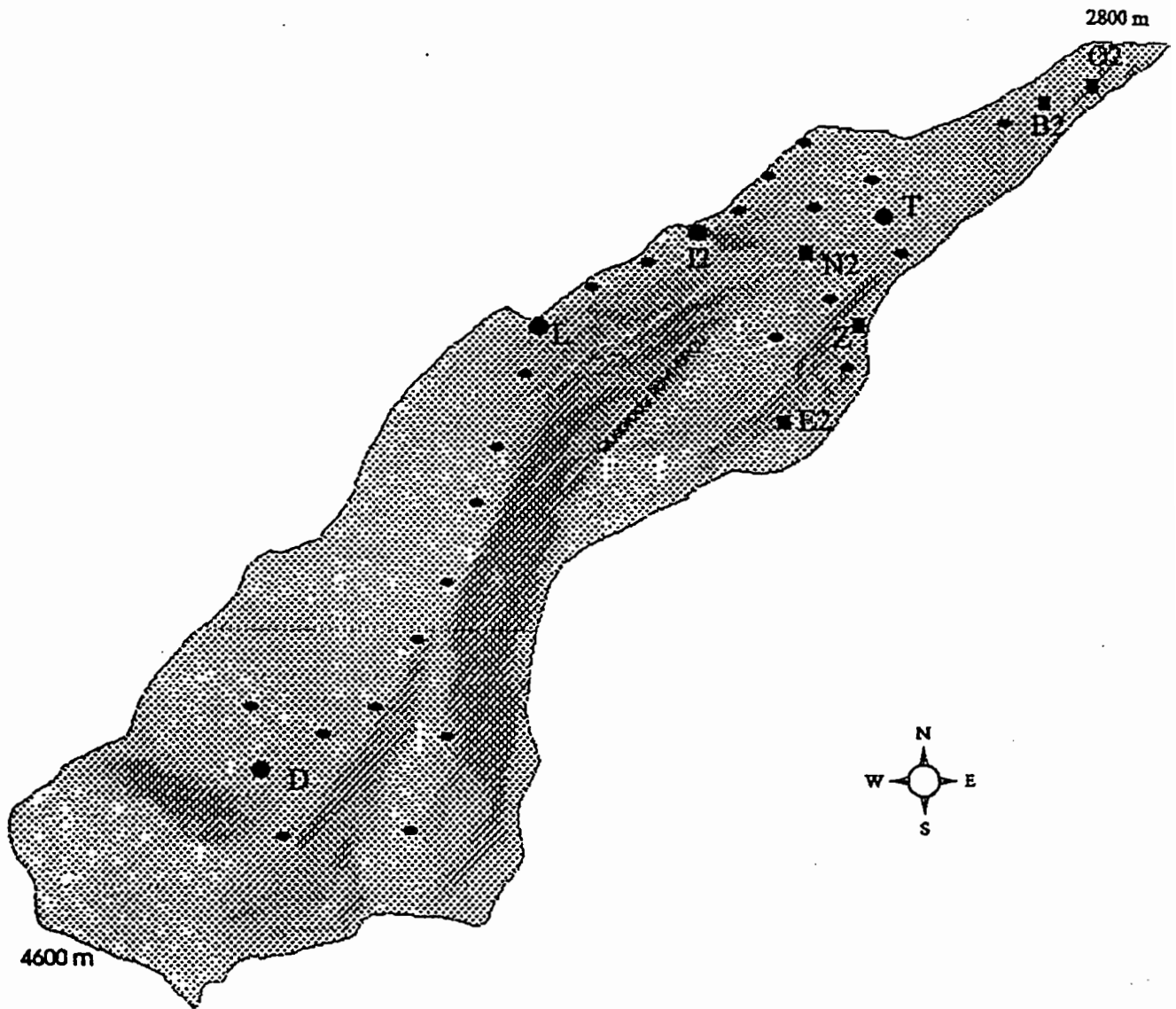
- de 3700 m à 4300 m : paramo. Prairie d'altitude, végétation herbacée en tapis de graminés (*Festuca*, *Calamagrostis*).

Hormis pour l'étage alpin du Paramo, nous ignorons le type de végétation naturelle tant ce bassin a été marqué, et depuis fort longtemps, par la présence humaine. Nous avons, en effet, découvert des débris de poterie à une profondeur de plus de deux mètres, ce qui atteste d'une présence humaine il y a plus de deux mille ans. Sur critères climatiques, on peut néanmoins penser, que notre versant prend place à la transition entre la forêt andine d'altitude et l'étage alpin à herbacées (avec peut-être une transition via un sub-paramo à espèces buissonnantes).

## 2.2. Choix des solums d'étude

Le choix d'un lieu d'étude est la résultante des données du milieu, combinée à des objectifs. C'est à partir de cette constatation, que nous avons défini et mis en place notre "stratégie" d'étude. Notre problématique étant en relation directe avec la stratigraphie des dépôts volcaniques, nous avons éliminé les espaces géographiques susceptibles d'avoir connu des événements remettant en cause cette disposition pyroclastique. Ainsi les zones concaves ou de fortes pentes (risques de colluvionnement), les zones proches du talweg (risques d'alluvionnement) et les zones correspondant à l'ancienne moraine glaciaire, ont été délibérément exclues des espaces à prospecter.

Fig n°6 : Localisation des Profils décrits



- Profils décrits
- Profils échantillonnés (Analyses de bases)
- Profils d'étude complète

## 2.3. Méthodes d'analyse

### 2.3.1. Tests et mesures de terrain : densité apparente, scissiométrie, test NaF

Nous avons estimé la densité apparente à partir de la masse d'un échantillon prélevé par un cylindre de volume connu (100 cm<sup>3</sup>). Afin de réduire le risque que pouvait représenter un seul prélèvement sur un site particulier, nous avons, pour chaque horizon, réalisé une série de trois prélèvements.

En vue d'une première approche des comportements mécaniques des sols et horizons rencontrés, nous avons pratiqué une série de tests scissiométriques. Le test au scissomètre consiste à faire pénétrer dans un sol un moulinet, à quatre pales orthogonales entre elles, porté par un train de tiges, puis à cisailer ce sol autour de ces pales par une mise en rotation du moulinet (COLLECTIF, 1983). Classiquement, ce test est pratiqué verticalement, mais nous avons choisi de pratiquer des essais au niveau de chaque horizon, et donc horizontalement.

Pour pouvoir estimer, sur le terrain, la présence et les teneurs (même très grossièrement) en minéraux allophaniques, le test qui nous est apparu le plus adapté est le test au NaF. Celui-ci est basé sur la réactivité des fluorures sur les groupements Al-OH. En pratique, quelques grammes de terre fine sont déposés sur un papier filtre, imprégné de phénolphtaleïne. Est ensuite mesuré le temps nécessaire à la coloration du papier en rose, ceci après que l'échantillon ait été arrosé de quelques gouttes de Fluorure de Sodium. En principe, la réaction devrait être d'autant plus vive, le temps d'autant plus court que la teneur en allophane est élevée.

### 2.3.2. Analyses courantes

Ces analyses de bases ont été réalisées au laboratorio de Edafologia de l'Instituto National de Investigaciones Agro-Pecuaria (INIAP) de Tumbaco (Equateur).

#### 2.3.2.1. C, N, P

Le carbone organique a été dosé par la classique méthode de WALKLEY et BLACK soit une oxydation par voie humide réalisée par le bichromate de potassium (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) en milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré. Le K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> en excès est titré en retour par le sulfate ferreux (FeSO<sub>4</sub>).

L'azote total est mesuré par la méthode KJELDAHL qui correspond à une minéralisation en (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ; L'ammoniac formé est ensuite déplacé du sulfate d'ammonium par addition de soude, que l'on dose par réaction acide-base.

Le phosphore présent a été estimé par la méthode de OLSEN.

#### 2.3.2.2. C.E.C. ph 7, taux de saturation

La capacité d'échange cationique a été mesurée par saturation du sol par une solution d'acétate d'ammonium à Ph 7. L'excès d'ammonium est éliminé par du méthanol, puis l'ammonium fixé est titré par de l'acide sulfurique N/10.

Les cations d'échanges ont été extraits par une solution saline à Ph 7 et dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

### 2.3.2.3. Rétention en eau à différents Pf

La mesure des capacités de rétention en eau à Pf 3 (100 KPa) et Pf 4,2 (1500 KPa) est réalisée via les méthodes classiques de presses à membranes, sur échantillons séchés, à l'air mais également sur échantillons conservés humides.

### 2.3.2.4. PH

Nous l'avons mesuré dans l'eau et dans le KCl N (rapport 1/2,5)

### 2.3.2.5. Limite de changement d'état

Les limites d'ATTERBERG ont été estimées par les méthodes classiques de CASSAGRANDE :

La limite de liquidité (LL) se définit par la quantité d'eau contenue dans un échantillon de terre fine quand un sillon de dimension standardisée se referme sur 1 cm en 25 coups de l'appareil de CASSAGRANDE.

La Limite de Plasticité est défini comme la teneur en eau pour laquelle on peut former à la main des cylindres de 4 mm de diamètre qui se segmentent spontanément en des tronçons de 1 cm.

## 2.3.3 Extraction Al, Fe et Si

Des extractions de Al, Fe et Si ont été réalisées avec deux réactifs considérés comme sélectifs :

- L'oxalate d'ammonium 0,2 M ajusté à pH 3 par l'acide oxalique (réactif de TAMM) qui solubilise l'Al et le Fe actifs des minéraux allophaniques et des complexes organo-aluminiques et ferriques, ainsi que le Si des minéraux allophaniques. Cette extraction a été réalisée par agitation d'une suspension de sol à froid (20°C) et à l'obscurité pendant 4 heures (rapport sol/solution de 1/80). La suspension est centrifugée et Al, Fe et Si sont dosés dans le surnageant par spectrométrie d'absorption atomique (Alox, Feox et Siox).

- Le pyrophosphate de Na 0,1 M (Ph 10) qui ne solubilise en principe que l'Al et le Fe des complexes organométalliques. Cette extraction a été réalisée par agitation d'une suspension de sol à froid (20°C) et à l'obscurité pendant 16 heures. La solution est centrifugée (18 000 t pendant 20 mn) et Al et Fe sont dosés dans le surnageant par spectrométrie d'absorption atomique (Alpy et Fepy).

La teneur en allophanes de chaque échantillon a été estimée à partir du rapport atomique (Alox-Alpy/Siox). Ce rapport est caractéristique du type d'allophane présent (Al-rich ou Si-rich) et permet de calculer la teneur en allophanes par multiplication de la valeur de Siox par un facteur approprié. Ne sont pris en compte dans ce calcul que les échantillons pour lesquels le rapport Al/Si compris entre 1 et 4. En effet, si certains auteurs (PARFITT et KIMBLE, 1989) ont proposé d'étendre le domaine de ce calcul à des valeurs inférieures à 1 ou supérieures à 4 l'ensemble des chercheurs s'accordent pour dire avec DAHLGREN (DAHLGREN et al., 1993) que l'existence d'allophanes naturels possédant un rapport atomique Al/Si non compris entre 1 et 4 n'a jamais été positivement démontrée.

### **2.3.4. Rétention des phosphates**

Nous avons déjà mentionné que la capacité de rétention des phosphates est une caractéristique essentielle des Andisols. Elle est même un des principaux critères de classification des Sols Andiques. Nous avons déterminé cette capacité par la méthode de BLAKEMORE : agitation pendant 24 heures d'une suspension de sol dans une solution concentrée (0,1 M) en phosphates puis dosage par chromatographie ionique du phosphate résiduel.

### **2.3.5. Teneur en verres volcaniques**

Le taux de verres volcaniques présents dans la fraction 0,02-2 mm est un élément fondamental puisque situé à l'origine de la clef d'entrée dans l'ordre des Andisols de la Soil Taxonomy. Par ailleurs, cette teneur en ce qu'elle est le témoin du niveau d'altération qu'a connu un horizon, est un élément essentiel de la description des Andisols vitriques.

Or il s'avère qu'aucune méthode d'analyse de ce taux de verres ne donne entièrement satisfaction. En effet, la méthode préconisée par la Soil Taxonomy est une méthode de comptage en microscopie optique polarisée. Cette technique, outre le fait qu'elle nécessite une longue période de temps ainsi qu'un analyste habitué à cette pratique, pose d'évidents problèmes de représentativité et de répétabilité.

Plusieurs solutions s'offraient à nous pour contourner cette difficulté :

- Une attaque triacide, ne laissant que les minéraux non-altérables, nous aurait permis, par différence, d'estimer la masse des minéraux altérables dont les verres. Cette méthode, élégante quant à la distinction entre minéraux altérables et non-altérables, posait le problème de ne pas fournir de résultats comparables à ceux ne faisant état que des verres, et nous interdisait, en toute rigueur, l'utilisation des critères en vigueur dans la soil Taxonomy.

- Une autre solution s'avera plus facile à mettre en oeuvre et plus compatible avec nos objectifs de classification. Il s'agit d'une méthode, mise au point récemment par LOWE et GREEN, de dissolution des verres par une solution concentrée d'acide fluorhydrique (HF) (LOWE et GREEN, 1992). Il s'agit d'utiliser le pouvoir de dissoudre les verres de l'acide fluorhydrique. Après avoir défini expérimentalement le temps nécessaire à cette dissolution sans attaques des autres minéraux (30 s) LOWE et GREEN, par contrôle avec les méthodes microscopiques, affirment que cette méthode est applicable aussi bien pour la caractérisation des Andisols que pour estimer les teneurs en verres dans des paleosols et des dépôts pyroclastiques. La réalisation pratique de cette technique ne pose aucune difficulté (si ce n'est le danger d'utilisation de HF concentré). Un échantillon de masse connue est plongé 30 s dans une solution d'acide hydrofluorique à 40% puis une solution d'acide borique à 0,1 M est utilisée pour neutraliser l'excès de HF. Une simple pesée permet de connaître la masse des "non-verres" et donc, par différence, la teneur en verre. Nous avons pratiqué cette méthode sur la fraction 0,05-2 mm. Cette méthode chimique présente l'avantage considérable, par rapport à la technique microscopique, d'être simple et rapide.

## CHAPITRE III

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

### 3.1. Chronoséquence des dépôts volcaniques

#### 3.1.1. Examen des 45 profils

Au cours de cette première étape, il est rapidement apparu que les profils étudiés n'étaient pas monocycliques et se développaient dans des dépôts pyroclastiques superposés.

Il convenait donc, avant de décrire les sols, de comprendre la chronologie de la mise en place de ces pyroclastes. Nous avons donc cherché, sur l'ensemble du bassin, des niveaux repères qui pouvaient être reliés à la téphrostratigraphie établie par différents auteurs et synthétisée dans un article récent de HALL et MOTHEs (HALL et MOTHEs, 1993).

Les travaux de ces auteurs peuvent être résumés dans le tableau n°4 ci dessous.

Profondeur	Faciès	Age estimé (année B.P.)
0-65	Sableux Noir	290
65-105	Lapilli Blanc	980 +/- 80
105-145	Sableux-Lapilli Noir	1400 +/- 80
145-215	Sableux Beige	1400-2000
215-220	Lapilli Marron	2305 +/- 65
220-425	Limono-sableux Marron à noir	2350-8200 (7 éruptions)
425-485	Lapilli Blanc	8210-8500
485-560	Argileux Marron-rose	11500

Tableau n°4 : Téphrostratigraphie (d'après HALL et MOTHEs, 1993)

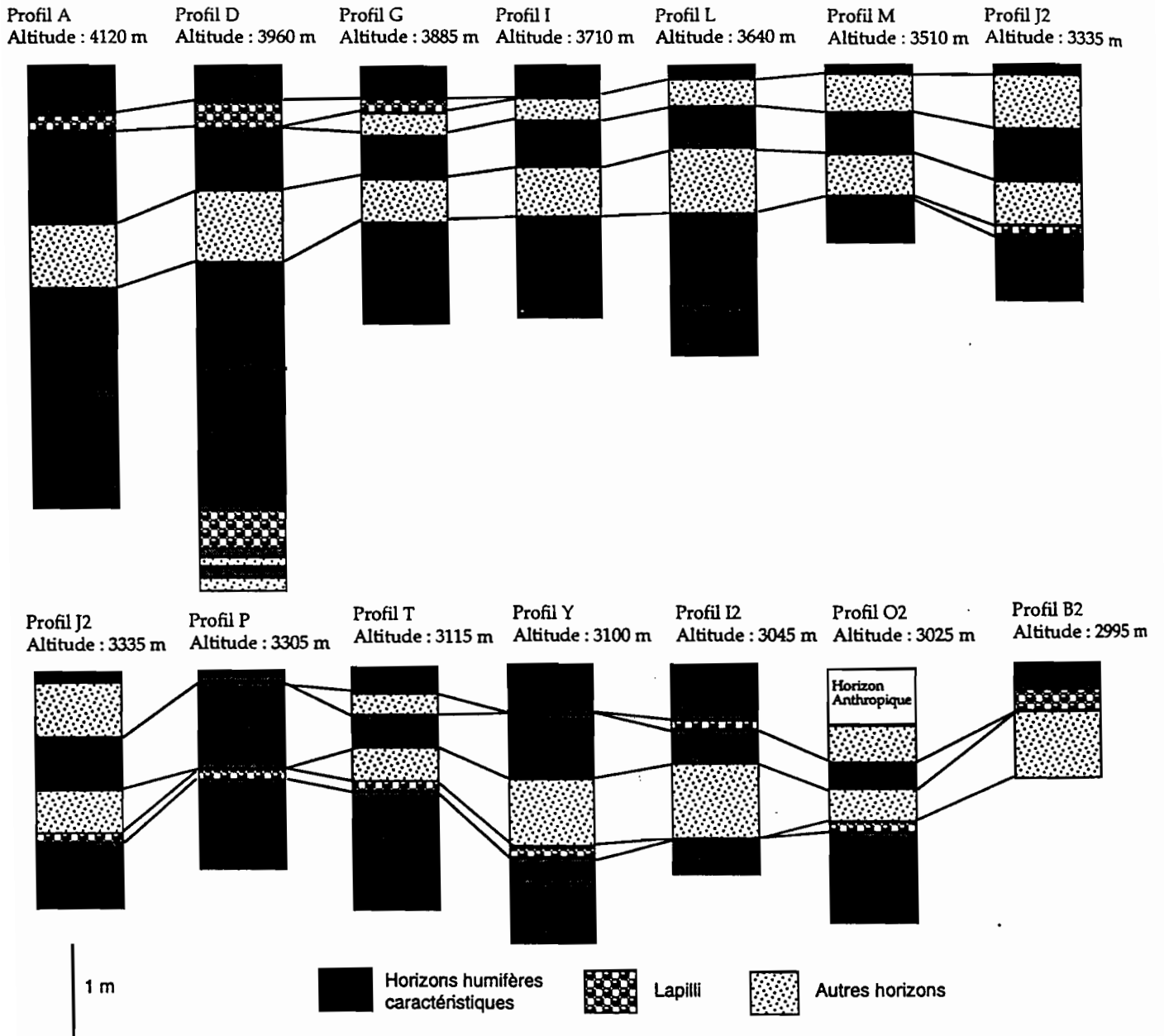


Fig n° 7 : Suivi des horizons de référence le long de la séquence altitudinale



Nos propres descriptions des différents niveaux reconnus sont schématisées dans la figure n°7 ci-contre.

Nous devons noter que notre suivi de la stratigraphie est basé sur la position relative d'une couche par rapport à des niveaux caractéristiques et que ces niveaux repères sont de deux types :

- Les trois couches de lapilli que l'on observe à différentes profondeurs
- Les horizons noirs humifères qui constituent une succession de paléosurfaces

Nous observerons cependant l'existence de variations importantes dans la succession des différents niveaux. En effet, sur une large zone d'altitude moyenne du versant (du profil I au profil Y), l'horizon supérieur de lapilli est absent alors qu'un mince dépôt de lapilli apparaît plus en profondeur sur cette même zone (à partir du profil J2). Par contre, la présence constante des horizons humifères enfouis est remarquable. Ces horizons peuvent être suivis sans difficulté depuis les plus hautes altitudes jusqu'à Quito.

### **3.1.2. Profil théorique et âge des dépôts**

Les variations observées nous imposent une tentative de reconstitution d'un profil théorique reprenant l'ensemble des couches reconnues. Ce sont en effet ces niveaux qui permettront un croisement faciès-âge afin d'associer un niveau à une série d'éruptions d'une part, et d'autre part de dater la mise en place de chaque dépôt.

La figure n°8 ci-dessous présente ce croisement entre un profil théorique dérivant de l'observation de 45 solums et les données de datation des éruptions du Pichincha de HALL et MOTHESES.

La première constatation qui doit être faite à la lecture de ce croisement réside dans la très bonne corrélation entre ce profil théorique et la succession des événements volcaniques du Pichincha. Cette remarque nous permet d'affirmer les deux points suivants :

- les niveaux observés correspondent à une succession de dépôts et non à une différenciation pédologique.

- il y a unicité des dépôts qui proviennent bien des éruptions du seul Pichincha. En effet, la présence à quelques dizaines de kilomètres d'autres centres d'émission volcaniques aurait pu perturber la stratigraphie des dépôts pyroclastiques sur tout ou partie de notre versant.

Malgré ceci, une certaine imprécision subsiste quant aux datations elles-mêmes. Par exemple, pour la période 2300-8000, on compte sept éruptions de basses intensités sans qu'il soit possible de les distinguer sur le terrain.

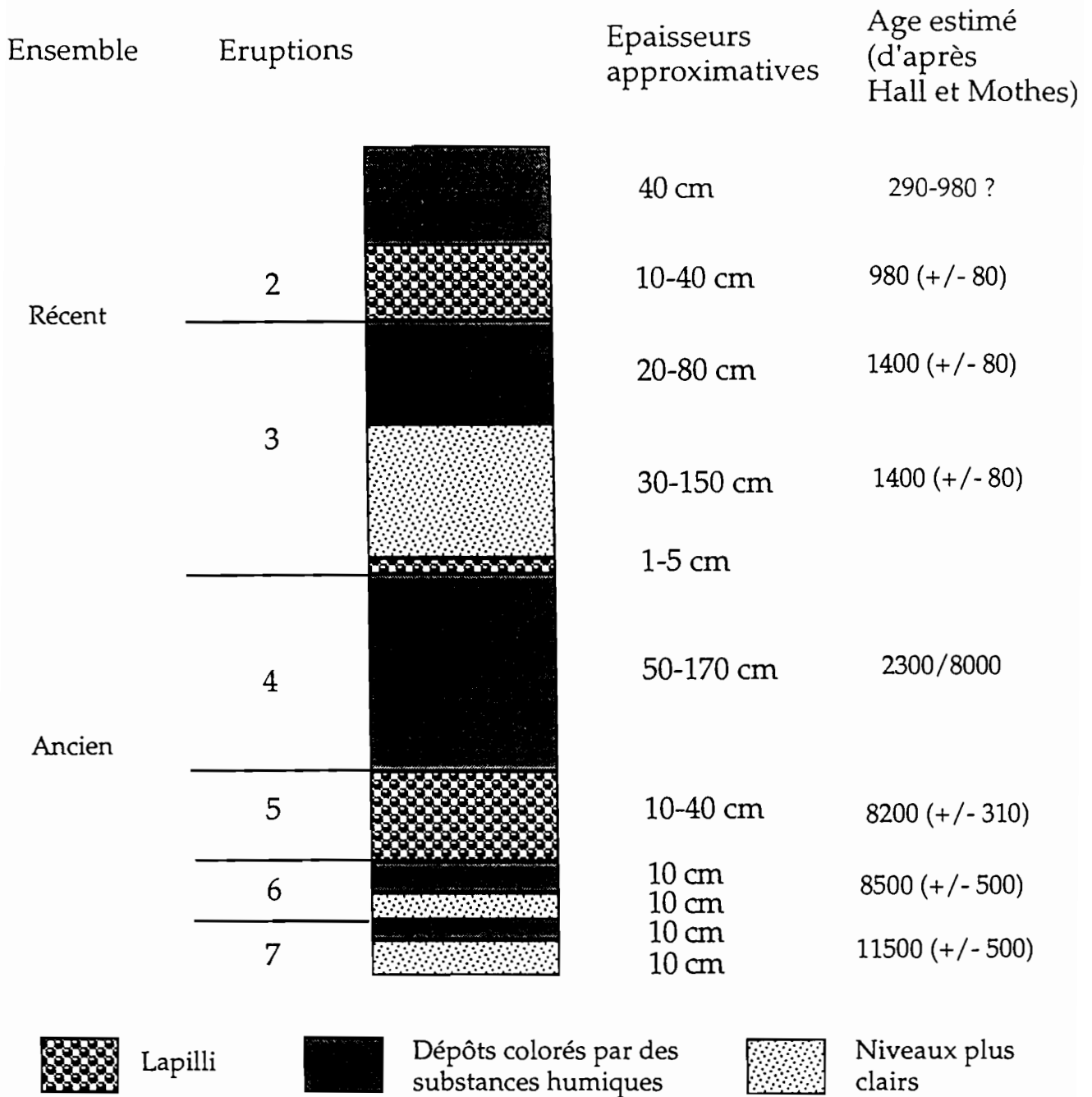


Fig n°8 : Profil théorique et téphrostratigraphie des sols du volcan Pichincha<sup>1</sup>

Nous devons remarquer que la dernière éruption (dont de nombreux documents historiques font état) est très récente puisque elle date de moins de trois siècles. Ainsi, les matériaux de surface sont partout très jeunes.

Le temps entre deux éruptions est également très court puisque pour la période 0-8500 ans le pas de temps moyen entre deux éruptions successives est de l'ordre de 690 ans. On ignore l'âge exact des éruptions les plus anciennes, mais il

<sup>1</sup> les matériaux dérivants des diverses éruptions seront ici symbolisés par des chiffres arabes comme l'imposent les règles de la Soil Taxonomy et non en chiffre romain comme cela est traditionnellement le cas pour les pédologues français.

PROFIL D  
 Altitude : 3960 m  
 Paramo  
 510 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	Da	NaF (cf leg.)	Alox+1/2 Feox (%)	Alpy/Alox	Siox (%)	Allophanes (%)	Ret P. (%)	Verres (%)
Avi	0-42	6	0,76	+++	0,77	0,86	0,1	n.c.	83	32
2 Mvo	42-57	1,5			0,21	0,63	0,05	n.c.	31	20
3 Avi	57-135	3	1,10	+++	1,54	0,19	0,86	4,3	77	40
3 C	135-215	0,62	1,11	+++	0,47	0,19	0,2	1,2	41	31
4 Avi a	215-335	2,85	1,3	+++	1,24		0,45	n.c.	65	53
4 Avi b	335-415	4		+++	1	0,43	0,30	1,8	67	35
5 Mvo	415-460	0,39		+++	0,37	0,15	0,15	0,7	30	20
6 avi a	460-480	1,16	0,94	+++	0,92	0,12	0,72	3,6	51	51
6 C	480-490	0,77		+++	0,99	0,11	0,48	2,8	48	61
7 A-Sud	490-500	2,77	0,8	+++	2,16	0,14	1,48	7,4	90	57
7 C	500-510	1,01	0,92	+++	1,24	0,18	0,77	3,9	60	55

PROFIL L  
 Altitude : 3640 m  
 Prairies  
 310 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	Da	NaF (cf leg.)	Alox+1/2 Feox (%)	Alpy/Alox	Siox (%)	Allophanes (%)	Ret P. (%)	Verres (%)
Avi	0-20	6,69	1,02	+++	0,53	0,71	0,11	0,56	61	35
3 Avi a	20-50	5,54	1,19	+++	0,64	0,67	0,13	0,64	54	28
3 Avi b	50-103	3,75	1,25	+++	0,77	0,52	0,22	1,34	61	37
3 C	103-174	0,55	1,24	+	0,25	0,5	0,09	n.c.	34	30
4 Avi a	174-280	2,15	1,32	-	0,45	0,83	0,11	n.c.	43	31
4 Avi b	280-x	1,44	1,3	-	0,45	0,65	0,17	n.c.	39	30

PROFIL J2  
 Altitude : 3335 m  
 Eucalyptus  
 280 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	Da	NaF (cf leg.)	Alox+1/2 Feox (%)	Alpy/Alox	Siox (%)	Allophanes (%)	Ret P. (%)	Verres (%)
Avi	0-15	4,08	1,13	+++	0,72	0,57	0,21	1,4	58	33
3 Avi a	15-75	2,09	1,22	+++	0,60	0,44	0,24	1,2	51	33
3 Avi b	75-128	?	1,28	++	0,41	0,5	0,01	0,08	30	40
3 Avi c	128-185	1,77	1,22	-	0,4		0,04	n.c.	33	43
3 Mvo	185-195	0,9	1,35	-	0,24	0,8	0,07	n.c.	36	31
4 Avi	195-x	1,23	1,35	-	0,4	0,56	0,21	n.c.	40	50

PROFIL T  
 Altitude : 3115 m  
 Zone périurbaine  
 250 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	Da	NaF (cf leg.)	Alox+1/2 Feox (%)	Alpy/Alox	Siox (%)	Allophanes (%)	Ret P. (%)	Verres (%)
Js	0-30	1,36	1,42	-	0,21	0,38	0,04	0,2	34	43
3 Js a	30-55	0,88	1,34	-	0,22	0,42	0,08	n.c.	28	34
3 Js b	55-92	0,47	1,38	-	0,09		0,02	n.c.	28	32
3 Js c	92-109	0,16	1,22	-	0,08		0,02	n.c.	29	31
4 Js a	109-157	0,32	1,49	-	0,10		0,025	n.c.	18	40
4 Js b	157-210	0,8	1,25	-	0,14		0,04	n.c.	34	37

Réaction au test NaF :

+++ : réaction en moins de 30" ; ++ : réaction entre 30" et 1' ;  
 + : réaction entre 1' et 2' ; - : aucune réaction en 2'

n.c. : non calculable

Tableaux n°5 : Caractéristiques générales des quatre profils d'étude

semble qu'entre 8500 et 11500 ans le PICHINCHA ait connu une période de relative stabilité.

Nous devons dans tous les cas établir une distinction entre les éruptions des deux mille dernières années (qui constituent un ensemble récent) et les dépôts résultant d'éruptions plus anciennes (qui seront définis comme un ensemble ancien).

### **3.2. Les sols et leurs distributions**

Au cours de l'étape de caractérisation des sols et de leurs propriétés, il est apparu que les cinq profils sur lesquels seules les analyses de bases ont été réalisées n'apportent rien à la connaissance des propriétés. Nous nous baserons donc sur les résultats des quatre solums d'étude complète : D, L, J2 et T dans l'ordre d'altitude décroissante (Cf. Fig n°7).

#### **3.2.1. Morphologie**

Les descriptions morphologiques de ces quatre solums figurent en annexe V. Nous y retrouvons la stratigraphie éruptive précédemment décrite. Nous observons également les couleurs sombres des horizons humifères de surface et de profondeur (valeur et chroma inférieurs à 3) pour les profils D, L et J2. Le profil T de bas de bassin présente un horizon de surface nettement plus clair puisque chroma et valeur équivalent à 4. Les textures appréciées varient considérablement suivant les couches pyroclastiques considérées, puisque nous rencontrons sur un même profil des textures grossières et des textures limono-argileuses. Il faut noter qu'aucune variation de texture pour un même dépôt n'est perceptible le long de la séquence. L'ensemble du versant est trop proche du volcan pour que l'on puisse noter un affinement des particules quand on s'éloigne de celui-ci.

Les structures sont peu visibles et l'ensemble présente un faciès massif avec parfois des structures polyédriques mais jamais très affirmées.

Les types de transitions sont de très utiles indicateurs : elles sont franches et nettes entre les dépôts successifs et diffuses entre les horizons A et C d'un même dépôt.

Aucun des solums ne montre de traits morphologiques de transferts et de redistributions des argiles (lessivage) ou de fer (oxydo-réduction).

Il est à noter également qu'aucun horizon ne possède la propriété de thixotropie. Du haut vers le bas de la séquence, nous observons un assèchement progressif des profils.

#### **3.2.2. Mise en évidence de paleosurfaces**

Les principaux résultats analytiques de caractérisation générale de ces quatre solums figurent dans les tableaux n°5 ci-contre.

Les teneurs en carbone des horizons de surface varient de 6,6% à 1,3%. Nous observons tout de suite une décroissance significative de ces teneurs quand on descend la séquence de 6% à 4%. Il est apparent, sur ces teneurs en carbone des différents horizons que nous sommes en présence de profils organiques complexes.

Il est évident que dans l'intervalle entre deux éruptions se forme un horizon de surface organique, puisqu'en contact direct avec atmosphère et biosphère. Dans notre contexte, nous devons retrouver ces paleosols qui peuvent être considérés comme des témoins d'une évolution et d'une pédogenèse passée. Mais le concept de paléosol souffre d'un problème de définition. BRONGER et CATT ont bien montré les variations de sens que connaît ce terme selon les auteurs. Pour la plupart, il est réservé à des sols formés sous des conditions climatiques différentes du climat actuel. En Europe Occidentale, il désigne ainsi les sols antérieurs au Würm (DUCHAUFOR, 1982). RUHE (cité dans BRONGER ET CATT, 1989) a proposé une définition plus large puisqu'il considère, sous le terme paléosol, tous les sols formés dans un paysage passé.

Dans le cas qui nous préoccupe, nous pouvons considérer que les conditions climatiques et géomorphologiques ont été constantes depuis le retrait glaciaire (WINCKELL et ZEBROWSKY, 1993). C'est à dire que *nos "sols anciens" ont été formés sous des conditions équivalentes à celles qui existent pour les sols actuels*. Ainsi, en toute rigueur, nous ne pouvons pas utiliser le terme paléosol qui implique des changements de conditions. Il nous semble préférable de lui substituer le concept de *paleosurface* tel qu'il est utilisé par exemple par RIEZEBOS (RIEZEBOS, 1985).

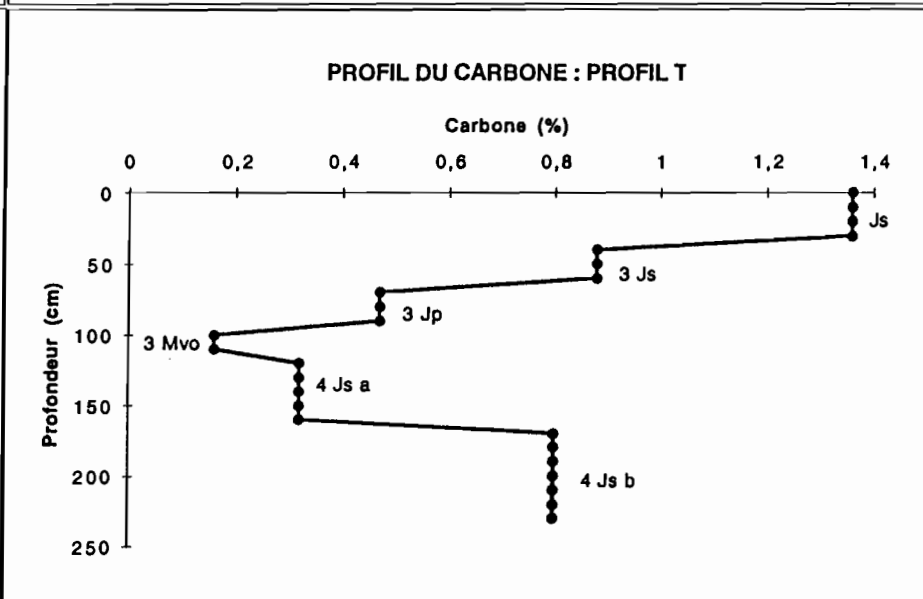
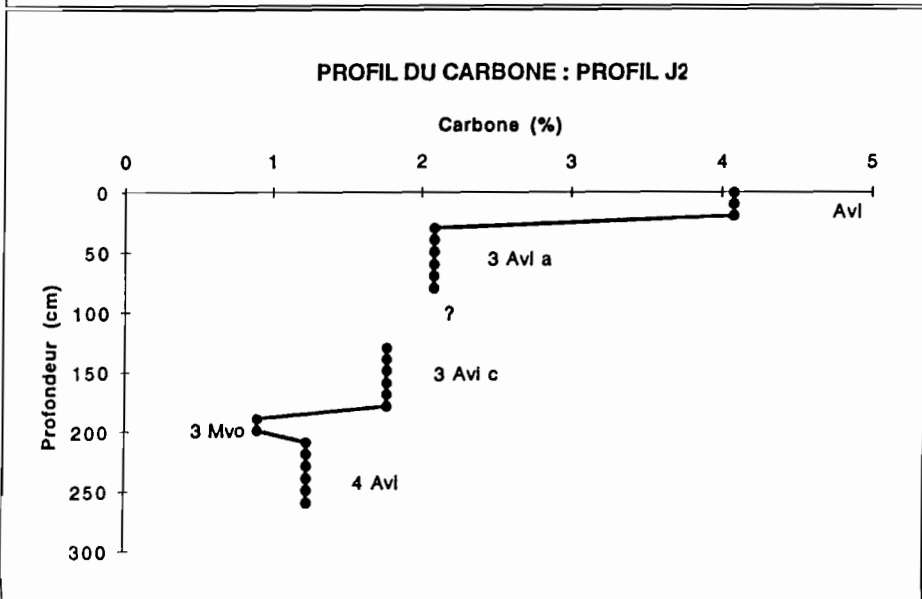
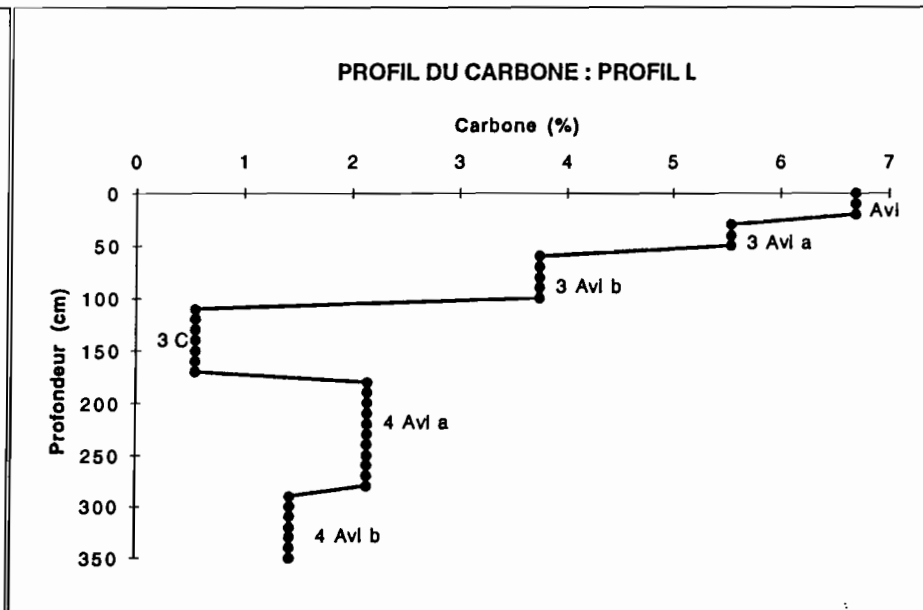
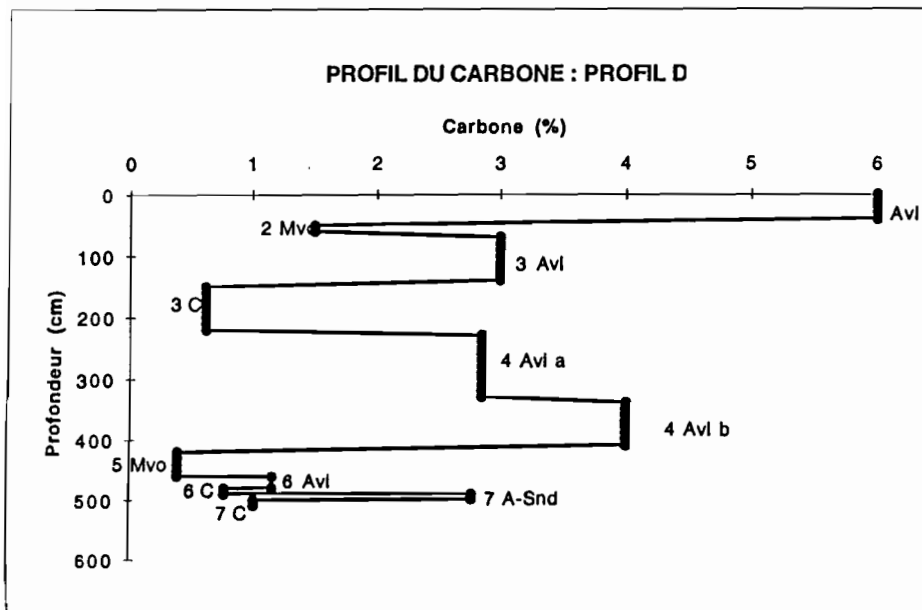
Considérant que les migrations de matière organique en profondeur sont peu probables (comme c'est le cas pour les Bp de Podzosols par exemple), nous pouvons admettre que les horizons de profondeur dont la teneur en Carbone forme un pic ou un ventre sur un graphique  $C (\%) = f (\text{Profondeur})$  sont d'anciens horizons d'interaction organo-minérale et qu'à ce titre ils indiquent l'existence de paleosurfaces.

La figure n°9 ci-contre présente ce type de graphique pour les quatre profils d'étude. Nous y observons fort bien, notamment pour le profil D (dont la profondeur de description est maximum) la présence de quatre de ces paleosurfaces. Nous constaterons également les diminutions, déjà mentionnées de teneurs en carbone organique quand on descend la séquence. Les variations de niveaux organiques que nous mettons en évidence sont liées aux variations dans la stratigraphie (Cf. Fig n°7).

Il apparaît fondamental d'apprécier le niveau d'altération que subissent ces horizons enfouis, une fois ceux-ci recouverts. En effet, ces horizons demeurent en contact avec les agents d'altération dans la mesure où des flux hydriques circulent jusqu'à eux. Nous ne pouvons donc pas considérer que la pédogenèse y soit totalement bloquée. Pourtant, les interactions organo-minérales ne sont plus actives dans ces milieux profonds, et ainsi un des moteurs principaux de l'évolution se trouve en position d'arrêt. Quant aux circulations d'eau, nous avons observé qu'un certain nombre de ces horizons enterrés connaissent un début d'endurcissement, ce qui provoque une réorientation des flux vers un drainage oblique le long d'horizons plus grossiers. Par ailleurs, ces solutions sont naturellement chargées en produits d'altération des horizons supérieurs et notamment de l'horizon de surface. Or, une telle solution chargée, voire à l'extrême saturée, possède un pouvoir d'altération faible ou nul.

Nous pouvons donc en conclure, que si ces horizons enfouis poursuivent leur évolution, la vitesse d'altération qu'ils sont susceptibles de connaître est probablement faible.

Fig. n°9 : Profils de carbone : mise en évidence des paléosurfaces



Une fois cette hypothèse posée, il est possible de définir la durée des processus de pédogenèse, comme la période séparant un dépôt de pyroclastes donné et l'éruption suivante qui va recouvrir ce dépôt.

### 3.2.3. Caractérisation générale

#### 3.2.3.1. Critères andiques

Dans un premier temps nous considérerons les résultats des critères de caractérisation des propriétés andiques.

Si nous tenons compte de la somme ( $A_{Lox} + 1/2 Fe_{ox}$ ) des horizons de surface des quatre profils (Cf. Tableau n°5), il apparaît que les trois solums du haut de bassin (D, J2 et L) possèdent des valeurs comprises entre les valeurs repères de la seconde catégorie des propriétés andiques de la Soil Taxonomy : 0,4 et 2%. Sur ces mêmes horizons la capacité de rétention des phosphates est toujours située entre les valeurs repères de 35% à 85% et la teneur en verres est supérieure à 30%. Nous nous plaçons donc dans le cadre de ce que nous avons défini comme propriétés vitriques.

A l'inverse, nous remarquons que les critères d'entrée dans l'ordre des Andisols ne sont pas rencontrés dans les horizons de surface du profil T : la somme  $A_{Lox} + 1/2 Fe_{ox}$  est toujours inférieure à 0,4 et la capacité de rétention des phosphates inférieure à 35%.

Il ressort de l'examen de ces critères d'entrées dans l'ordre des Andisols qu'une première différenciation de type de sol doit être notée : les solums du haut de bassin répondent aux critères de définition des propriétés andiques et les solums du bas de bassin en sont exclus.

Cette première distinction faite, il s'avère intéressant d'observer si ces critères andiques sont présents dans certains horizons enterrés. Il ne s'agit plus ici de procéder à des regroupements en vue de classification mais bien plutôt de considérer ces horizons comme des témoins d'évolution passée.

Pour les profils du type du haut de versant (D, L et J2), il s'avère que ces horizons marqueurs des différentes paleosurfaces entrent également dans la seconde catégorie des propriétés andiques de la soil taxonomy avec des valeurs de la somme de  $A_{Lox} + 1/2 Fe_{ox}$  supérieure à 0,4% et des capacités de rétention des phosphates supérieures à 35%. Nous remarquons en outre l'existence d'un horizon enterré (niveau 7 A-Snd du profil D) présentant les caractéristiques andiques au sens de la première catégorie de la Soil Taxonomy. En effet, cet horizon possède l'ensemble des critères nécessaires :  $A_{Lox} + 1/2 Fe_{ox} > 2\%$  ; capacité de rétention des phosphates  $> 85\%$  et densité apparente  $< 0,9$ . Nous remarquerons également que cet horizon correspond à la période de stabilité présumée du Pichincha entre 8500 et 11500 ans.

Pour le profil T, représentant le type du bas de bassin, ni les horizons de surface, ni les horizons enfouis ne possèdent de propriétés andiques.

Au cours de l'étape de terrain visant à la caractérisation sommaire des 45 solums, nous avons utilisé le test au NaF en vue d'apprécier le degré d'évolution des différents sols rencontrés. Nous discuterons ici des relations pouvant exister entre la réponse que donne ce test et les quantités d'Al et de Fe extraits par le réactif oxalate. De ce point de vue, nous remarquons que la réponse à ce test est positive dans les trois premiers solums étudiés (D, L et J2) et négatif dans le

quatrième (Profil T). Ainsi nous constatons une corrélation significative entre cette réponse au NaF et d'autres critères andiques, comme par exemple la somme  $Alox + 1/2 Feox$ . Tous les horizons qui présentent une réaction positive au test ont une somme de  $Alox + 1/2 Feox$  supérieure à 0,7%. Il faut donc considérer cette valeur comme une valeur seuil. Les temps de réaction ne semblent, par contre, pas indicatifs. Dans cet environnement nous pouvons donc donner à ce test la signification suivante : si l'on observe une réaction en moins de deux minutes on peut affirmer que l'horizon considéré est au moins vitrique si ce n'est andique. Par contre, l'absence de réaction positive, si elle permet d'exclure la possibilité de rencontrer des propriétés andiques, ne serait être suffisante pour vérifier la non-existence de propriétés vitriques.

De façon globale, la rétention des phosphates, considérée comme un critère du caractère andique, peut être utilisée comme un témoin de l'andosolisation des différents niveaux. Sur la figure n°10 qui rend compte de l'évolution de cette capacité de rétention le long de la séquence altitudinale, nous constatons en premier lieu qu'il y a bien une décroissance de cette capacité en relation avec l'altitude des profils.

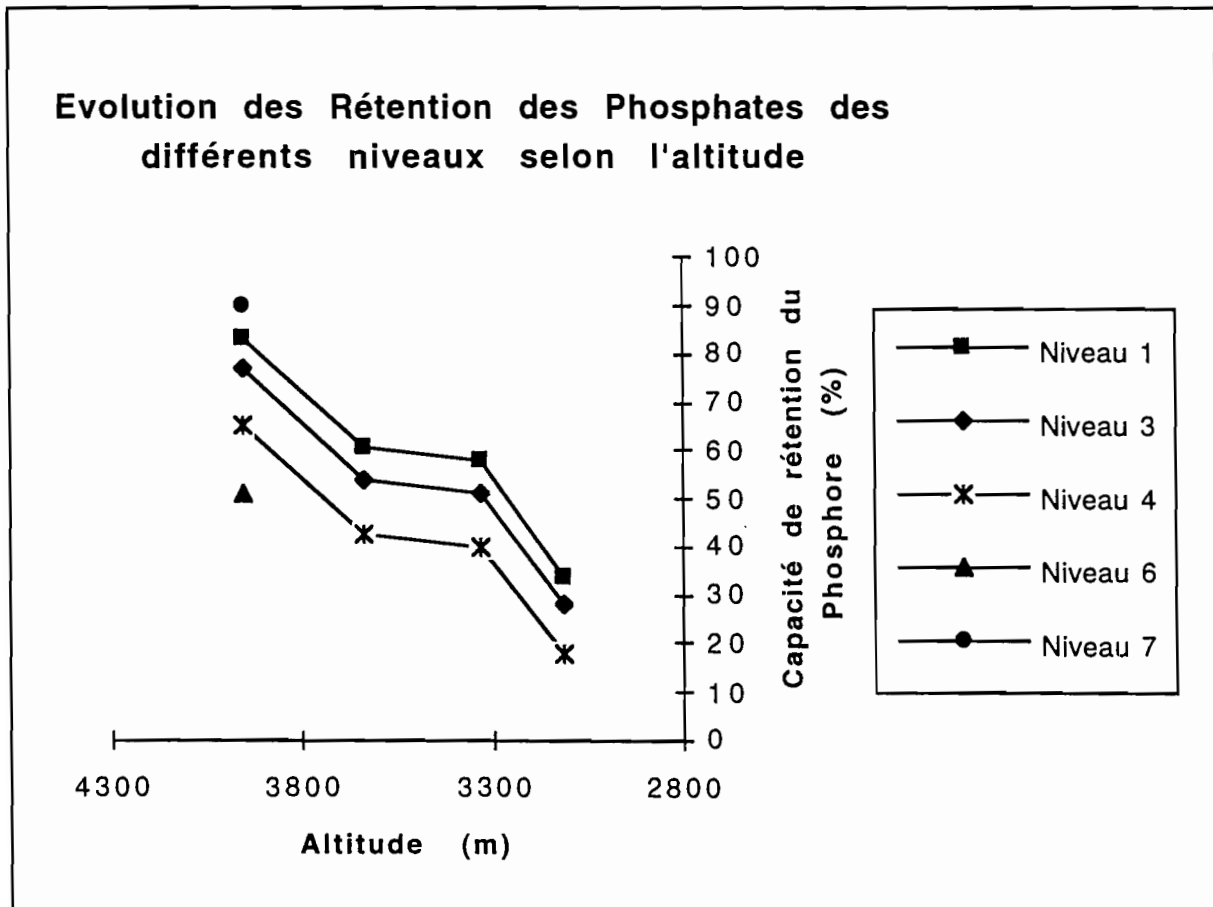


Fig n°10 : Evolution de la capacité de rétention des Phosphates

Mais nous pouvons observer également que les différents niveaux (surface, niveaux 3 et 4) présentent des courbes sub-parallèles. Ce constat nous permet de vérifier que les différenciations au sein des conditions climatiques, qui induisent cette toposéquence, sont semblables depuis le dépôt du niveau 4. Sur cette même figure, il apparaît que cette dynamique d'évolution en fonction de



l'altitude n'est pas linéaire : la pente des droites entre deux points successifs varie en effet sensiblement. Nous constatons ainsi des zones de moindre évolution pour les altitudes moyennes de 3600 à 3350 mètres. Cette observation doit être directement mise en relation avec le caractère complexe des variations topoclimatiques que nous avons soulignées dans notre précédent chapitre.

### 3.2.3.1. Constituants minéraux

Dans l'environnement étudié, la signification des valeurs de Siox, Alox et Feox est considérablement réduite. Ainsi, les quantités de Siox sont fort variables (de 0,9 à 14,8 g/Kg) de même que les quantités de Alox et Feox (de 1,2 à 19,2 et de 4,6 à 8,8 g/Kg respectivement). Quoi qu'il en soit, les quantités d'allophanes calculées par la méthode de PARFITT sont toujours faibles.

Si les rapports Alp/Alox et Fep/Feox n'ont que peu d'intérêt pour ces sols vitriques, il est intéressant de noter qu'en ce qui concerne l'horizon enterré 7 A-Snd du profil D, ces valeurs sont très faibles (0,14 et 0,1 respectivement). Ces données suggèrent que l'aluminium et le fer ne se trouvent pas sous forme de complexes organo-minéraux mais plutôt sous forme minérales. Ce point explique donc la présence de plus de 70g/Kg d'allophanes dans cet horizon enfoui. Il semble donc que, lorsque l'horizon 7 A-Snd se trouvait être l'horizon de surface, c'est à dire entre 8500 et 11500 ans, son évolution ait été du type de celle que l'on peut attendre lorsqu'un Andosol vitrique évolue en Andosol allophanique. Si l'on admet que les conditions climatiques qui prévalaient pendant ces 3000 années sont identiques à celles d'aujourd'hui, cette observation indique que la voie d'évolution normale, dans cet environnement, est celle qui réalise la séquence Andosol vitrique-Andosol allophaniques

Nous observons, à la lecture des résultats analytiques, que la fraction minérale est dominée par les verres volcaniques. Les teneurs en verres montrent des taux de 40 à 50 % sur la fraction 2-0,05mm. Nous avons testé par ailleurs la répétabilité de cette méthode par l'acide Hydrofluorique sur six échantillons et les résultats sont tout à fait satisfaisants puisque l'écart-type entre essais est inférieur à 1%. Cependant, cette méthode semble une technique en devenir et un certain nombre de problèmes demeure. En effet, le temps de contact de 30 s a été estimé pour des échantillons dont la composition minéralogique pouvait être fort différente de celles des échantillons utilisés pour notre étude. Or, s'il est nécessaire de caler nos résultats par rapport à la méthode microscopique, l'intérêt de cette méthode chimique rapide s'en trouve considérablement réduit. Il nous semble pourtant que dans un simple objectif de classification, les avantages de cette méthode chimique supplantent ses inconvénients, mais que l'on doit toujours garder pleine conscience de ses limites.

Une analyse de diffraction X réalisée sur les résidus du traitement à l'acide hydrofluorique (c'est à dire une fois les verres éliminés) montre que la fraction sableuse est également constituée de minéraux primaires cristallisés : on distingue, sur ce spectre, les pics caractéristiques de l'ensemble *Anorthite-Albite*, *de la Cristobalite et de l'Amphibole*. La présence de ces minéraux est tout à fait classique des milieux éruptifs comme l'a par exemple souligné SHOJI (SHOJI et al, 1993).

La caractérisation des sols qui n'appartiennent pas à l'ordre des Andisols (par exemple le profil T) nécessite d'autres références. Pour caractériser le niveau de développement de la pédogenèse, la présence et les teneurs en minéraux

PROFIL D  
 Altitude : 3960 m  
 Paramo  
 510 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	CEC (Meq/100g)	S/T (%)	Ph H2O	Ph KCl	P (ppm)
Avi	0-42	6	20	20,7	5,5	5	8
2 Mvo	42-57	1,5	4	29,2	5,7	5,2	4,5
3 Avi	57-135	3	18,6	27	5,8	5,3	4,2
3 C	135-215	0,62	5,8	28,6	6,2	5,3	4
4 Avi a	215-335	2,85	29,3	30,3	6,1	5,7	5,5
4 Avi b	335-415	4	14,8	16,2	5,4	4,7	3
5 Mvo	415-460	0,39	3,8	26,7	5,5	5,1	7,2
6 avi a	460-480	1,16	7	7,4	5,7	5,1	7,5
6 C	480-490	0,77			5,4	5	9,8
7 A-Snd	490-500	2,77	18,2	7,1	5,5	4,9	6,2
7 C	500-510	1,01	13,6	38,3	5,4	4,8	7,5

PROFIL L  
 Altitude : 3640 m  
 Prairies  
 310 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	CEC (Meq/100g)	S/T (%)	Ph H2O	Ph KCl	P (ppm)
Avi	0-20	6,69	23	23	5,6	5,1	2,8
3 Avi a	20-50	5,54	21,5	31,5	5,3	4,8	2,8
3 Avi b	50-103	3,75	18,2	23,8	5,1	4,8	3
3 C	103-174	0,55	9,2	50	5,3	4,9	2
4 Avi a	174-280	2,15	19,5	54	6	5,2	2,8
4 Avi b	280-x	1,44	16,2	50,9	6	5,3	2

PROFIL J2  
 Altitude : 3335 m  
 Eucalyptus  
 280 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	CEC (Meq/100g)	S/T (%)	Ph H2O	Ph KCl	P (ppm)
Avi	0-15	4,08	13,2	27	5,6	4,9	3,5
3 Avi a	15-75	2,09	14	46	6,3	4,8	2,2
3 Avi b	75-128	?	6,6	27,6	5,8	4,7	2
3 Avi c	128-185	1,77	13	55,1	5,7	5,2	2,2
3 Mvo	185-195	0,9	15	68	6	5,3	4,2
4 Avi	195-x	1,23	19,5	58	6	5,2	4,2

PROFIL T  
 Altitude : 3115 m  
 Zone périurbaine  
 250 cm observé

Horizon*	Dimension (cm)	C (%)	CEC (Meq/100g)	S/T (%)	Ph H2O	Ph KCl	P (ppm)
Js	0-30	1,36	10	60,2	6,1	5,3	2
3 Js a	30-55	0,88	10,2	55,4	6	5,3	1,5
3 Js b	55-92	0,47	5,6	73,9	5,9	5,4	0,5
3 Js c	92-109	0,16	8,2	52	6,4	5,2	0,2
4 Js a	109-157	0,32	14,2	68,9	6,1	5,6	1,2
4 Js b	157-210	0,8	11,4	74	6,6	5,7	0,5

Tableaux n°7 : Quelques caractéristiques physico-chimiques des quatre profils d'étude

allophaniques ne sont évidemment plus ici déterminantes. Il s'agit, par contre, de vérifier si l'absence de caractéristiques andiques n'est pas liée à la présence de phyllosilicates secondaires.

Nous avons réalisé une granulométrie complète de l'horizon de surface de ce profil T, et ses résultats sont regroupés dans le tableau n°6 suivant. (Granulométrie après traitement au NaOCl puis lavage de l'hypochlorite au NaCl et lavage du chlorure de Sodium par SrCl<sub>2</sub> avant passage en résine)

Sable Grossier	%	Sable Fin	%	Limon Grossier	%	Limon Fin	%	Argile	%	TOTAL
29,6		23,6		10,4		17		6,6		87,2

Tableau n°6 : Granulométrie de l'horizon Js du profil T

Nous remarquons sur ce tableau une proportion importante de matériaux fins et notamment une teneur en argile granulométrique non négligeable. Afin de préciser le niveau d'évolution de ce sol, il convient de vérifier la présence et de préciser le type d'argile minéralogique mis en jeu au sein de cette fraction fine. Pour ce faire, nous avons réalisé un diagramme de R.X sur cette fraction inférieure à 2 µm.

Nous constatons sur ce spectre, pour des  $d(\text{Å}) < 4,5$ , un décalage du spectre moyen par rapport à la ligne de base. Cette "bosse" est caractéristique de la présence des verres volcaniques. Les quelques pics observés correspondent aux longueurs  $d(\text{Å})$  caractéristiques de l'albite et de la cristobalite. Mais l'observation la plus importante réside dans l'absence de phyllosilicates. Ainsi, cette fraction fine n'est constituée, hormis les verres volcaniques, que des débris fins des minéraux primaires d'albite et de cristobalite.

Il n'y a donc eu dans l'horizon de surface du profil T ni synthèse de minéraux allophaniques ni formation de phyllosilicates.

### 3.2.4. Propriétés caractéristiques des sols

#### 3.2.4.1. Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats analytiques des éléments de caractérisation des propriétés physico-chimiques apparaissent dans le tableau n°7 ci-contre.

Ces résultats mettent en évidence une augmentation relative des Ph H<sub>2</sub>O et Ph KCl le long de la séquence. Pour la partie la plus haute du bassin (Profils D et L) ces Ph sont assez constants autour des valeurs 5,5 et 5 respectivement. Dans la partie aval l'acidité est plus faible et les Ph H<sub>2</sub>O et KCl fluctuent autour de 6,1 et 5,5 respectivement. Le delta Ph (Ph H<sub>2</sub>O-Ph KCl) est ainsi quasi constant autour de la valeur de 0,5. Au sein de chaque solum les variations de Ph sont modérées. Ces valeurs de Ph sont tout à fait comparables à celles de la littérature : le faible degré d'évolution de nos solums explique que nos sols aient des réactions légèrement acides.

Les capacités d'échanges cationiques sont de façon générale faibles et en lien direct avec les teneurs en matière organique. En effet, la quasi absence de minéraux secondaires réduit à une valeur proche de zéro la capacité d'échange due à de tels minéraux. Ainsi au sein de chaque profil on retrouve, en suivant

cette C.E.C., les différentes paleosurfaces observées précédemment. Corrolairement aux taux de carbone organique nous assistons à une diminution de la C.E.C. le long de la séquence altitudinale. Les C.E.C. évoluent ainsi de 19 meq/100g en moyenne en haut de bassin à 10 meq/100g pour le profil du bas de séquence. Nous trouvant dans un contexte de sols andiques connus pour leurs charges variables, nous devons naturellement considérer ces valeurs de C.E.C. mesurée à Ph 7 avec une certaine réserve. Malheureusement, nous ne disposons pas de données pour caractériser les variations de cette capacité en fonction du Ph.

Les taux de saturation des complexes d'échange présentent de très fortes variations pour les différentes stations de la toposéquence. Le profil du haut de séquence possède des rapports S/T de l'ordre de 30% et est donc dystrique. A l'opposé, la très faible C.E.C. du profil T de bas de bassin est très facilement saturée et l'on a donc un profil entièrement eutrique avec des S/T de l'ordre de 60%. Les profils intermédiaires constituent un espace de transition où les horizons de surface sont dystriques et les niveaux de profondeur eutriques (Cf. Fig n°11 ci-dessous).

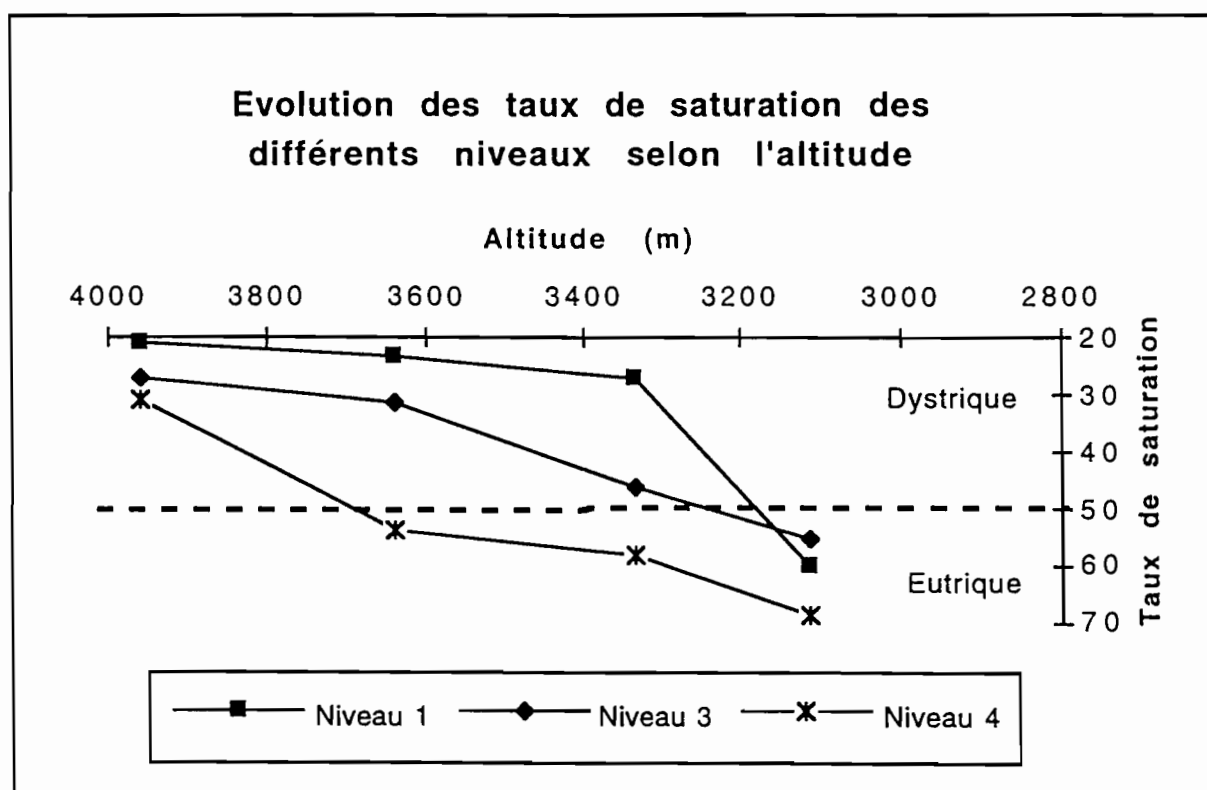


Fig n°11 : Evolution du rapport S/T

Nous assistons donc à une désaturation du complexe d'échange au cours de la pédogenèse (considérant la zone haute comme étant la plus évoluée); cette désaturation étant due principalement à une augmentation de la capacité d'échange sans augmentation massive du pool de bases.

Que ce soit en fonction de l'altitude ou en fonction des différents niveaux d'une même station les teneurs en P Olsen varient parallèlement à celles des taux de matières organiques.

PROFIL D  
 Altitude : 3960 m  
 Paramo  
 510 cm observé

Horizon*	Dimension	> 50 µm de T.F.	E.G.	Da	Hum 100 KPa (hum)	Hum 1500 KPa (hum)	Hum 100 KPa (sec)	Hum au prélèvement	Scissiométrie
	(cm)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(Kpa)
Avi	0-42	63	33	0,76	40	26	26	34	90
2 Mvo	42-57	98	53						32
3 Avi	57-135	66	4	1,10	33	21	27	29	81
3 C	135-215	81	5	1,11	20	6	9	17	58
4 Avi a	215-335	40	5	1,3	51	30	30	37	117
4 Avi b	335-415	65	7,5		44	18	32		106
5 Mvo	415-460	97	59						36
6 avi a	460-480	56	2	0,94	55	13	24		36
6 C	480-490	49	0						112
7 A-Ssd	490-500	40	0	0,8					65
7 C	500-510	49	1,5	0,92	78	28	33		64

PROFIL L  
 Altitude : 3640 m  
 Prairies  
 310 cm observé

Horizon*	Dimension	> 50 µ de Terre fine	Eléments Grossiers	Da	Hum 100 KPa (hum)	Hum 1500 KPa (hum)	Hum 100 KPa (sec)	Hum au prélèvement	Scissiométrie
	(cm)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(Kpa)
Avi	0-20	65	10	1,02	35	22	24	27	64
3 Avi a	20-50	65	14	1,19	32	14	26	25	130
3 Avi b	50-103	67	8	1,25	38	16	27	26	97
3 C	103-174	73	11	1,24	30	11	21	28	54
4 Avi a	174-280	11	1	1,32	41	8,5	25	29	157
4 Avi b	280-x	57	36	1,3	37	11	23	25	159

PROFIL J2  
 Altitude : 3335 m  
 Eucalyptus  
 280 cm observé

Horizon*	Dimension	> 50 µ de Terre Fine	Eléments Grossiers	Da	Hum 100 KPa (hum)	Hum 1500 KPa (hum)	Hum 100 KPa (sec)	Hum au prélèvement	Scissiométrie
	(cm)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(Kpa)
Avi	0-15	63	10	1,13	29	20	23	25	62
3 Avi a	15-75	69	9	1,22	31	18	15	23	90
3 Avi b	75-128	71	4	1,28	29	15	18	23	56
3 Avi c	128-185	50	2	1,22	45	29	34	20	146
3 Mvo	185-195	93	22	1,35	41	20	23	31	
4 Avi	195-x	40	8	1,35	35	18	32	28	245

PROFIL T  
 Altitude : 3115 m  
 Zone périurbaine  
 250 cm observé

Horizon*	Dimension	> 50 µ de Terre Fine	Eléments Grossiers	Da	Hum 100 KPa (hum)	Hum 1500 KPa (hum)	Hum 100 KPa (sec)	Hum au prélèvement	Scissiométrie
	(cm)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(Kpa)
Js	0-30	57	3	1,42	20	13	18	26	101
3 Js a	30-55	69	22	1,34	18	13	15	22	92
3 Js b	55-92	72	5	1,38	24	8	23	15	89
3 Js c	92-109	61	9	1,22	22	15	20	22	91
4 Js a	109-157	50	5	1,49	19	4	17	19	196
4 Js b	157-210	59	15	1,25	24	7	19	24	164

Tableaux n°8 : Quelques caractéristiques physiques des quatres profils d'étude

## 3.2.4.2. Caractéristiques physiques

Les principaux résultats analytiques de caractérisation des propriétés physiques des quatre profils d'étude figurent dans le tableau n°8 ci-contre.

Les densité apparentes des horizons supérieurs varient de 0,7 à 1,4 g/cm<sup>3</sup> avec les valeurs les plus faibles pour le profil situé en haut de bassin. On explique en général les faibles densités apparentes rencontrées dans les Andisols par l'accumulation massive de matières organiques et par la formation de structures très poreuses dues aux arrangements particuliers des minéraux allophaniques. La figure n°12 présente les variations des densités apparentes selon la séquence altitudinale.

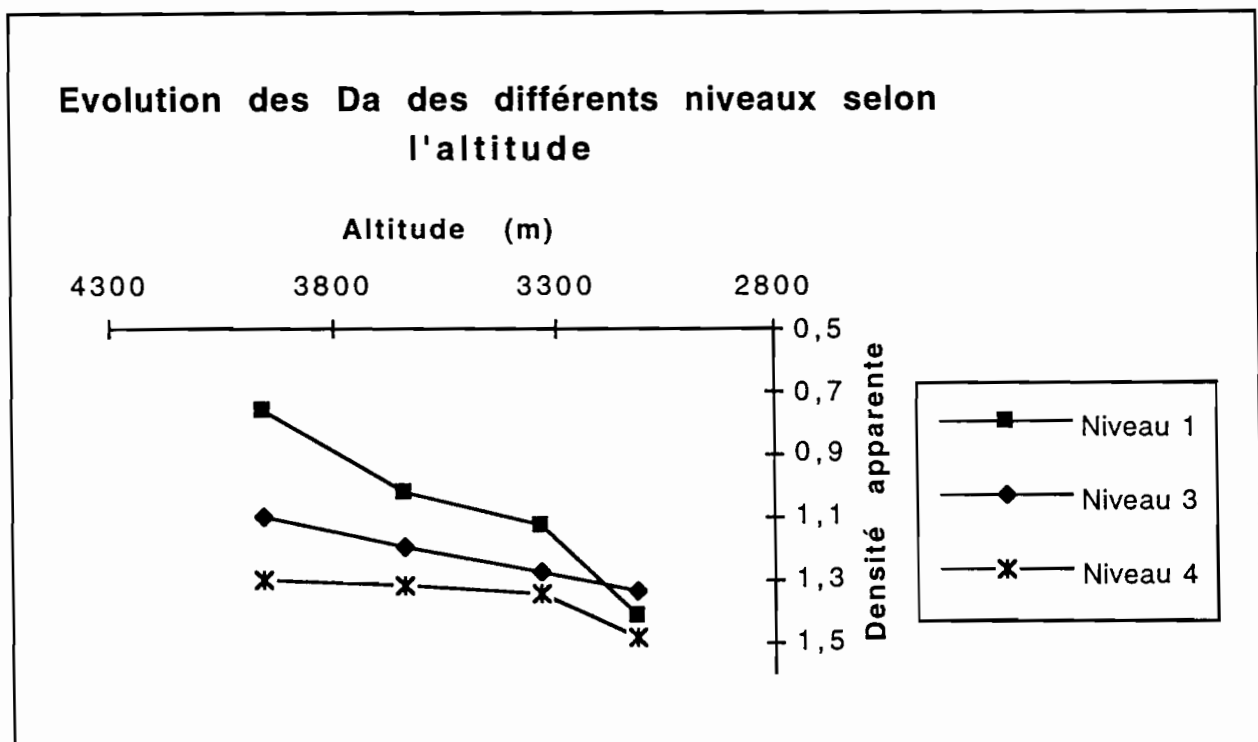


Fig n° 12 : Evolution le long de la séquence altitudinale des densités apparentes de différents niveaux.

Au sein de chaque solum cette densité apparente varie en relation avec les teneurs en matière organique mais aussi en fonction du degré d'évolution andique que les différents horizons ont connu. Ainsi l'horizon enterré du niveau 7 du profil D (qui possède, rappelons-le, des propriétés andiques) se trouve avoir une faible densité apparente (0,8).

Les mesures de scissiométrie montrent que la résistance au cisaillement connaît également de très fortes variations puisqu'elle s'étend de 30 à 240 Kpa, et l'on a, de même que précédemment, une augmentation de cette résistance quand on s'éloigne des plus hautes altitudes. Ces variations de la résistance mécanique au cisaillement semblent difficiles à expliquer. En effet, nous ne notons aucune corrélation pleinement significative entre cette caractéristique et d'autres variables. Il s'agit surtout de considérer ces valeurs de scissiométrie avec un très

grande prudence. En effet, l'hétérogénéité des réponses est telle que la signification de nos résultats doit être relativisée.

Les résultats d'humidité relative, soit la teneur en eau des sols au moment du prélèvement des cylindres de densité apparente, montre un relatif assèchement progressif des sols quand on descend la séquence. Ces humidités sont en relation directe avec les teneurs en matière organique et avec les densités apparentes.

En ce qui concerne les capacités de rétention en eau, il convient de préciser que les différences entre échantillons conservés humides ou séchés à l'air sont fort importantes (jusqu'à 100% pour le profil du haut de bassin). Ainsi, il semble que cette propriété apparaisse rapidement après les débuts de l'altération et ceci même avec des teneurs en minéraux allophaniques faibles. Nous observons une diminution considérable de ce caractère le long de la séquence. Au point le plus bas du versant (Profil T) nous remarquons une absence de différence significative entre échantillons séchés ou conservés humides. La figure n° 13 ci-dessous présente ces variations de teneurs en eau avant et après séchage le long de la séquence pour les horizons de surface.

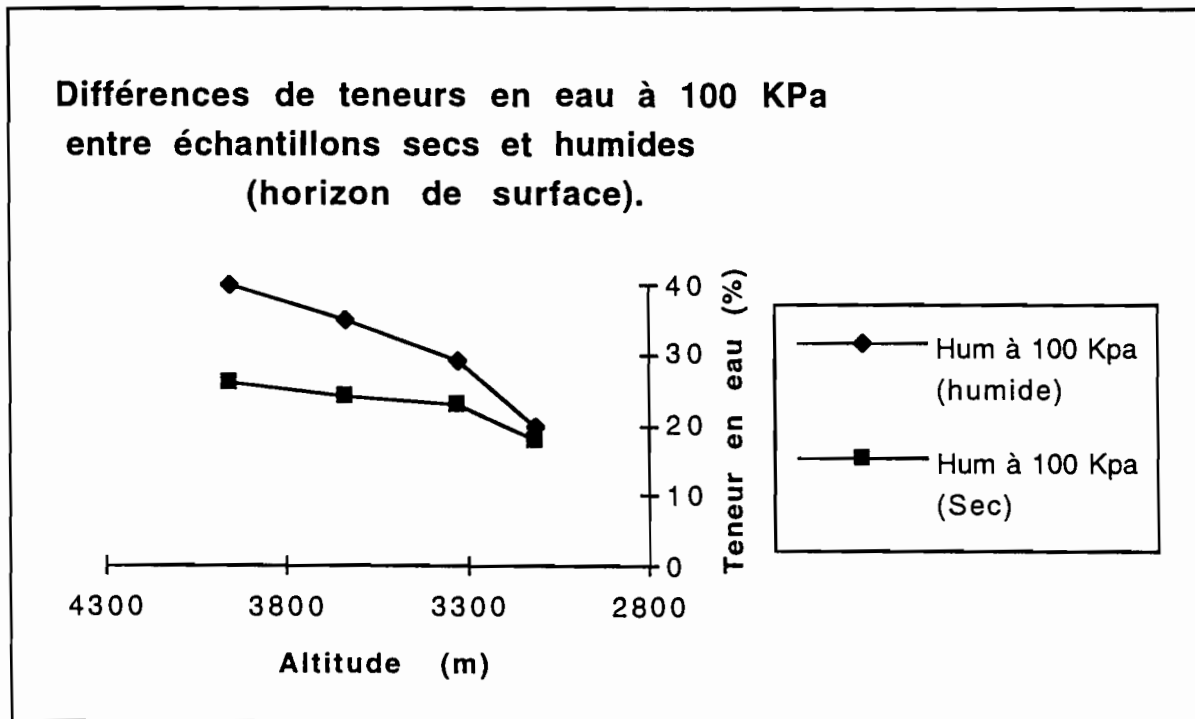


Fig n°13 : Evolution le long de la séquence altitudinale de la différence de rétention en eau entre échantillons séchés et conservés humides.

Les capacités de rétention en eau très élevées (parfois plus de 200%) typiques des Andosols ne s'observent pas ici. Ainsi quels que soient les niveaux, les valeurs de rétention entre la capacité au champ (100 KPa) et le point de flétrissement (1500 KPa) sont modestes puisque de l'ordre de 40% à 20 % respectivement. Naturellement ces capacités de rétention diminuent, en lien avec la densité apparente, quand on s'éloigne des plus hautes altitudes. Ainsi les réserves utiles deviennent très faibles pour les sols du bas de bassin (Cf. Fig n°14 ci-après).

**Evolution des teneurs en eau à différentes pressions de l'horizon de surface (échantillons humides)**

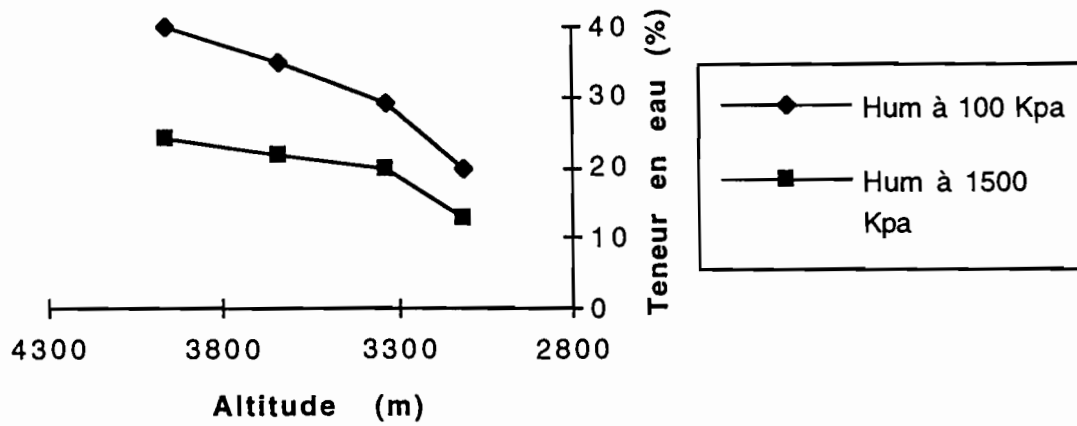


Fig n°14 : Evolution le long de la séquence altitudinal des capacités de rétention en eau des horizons de surface.

La figure ci-dessus présente cette évolution des capacités de rétention pour les horizons de surface mais nous devons souligner que cette variation concerne également les profils enterrés.

La figure n°15 ci-dessous présente les résultats des quelques limites de changements d'état comparés aux capacités de rétention en eau à 100 et 1500 Kpa (capacité de rétention et point de flétrissement) pour l'horizon enterré du niveau 4 de 3 profils (D, L et T).



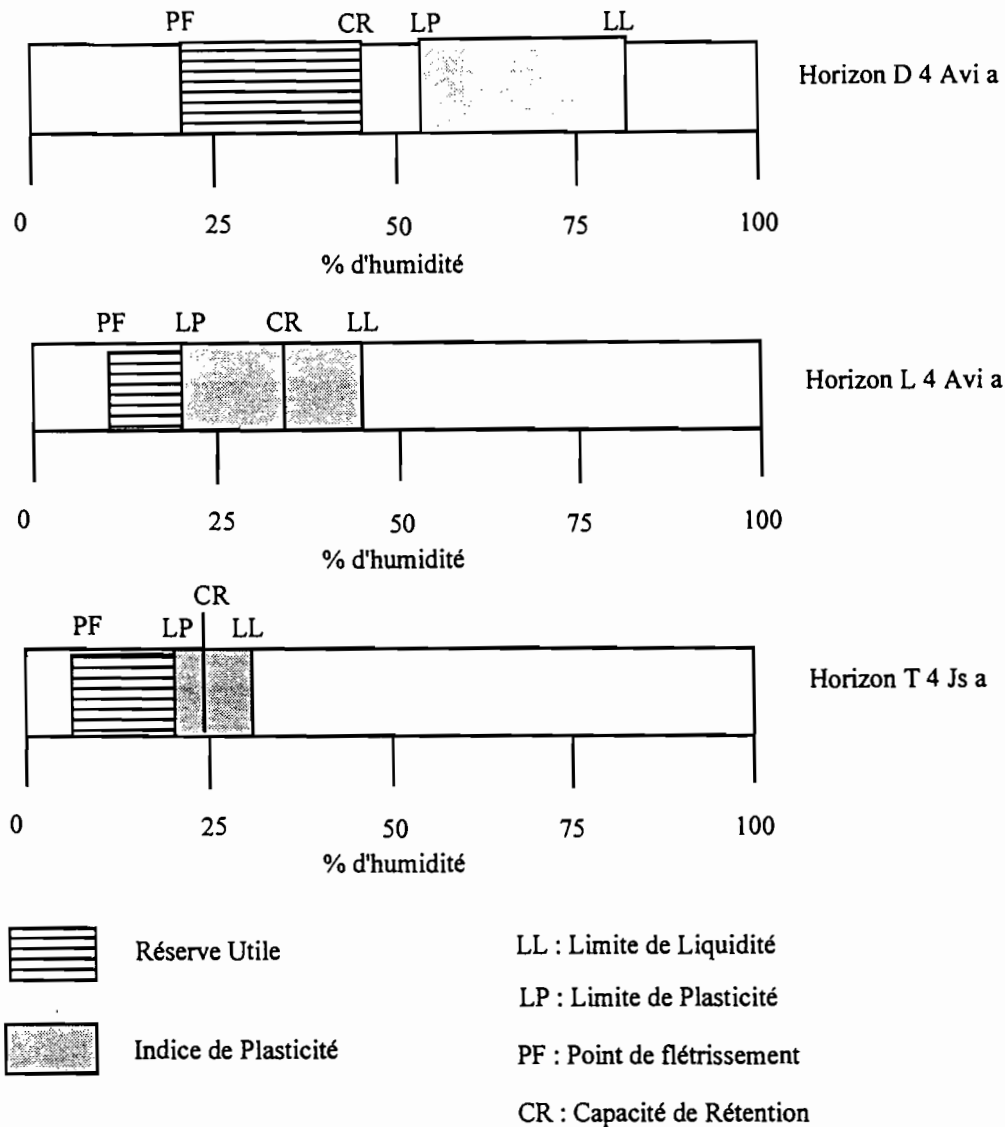


Fig n°15 : Réserve utile et indice de plasticité

Cette figure montre un comportement contrasté de ce niveau 4 à différentes altitudes. Nous devons observer ici une réduction de l'indice de plasticité quand on descend la séquence altitudinale. Les limites de changement d'état sont déconnectées, nous le voyons, des teneurs en eau aux conditions normales pour ce pôle d'altitude. A l'opposé, nous constatons l'existence d'un espace commun entre les teneurs en eau de la réserve utile et celles qui provoquent des changements d'état pour les sols de la partie avale. Cependant, il convient de considérer ces valeurs avec une certaine prudence : elles ne concernent qu'un horizon de texture fine et ne peuvent être généralisées à l'ensemble du sol (les mesures de la limite de plasticité s'avèrent impossibles sur les horizons de texture plus grossière).

Il nous faut noter que les différentes caractéristiques, chimiques et physiques, exposées ci-dessus sont à la limite des caractérisations de sols, en particulier pour ce qui concerne la partie basse du bassin. En effet, la pédogénèse de ces sols est si peu développée que l'ensemble de ces caractéristiques ne provient en fait que de la mise en place des dépôts pyroclastiques. L'absence de

synthèse et de structuration pédologique de ces sols réduit ces éléments à une caractérisation des matériaux originels.

### 3.2.5. Classification

#### 3.2.5.1. Les sols du haut de bassin (Profils D, L, J2)

##### \* Milieu, limite

Ce premier groupe s'étend des plus hautes altitudes (4600m) jusqu'à une altitude approximative de 3300 m. Ce type correspond donc au milieu humide d'altitude et aux étages à paramo et à prairie d'élevage.

##### \* Soil Taxonomy

L'entrée dans l'ordre des Andisols de la Soil Taxonomy ne pose, comme nous l'avons déjà mentionné, aucune difficulté particulière : en ce qui concerne les surfaces, il est démontré que sur la section de contrôle andique les caractères requis pour l'entrée dans l'ordre des Andisols sont respectés.

Au niveau des sous-ordres nous pouvons exclure les Aquands puisque nos solons ne présentent pas de traits morphologiques d'oxydo-réduction, donc pas de conditions aquiques. Les profils D et L possèdent à n'en pas douter des régimes hydriques udique et thermique isofrigid et ils entrent ainsi dans le sous-ordre des Cryands. Les capacités de rétention en eau à 1500 Kpa permettent le rattachement au sous ordre des Vitricryands.

Le rattachement final permet de distinguer les sols du type du profil D qui possèdent entre 25 cm et 1 m un horizon organique de couleur noire sur lequel l'on rencontre une couche contenant 1% de carbone en moins et une couleur plus vive (dans notre cas l'horizon supérieur de lapilli). Ces sols sont alors classés dans le sous-groupe des Thaptic Vitricryands.

Le profil suivant L ne peut être classé dans ce sous groupe des thaptic mais il vérifie les critères d'épipédon Umbric. Il possède en effet des valeurs de value et chroma inférieures à 3, des taux de carbone supérieurs à 0,6%. La présence de cet épipédon Umbric nous conduit à rattacher ce type de solons au sous groupe des Humic Vitricryands.

Le rattachement du profil J2 s'avère plus problématique. En effet, son altitude le place dans l'espace de transition entre les régimes thermiques isofrigid et isomesic. Ces définitions de conditions climatiques sont fondamentales puisque selon le choix qui est fait le rattachement des solons est différent. Dans le premier cas ce profil J2 doit être classé de façon équivalente à L, mais dans le second cas il entre dans le sous-ordre des Vitrandes et sur critère climatique dans le groupe des Udivitrands.

Le tableau n°9 présente les étapes de la classification de ces trois solums.

	PROFIL D	PROFIL L	PROFIL J2	
<b>ORDRE</b>	ANDISOLS	ANDISOLS	ANDISOLS	
<b>SOUS-ORDRE</b>	CRYANDS	CRYANDS	Cas 1 CRYANDS	Cas 2 VITRAND
<b>GROUPE</b>	VITRICRYANDS	VITRICRYANDS	VITRICRYANDS	UDIVITRANDS
<b>SOUS-GROUPE</b>	Thaptic VITRICRYANDS	Humic VITRICRYANDS	Humic VITRICRYANDS	Humic UDIVITRANDS

Cas 1: Le profil J2 est soumis à un régime thermique isofrigid.

Cas 2 : Le profil J2 est soumis à un régime thermique isomesic

Tableau n°9 : Classification des sols andiques de la séquence du Pichincha selon la Soil Taxonomy

\* Référentiel Pédologique

Le référentiel pédologique est un système de référence qui fonctionne à partir du repérage d'horizons diagnostiques. Dans notre cas, cette démarche nous conduit sans difficulté à rattacher aussi bien les horizons de surface que la plupart des paleosurfaces à l'horizon A vitrique (Avi). Les couches non altérées de lapilli correspondent à la définition des couches Mvo du Référentiel, c'est à dire des couches de roches meubles d'origine pyroclastique. Un certain nombre de niveau s'apparente à des horizons C eu égard au type de transition diffus qu'ils possèdent avec un horizon A supérieur dérivant d'une même série d'éruptions. L'horizon correspondant au niveau 7 du profil D et qui possède des propriétés andiques est sans nul doute un horizon silandique de par le rapport Alpy/Alox et la valeur de la silice extraite par l'oxalate. Si ce profil enterré avait été en surface ce rattachement aurait conduit à la référence des Silandosols. Cet horizon de par sa position au sommet du niveau 7 est naturellement un horizon And. Cependant, si l'on s'en tient de manière rigoureuse aux définitions des horizons silandiques et notamment en ce qui concerne les teneurs en carbone, il appartient au type Snd. Nous avons donc choisi de l'appeler A-Snd.

En ce qui concerne les horizons de surface la présence des horizons Avi en surface amène à la référence VITROSOLS. Pour compléter cette appellation, une série de qualificatifs, dont le choix est laissé à l'interprétation du pédologue, est associée à la référence.

Cette démarche nous permet de définir deux types de VITROSOLS sur notre séquence, en fonction de l'altitude :

4600-3800 : VITROSOLS, pyroclastiques, complexes, thaptiques, dystriques

3800-3300 : VITROSOLS, pyroclastiques, complexes, thaptiques, eutriques désaturés en surface

L'adjectif thaptique ne doit pas être considéré ici dans le sens restrictif que lui accorde la Soil Taxonomy (où sa définition est très contraignante) mais dans son acception générale désignant un profil composé de plusieurs séquences de sols (ou multisequum). La figure n°16 reprend l'ensemble de ces éléments sur les profils d'études.

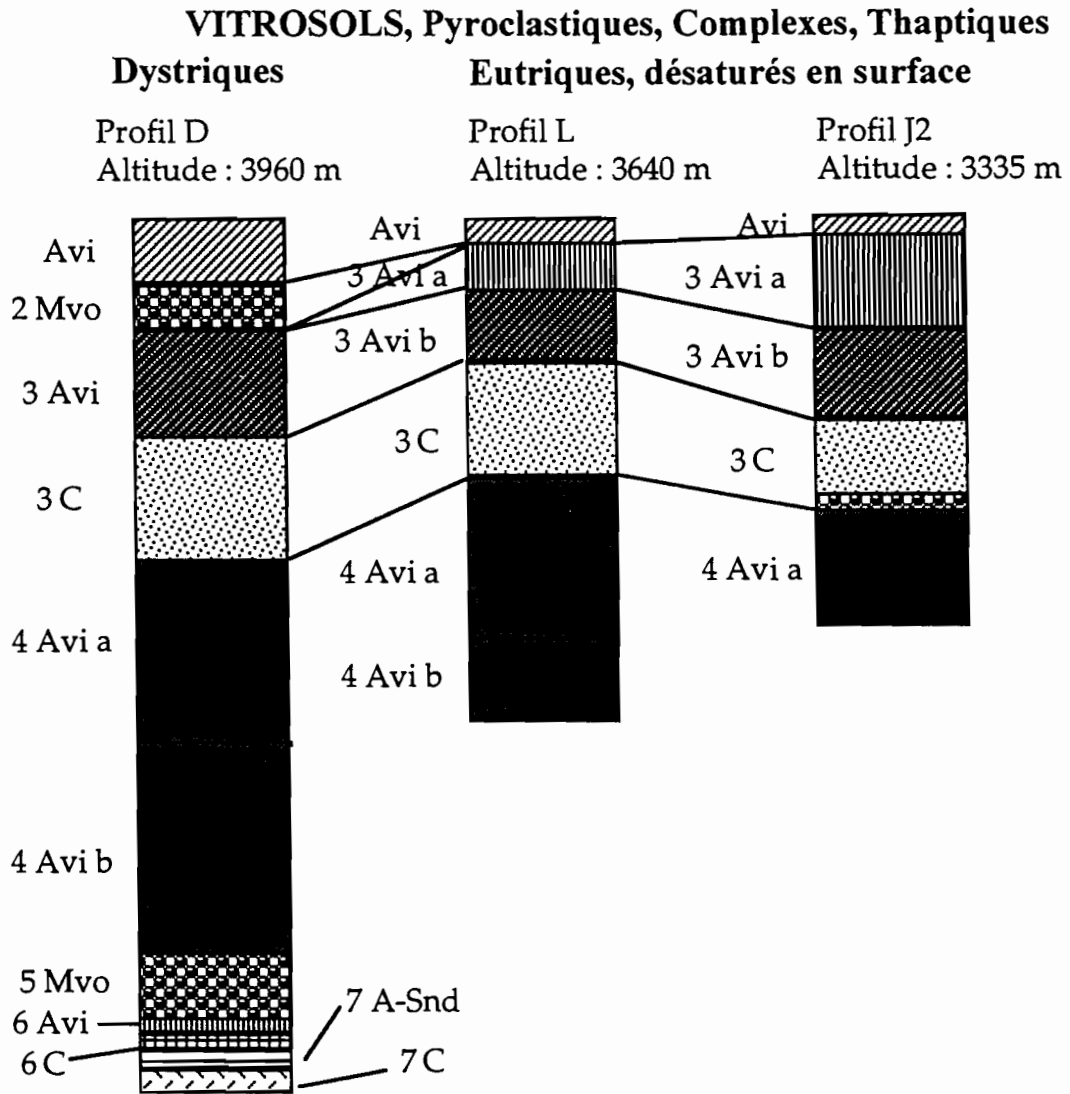


Fig n°16 : Sols et horizons du haut de bassin (référentiel pédologique)

\* Autres systèmes de Classification

Le tableau n°10 présente les rattachements de ces solums aux autres grands systèmes de classification actuels et passés.

WORLD REFERENCE BASE FOT SOIL RESOURCES, 1994	C.P.C.S., 1967	FAO, 1989.
Vitric Andosols	Andosols vitriques	Vitric Andosols

Tableau n°10 : Classification des sols du haut de bassin dans quelques autres systèmes de classification

### 3.2.5.2. Les sols du bas de bassin (Profil T)

#### \* Milieu, limite

Nous ignorons précisément la zone où ces sols succèdent aux Andosols. Ce changement correspondant à des variations climato-altitudinales, il est probable que la transition soit diffuse et progressive. Pourtant, le test Naf suggère que cette transition se réalise sur un espace réduit. En effet, en quelques mètres, on passe d'un solum réagissant au test à un autre ne présentant plus aucune réaction en deux minutes. Ce changement se produit pour des altitudes voisines de 3300 m. Ainsi, ces sols juvéniles correspondent aux étages à Eucalyptus de l'ancien cordon protecteur de QUITO et à la zone périurbaine des quartiers pauvres de la capitale.

On passe à une couverture pédologique radicalement différente, vers l'altitude de 2900 m, quand les cendres ante-glaciaires affleurent (on est alors sur la cangahua endurcie).

#### \* Soil Taxonomy

Le système de clefs de la soil taxonomy nous contraint à vérifier la non appartenance de ce solum à tous les ordres depuis les Histosols jusqu'au moment où des critères d'entrée dans un ordre seront vérifiés. L'élimination des premiers ordres se fait de façon évidente. Nous sommes assurés de la non appartenance aux ordres suivants : Histosols, Spodosols, Andosols (nous avons vu que les critères d'entrée n'étaient pas respectés), Oxisols, Vertisols, Aridisols et Ultisols. En ce qui concerne les Mollisols, il s'agissait de vérifier la présence d'un horizon mollic. Sur la base des critères de couleur nécessaires au mollic epipedon, nous pouvons éliminer la possibilité de rattachement à l'ordre des Mollisols. Ainsi, nous devons parcourir l'ensemble de la clef jusqu'à être conduits à l'ordre des Entisols et plus précisément au sous-ordre des Orthents. Les critères climatiques conduisent aux Troporthents. La teneur en verres volcaniques de nos sols, supérieure à 5%, et le calcul  $((A_{lox} + 1/2 Fe_{ox}) * 60) + \text{verres} (\%)$  qui donne des valeurs supérieures à 30, permettent d'affirmer l'appartenance de ce sol au sous-groupe des Vitandic Troporthents (Tableau n°11).

	PROFIL T
ORDRE	ENTISOLS
SOUS-ORDRE	ORTHENTS
GROUPE	TROPORTHENTS
SOUS-GROUPE	Vitandic TROPORTHENTS

Tableau n°11 : Classification des Entisols de la séquence du Pichincha selon la Soil Taxonomy

\* Référentiel Pédologique

L'identification des horizons de référence qui est toujours un préalable à toute utilisation du référentiel s'avère ici délicate. Les horizons très peu altérés de ce solum doivent-ils être considérés comme des horizons C ou comme des horizons jeunes du nouveau référentiel : Js pour les horizons de surface et Jp pour ceux de profondeur ?

Le profil type apparaît dans la figure n°17 suivante :

**REGOSOLS, Complexes,  
Thaptiques, Pyroclastiques,  
Eutriques**  
Profil T  
Altitude : 3115 m

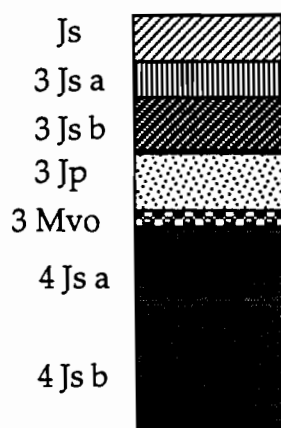


Fig n°17 : Sols et horizons du bas de versant (Référentiel Pédologique)

Le choix de la référence s'avère beaucoup plus aisé puisque ce sol correspond parfaitement à la définition des RÉGOSOLS : "Solums comportant à moins de 10 cm de profondeur un matériau non ou très peu évolué n'ayant pas acquis de structure pédologique généralisée, meuble ou peu dur sans contact lithique à moins de 50 cm de la surface." (BAIZE, 1995).

Ainsi, nous pouvons considérer que ce sol est un RÉGOSOL, pyroclastique, polycyclique, juvénile.

\* Autres systèmes de Classification

Le tableau n°10 présente le rattachements de ce solum aux autres grands systèmes de classification actuels et passés.

WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES 1994	C.P.C.S. 1967	FAO.
Regosols	Sols peu évolués	Regosols

Tableau n°10 : Classification des sols du bas de bassin dans quelques autres systèmes de classification

### 3.3. Discussion

#### 3.3.1. Facteurs limitants l'andosolisation dans la partie haute du bassin versant

Les solums de cette zone d'altitude correspondent donc à des Andisols vitriques. Dans un tel cas où les sols se trouvent au début de leur pédogenèse, il est fondamental de définir les facteurs qui ont limité leur évolution.

Dans le cas des Andosols, ces facteurs peuvent être regroupés en trois ensembles :

- L'altérabilité de la roche-mère
- Les conditions climatiques
- La durée de la pédogenèse

Le premier facteur ne peut être invoqué puisque nous sommes assurés que le substrat est essentiellement constitué de verres, c'est-à-dire de minéraux très facilement altérables.

Les conditions climatiques qui prévalent sur notre bassin auraient par contre pu s'avérer défavorables à une andosolisation complète, mais il n'en est rien. La présence d'un horizon d'Andosol allophanique en profondeur (7 A-Snd du profil D), alors que l'on est assuré de la stabilité du climat depuis 10000 ans, atteste de la possibilité d'une andosolisation complète sous ce régime climatique. Ces conditions peuvent donc conduire à une andosolisation modérée.

Si nous comparons les temps nécessaires à la formation des minéraux allophaniques au pas de temps entre éruptions, il est tout à fait logique que les horizons caractérisant les paleosurfaces soient demeurés au stade vitrique. Nous remarquerons de même que le seul horizon andique, au sens de la première catégorie de la soil taxonomy, correspond à une période de stabilité du volcan de 3000 ans. Ainsi, il est naturel que les matériaux de surfaces de moins de 300 ans ou les paléosurfaces, qui subissent un recouvrement par de nouveaux dépôts en moyenne tous les 700 ans, n'aient pas connu de synthèse significative d'allophanes. Tous ces éléments nous conduisent à affirmer que c'est bien le facteur temps, la durée possible du processus d'Andosolisation, qui est ici limitant.

Cette interprétation est tout à fait cohérente avec les données bibliographiques disponibles sur ce même sujet. Aux îles Vanuatu, en conditions plus favorables puisqu'avec des températures supérieures à celles des hauts sommets andins et avec une pluviométrie de plus de 2000 mm annuelle, Paul QUANTIN considère que le stade vitrique se maintient pendant 1000 ans environ (QUANTIN, 1992).

A l'intérieur de ce groupe des Vitrosols, un certain nombre de caractéristiques suggèrent que le profil D, situé à la plus haute altitude, soit également le plus évolué. Nous avons pu en effet, remarquer des propriétés de ce profil D, qui témoignent d'un degré d'évolution plus avancé que par exemple le profil J2. Nous remarquons ainsi, pour ce profil D, une teneur en matières organiques plus forte, des capacités de rétention des phosphates et des quantités de Al, Fe et Si extraits par l'oxalate plus élevées. De même les C.E.C. et les capacités de rétention en eau apparaissent accrues. A l'inverse, le Ph, la densité

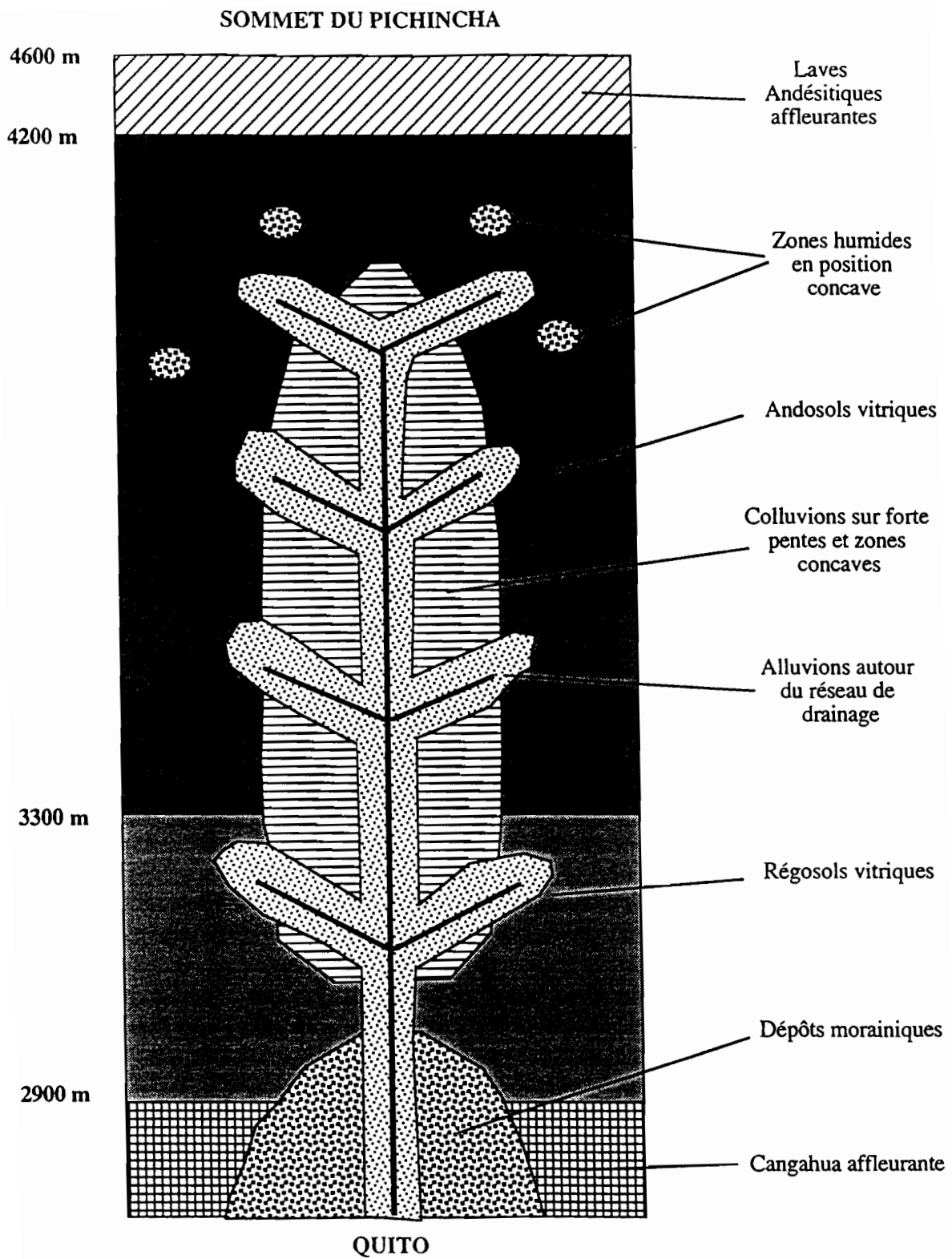


Fig n°18 : Modèle d'organisation spatiale des sols et des formations superficielles du bassin versant d'étude.



apparente et le taux de saturation sont plus faibles pour ce profil D que pour le profil J2.

Il s'avère donc que les différentes conditions climatiques de développement des sols, le long d'une séquence altitudinale, sont à même de produire une différenciation toposéquentielle dans les degré d'évolution de ces Andosols.

### 3.3.2. L'absence d'évolution des sols du bas de bassin

Les conditions climatiques, et notamment l'absence de permanence d'humidité (Cf. chapitre II) ainsi que des températures supérieures placent nos sols de bas de versant en situation différente. Ces conditions sont moins favorables à une andosolisation, et nous pourrions donc admettre que la vitesse de synthèse des minéraux allophaniques y est encore plus faible qu'en altitude. Nous pouvons supposer cependant que ces conditions sont favorables à la synthèse de minéraux secondaires du type phyllosilicates (notamment du type halloysitique). Or, cette argilisation nécessite un temps bien supérieur à celui demandé pour la synthèse des allophaniques en condition favorable. Nous comprenons donc parfaitement que le facteur temps soit ici encore plus limitant à l'évolution des sols.

La séquence générale Andosols-Régosols serait donc due à une toposéquence climatique des versants du Pichincha. Cependant, il faut souligner l'existence d'une certaine imprécision en ce qui concerne les datations des matériaux de surface : notre méthode par comparaison stratigraphique n'ayant pas la précision des méthodes de datations isotopiques. Or si l'horizon de surface du Profil D de haut de bassin ne résulte pas de la même éruption que celle de l'horizon supérieur des profils de bas de bassin (par exemple T) le facteur temps interviendrait également, la durée d'évolution des surfaces du bas de versant ayant été plus courte que celle du haut. Une combinaison des facteurs temps et climat pourrait alors expliquer la différenciation des sols observés.

### 3.3.3. Modèle d'organisation des sols

La connaissance acquise sur les sols et les formations superficielles de ce bassin versant nous permet de construire un modèle d'organisation spatiale. Ce modèle se trouve schématisé par la figure n°18 ci-contre.

Nous y retrouvons naturellement la différenciation essentielle, qui vient d'être détaillée, entre Andisols vitriques et Entisols vitriques. Mais ce schéma présente l'intérêt de replacer également dans leur contexte spatial, les zones de colluvions, d'alluvions et de dépôts de moraines.

Nous relèverons également l'existence dans l'étage à paramo de zones humides gorgées d'eau de manière temporaire ou permanente. Les sols de ces zones n'ont pas été étudiés ici. Néanmoins, il ne fait aucun doute que ceux-ci doivent subir des processus pédogénétiques particuliers liés à cet excès d'eau (redistribution du fer, microflore anaérobie...).

Naturellement, il s'agirait de tester les possibilités de généralisation de ce modèle, sur d'autres bassins versants voisins, afin d'être assuré de sa pertinence.

## CONCLUSION

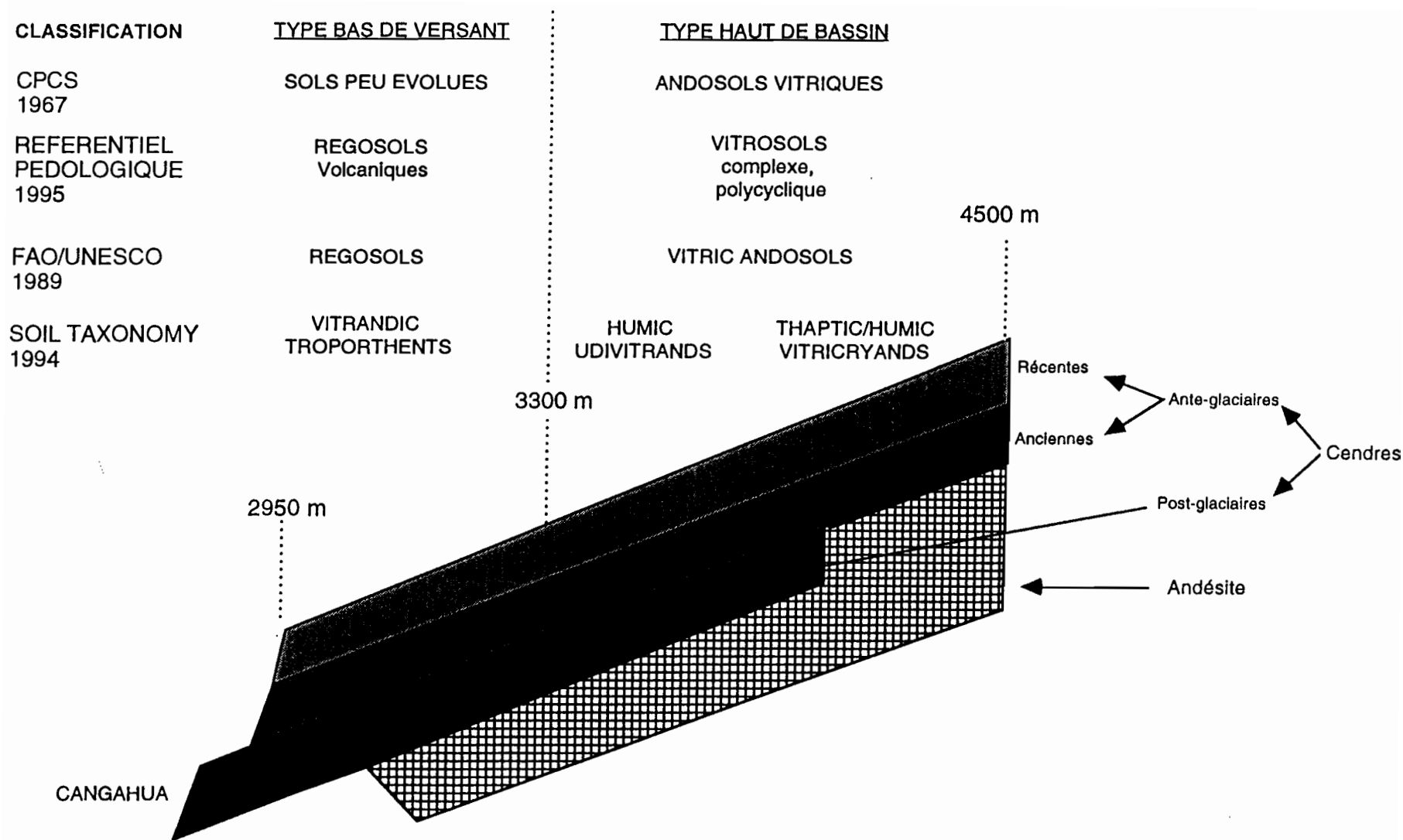


Fig n°19 : Classification générale des sols de la séquence d'étude du Volcan PICHINCHA

## CONCLUSIONS GENERALES

Le Pichincha est un volcan dont l'activité intense et récente constitue un frein au développement de la pédogenèse. Sa dernière éruption est encore trop récente pour que le temps ait permis une altération des minéraux primaires et une synthèse significative de minéraux secondaires. De même, depuis 10 000 ans le pas de temps entre les éruptions semble trop court pour que les dépôts pyroclastiques puissent connaître une évolution vers le stade andique proprement dit. La présence d'un horizon enterré possédant les propriétés andiques de la première catégorie des Andisols de la Soil Taxonomy et correspondant à une période de stabilité du volcan, atteste du fait que le temps soit ici le facteur limitant. Le temps nécessaire à une andosolisation complète s'avère être supérieur au temps moyen entre éruptions qui n'est que de 700 ans. Ce résultat se révèle tout à fait comparable aux données recueillies par différents auteurs dans d'autres milieux (P. QUANTIN aux Iles VANUATU, SHOJI au Japon...).

Bien que nous nous trouvions dans des stades juvéniles de la pédogenèse, nous observons cependant une première différenciation climato-altitudinale (Cf Fig n°19 ci-contre).

Ainsi, les conditions de versants, plus favorables à l'altération, ont permis une première évolution des sols jusqu'au stade vitrique des Andisols. Par contre, celles du bas de bassin ont constitué un frein supplémentaire à cette évolution et les sols sont ainsi encore quasiment à l'état des couches de pyroclastes originelles. Il n'y a ici ni synthèse d'allophanes ni argilisation.

Si deux types peuvent être distingués en référence à des valeurs seuils de critère de classification, la couverture pédologique de ce versant se présente bien en une séquence d'altération et d'évolution plus ou moins avancées en fonction de l'altitude. Il n'y a pas, au moins actuellement, de processus pédogénétiques en compétition qui pourraient donner naissance à des types de sols radicalement différents. Nous avons donc affaire à une séquence de sols basée sur des variations - dûes à une différenciation des conditions climatiques - d'ampleur et de vitesse d'un même processus : l'andosolisation dans ces premiers stades.

Cette première distinction induit naturellement des variations de propriétés des sols le long d'une séquence altitudinale. En particulier, les propriétés physiques varient sensiblement d'un type à l'autre. L'augmentation de la densité apparente et de la résistance au cisaillement, la diminution des capacités de rétention en eau sont fortement liées avec la diminution de l'altitude.

Ces caractéristiques doivent-ils être mis en relation avec les constituants particuliers des Andosols ? Les trop faibles teneurs en minéraux allophaniques de nos sols tendraient à nous faire répondre par la négative.

Il semble par contre que la succession de couches présentant des porosités différentes, tant par leur taille que par leur architecture, ait un impact considérable sur les flux hydriques. Nous assistons ainsi à des réorientations latérales des circulations d'eau. Les possibilités de saturation et de passage à un état plastique ou liquide pourraient être le fait de simples différences relatives d'organisation de l'espace poral.

Ces éléments mis en relation avec de faibles cohésions semblent considérablement plus déterminants, sur les possibilités de mouvements de masse, que des propriétés particulières liées à la présence en faible quantité de constituants allophaniques.

Il serait souhaitable de mieux définir l'impact des constituants allophaniques tant en ce qui concerne cette cohésion interne que sur la dynamique des flux hydriques. Ceci nécessite, de façon évidente, un contrôle de ces mécanismes sur une large gamme de teneurs en minéraux allophaniques. De même, le rôle des composés humiques en connexion avec ces constituants minéraux, sur les cohérences et les stabilités des structures, devrait être précisé.

Quoi qu'il en soit, il s'avère, à l'issue de ce travail, que la couverture pédologique des versants du Pichincha est soumise à un processus général d'évolution équivalant à celui que P. FAIVRE a observé en Colombie. Celui-ci concluait en effet son étude des sols intrandins de Colombie, d'une remarque qui s'applique parfaitement à notre cadre : "L'évolution pédologique des milieux intrandins est gouvernée par l'action prépondérante des facteurs climatiques s'exerçant sur une couverture fortement marquée par les influences pyroclastiques" (P. FAIVRE, 1988).

Si une influence climatique se fait déjà sentir ici, l'originalité de couvertures pédologiques des versants du Pichincha réside essentiellement dans la jeunesse des matériaux pyroclastiques. C'est ce caractère juvénile qui contribue à ce que la toposéquence des sols du Pichincha diffère sensiblement de la séquence classique des sols volcaniques équatoriens, à savoir des Andosols d'altitude, passant progressivement à des Mollisols (Cf. Fig n°4).

# **BIBLIOGRAPHIE**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COLLECTIF., 1983.- L'essai au scissomètre.- in Etude Géotechnique et reconnaissance des sols, Revue Française de géotechnique, n°22, pp 65-69

COLLECTIF, 1994.- World Reference Base for Soil Resources.- SPAARGAREN Ed., Rome 159 p.

AFES, 1995.- Référentiel pédologique 1995.- INRA Edt. Coll. Techniques et pratiques, 332 p.

ANDRIESSE J.P. VAN ROSMALEN H.A. MULLER A., 1976.- On the variability of amorphous materials in Andosols and their relationships to irreversible drying and P-retention.- Geoderma 16 pp. 125-138

BESOAIN E., SEPULVEDA G, 1981.- Características y propiedades de algunos Dystrandeps de la Region de Los Lagos, sur de Chile. Parte I : Mineralogia, genesis y propiedades de los suelos.- Agricultura tecnica de Chile. 41 (4) pp. 197-220.

BRONGER A., CATT A.J., 1989.-Paleosols : problems of definition, recognition and interpretation.- In Paleopedology : nature and application of paleosols. Catena supplement n°16, BRONGER et CATT (Eds), pp. 1-7

CANADAS L., 1983.- El mapa bioclimático y ecologico del Ecuador.- MAG-PRONAREG 2°ed, Quito, 207 p.

COLMET-DAAGE F. GAUTHEYROU (J. et M.) DELAUNE M. CUCALON F., 1967.- Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques : Parties 1 et 2.- Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. V, n°1, pp. 3-38 et pp. 353-392

COLMET-DAAGE F. de KIMPE C. DELAUNE M. SIEFFERMANN G. GAUTHEYROU (J. et M.) FUSIL G. KOUKOU M., 1969.- Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques : Partie 3 (Comparaison de l'évolution de quelques sols de régions tropicales chaudes et tempérées froides d'altitude).- Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. VII, n°4, pp.495-560.

CRONIN S.J., NEALL V.E., PALMER A.S., 1996.- Investigation of an aggrading paleosol developed into andesitic ring-plain deposits, Ruapehu volcano, New Zealand.- Geoderma, 69 (1996) pp. 119-135.

CUSTODE E., De NONI G., TRUJILLO G. VIENNOT M., 1992.- La cangahua en el Ecuador. Caracterizacion morpho-edafologica y comportamiento frente a la erosion.- TERRA, Vol. 10, Num. Especial Suelos Volcanicos Endurecidos, Mexico, pp. 332-346

DAHLGREN R., SHOJI S., NANZYO M., 1993.- Mineralogical characteristics of volcanic ash soils.- In Volcanic ash soils, Genesis, properties and utilization, Developments in Soil Science n°21, Elsevier et al. pp. 101-143.

DUCHAUFOR Ph., 1983.- Pédogénèse et classification.- In Pédologie tome I, 2° Ed. Masson, 491 P.

EGASHIRA K. KAETSU Y. TAKUMA K., 1983.- Aggregate stability as an index of erodibility of Ando soils.- Soil Sci. Plant Nutr. 29 (4) pp. 473-481

FAIVRE P., 1988.- Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie (Amérique du sud).- Thèse d'état, Université de Nancy I, 563 P.

FAO, 1989.- FAO-UNESCO : Carte mondiale des sols, Légende révisée. Rapport sur les ressources du monde, n°60, FAO, Rome, 125 P.

FLAGEOLLET J.C., 1989 .-Les mouvements de terrain et leur prévention.- Masson, Collection Géographie, 224 P.

GARCIA HERNANDEZ J.E.; RODRIGUEZ RODRIGUEZ A., 1990.- Altération expérimentale des cendres balsatiques dans l'oxalate d'ammonium 10-4M, Science du Sol AFES, vol. 28, n°3, 193-201.

HALL M.L. MOTHESS P.A., 1994.-Tefroestratigrafia holocénica de los volcanes principales del valle interandino, Ecuador.- Estudios de Geografía, Vol. 6 : el contexto geológico del espacio físico Ecuatoriano, pp. 47-68

HERBILLON A.J., 1994.- Oxydes de fer, gibbsite, oxydes de manganèse et minéraux allophaniques.- In Constituants et propriétés du sol BONNEAU et SOUCHIER Eds. 2°Edt. Pédologie tome II, pp.17-45

HERBILLON. A.J., 1983.- Apport des approches expérimentales à la connaissance des constituants minéraux du sol à organisation cristalline à courte distance. Science du Sol, (1983) 3-4 pp. 153-162

HETIER J.M., 1975.- Formation et évolution des Andosols en climat tempéré. Thèse Doc., Univ. Nancy I, 194 p.

IWATA S. YAMAMOTO. K. SATO. T., 1990.- Amorphous inorganic material contents and changes in plasticity indexes by air drying.- So. Sc. Am. Jour. 54:2 pp. 558-559

JANEAU J.L., 1996.- Informe de Actividades del 10 de Octubre de 1995 al 15 de Marzo de 1996.-Proyecto SISHILAD - aera de edafología, 45 P.

LACHOWICZ H., 1991.- Posibles aplicaciones de las rocas volcánicas y piroclásticas en el Ecuador.- In El paisaje volcánico de la sierra ecuatoriana, Estudios de geografía, Vol. 4, Quito, pp. 61-70.



- LEAMY M.L., SMITH G.D., COLMET-DAAGE F., OTOWA M., 1980.- The morphological characteristics of Andisols.- In Soil with variable charge, B.K.G. Theng, Ed. New Zealand Soc. Soil Sci, Lower Hutt, pp. 281-301.
- LULLI L. BIDINI D. QUANTIN P., 1988.- A climo and litho soil-sequence on the Vico volcano (Italy).- Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. XXIV, n°1 pp. 49-60
- MUXART T., BIROT P., 1976.-L'altération météorique des roches.- Département de Géographie Université de Paris-Sorbonne, n°4, 279 p.
- NANZYO M. SHOJI S. DAHLGREN R., 1993.- Physical characteristics of volcanic ash soils.- In Volcanic ash soils, Genesis, properties and utilization, Developments in Soil Science n°21, Elsevier et al. pp. 189-201.
- PARFITT R.L. 1990.- Soils formed in tephra in different climatic regions.- Transactions du 14° congrès International de la Science du Sol, Volume VII, pp. 134-139.
- PARFITT R.L., CLAYDEN B., 1991.- Andisols - The development of a new order in Soil Taxonomy.- Geoderma, 49 (1991) pp. 181-198.
- PARFITT R.L., KIMBLE J.M., 1989.- Conditions for formation of allophane in soils.- Soil. Sci. Soc. Am. J., 53 pp. 971-977
- PARFITT R.L., RUSSEL M., ORBELL G.E., 1983.- Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. Geoderma, 29: 41-57  
pp. 281-291.
- PARFITT R.L., WILSON J.M., 1985.- Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In Volcanic soils, E. FERNANDEZ CALDAS et DAN H. YAALON (Eds). Catena Supplement 7, pp. 1-8
- QUANTIN P. FERNANDEZ CALDAS E. TEJEDOR SALGUERO M.L., 1978.- Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Ile Canaries) .- Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. XVI, n°3, 1978 et n°4, pp.397-412
- QUANTIN P., 1985.- Characteristics of the Vanuatu Andosols.- In Volcanic soils, E. FERNANDEZ CALDAS et DAN H. YAALON (Eds). Catena Supplement 7, pp. 99-105
- QUANTIN P., 1989.-Andisols, 4° vers.- in Référentiel Pédologique Français, 3° proposition Avril 1990 pp.71-78
- QUANTIN P., 1992.- Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (vanuatu). Etude de la pédogénèse initiale en milieu tropical.- Editions de l'ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris, 498 p.
- QUANTIN P., 1995.- Andosols et Vitrosols.- In Référentiel Pédologique 1995, Collec. Techniques et Pratiques, INRA edit., pp. 85-93.

RIEZEBOS P.A., 1985.- Concentration levels of heavy minerals in two volcanic soils from Colombia : a possible paleoenvironmental interpretation.- In Volcanic soils, E. FERNANDEZ CALDAS et DAN H. YAALON (Eds). Catena Supplement 7, pp. 63-76

ROBERT M. HERBILLON A.J., 1990.- Application aux argiles des sols. Genèse, nature et rôle des constituants argileux dans les principaux types de sols des environnements volcaniques insulaires.-In Matériaux argileux. Structure, propriétés et applications. Sous la direction de A. DECARREAU. Société Française de Minéralogie et de Cristallographie, Paris, pp. 539-576

RODRIGUEZ PASCUAL C., GALVAN J., TEJEDOR-SALGUERO M.L., FERNANDEZ-CALDAS, 1976.- Estudio mineralógico de las arcillas de andepts en una secuencia cronológica, mediante microscopia electrónica.- Anales de edafología y agrobiología. Universidad de Chile. pp. 899-1001.

SHOJI S., DAHLGREN R., NANZYO M., 1993.- Genesis of volcanic ash soils.- In Volcanic ash soils, Genesis, properties and utilization, Developments in Soil Science n°21, Elsevier et al. pp. 37-71.

SHOJI S., DAHLGREN R., NANZYO M., 1993.- Morphology of volcanic ash soils.- In Volcanic ash soils, Genesis, properties and utilization, Developments in Soil Science n°21, Elsevier et al. pp. 7-35.

SIEFFERMANN G., 1973.- Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun.- Thèse Doct. Sci. Strasbourg. Mémoire ORSTOM n°66, 183 p.

SOIL SURVEY STAFF, 1994.- keys to soil taxonomy.- 6<sup>e</sup>ed, USDA, Soil Conservation Service, 306 P.

TRICHET J., 1969.- Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques.- Thèse de doctorat d'Etat., Fac. Science de Paris, 232 p.

UGOLINI F.C., DAHLGREN R.A., 1991.- Weathering environments and occurrence of Imogolite/Allophane in selected Andisols and Spodosols.- Soil Sci. Am. J. 55 pp. 166-1171

VERA R., LOPEZ R, 1992.- Tipología de la Cangahua.-TERRA, Vol. 10, Num. Especial Suelos Volcanicos Endurecidos, Mexico, pp. 113-119

WADA K., 1980.- Mineralogical characteristics of Andisols.- In Soil with variable charge, B.K.G. Theng, Ed. New Zealand Soc. Soil Sci, Lower Hutt, pp. 17-34.

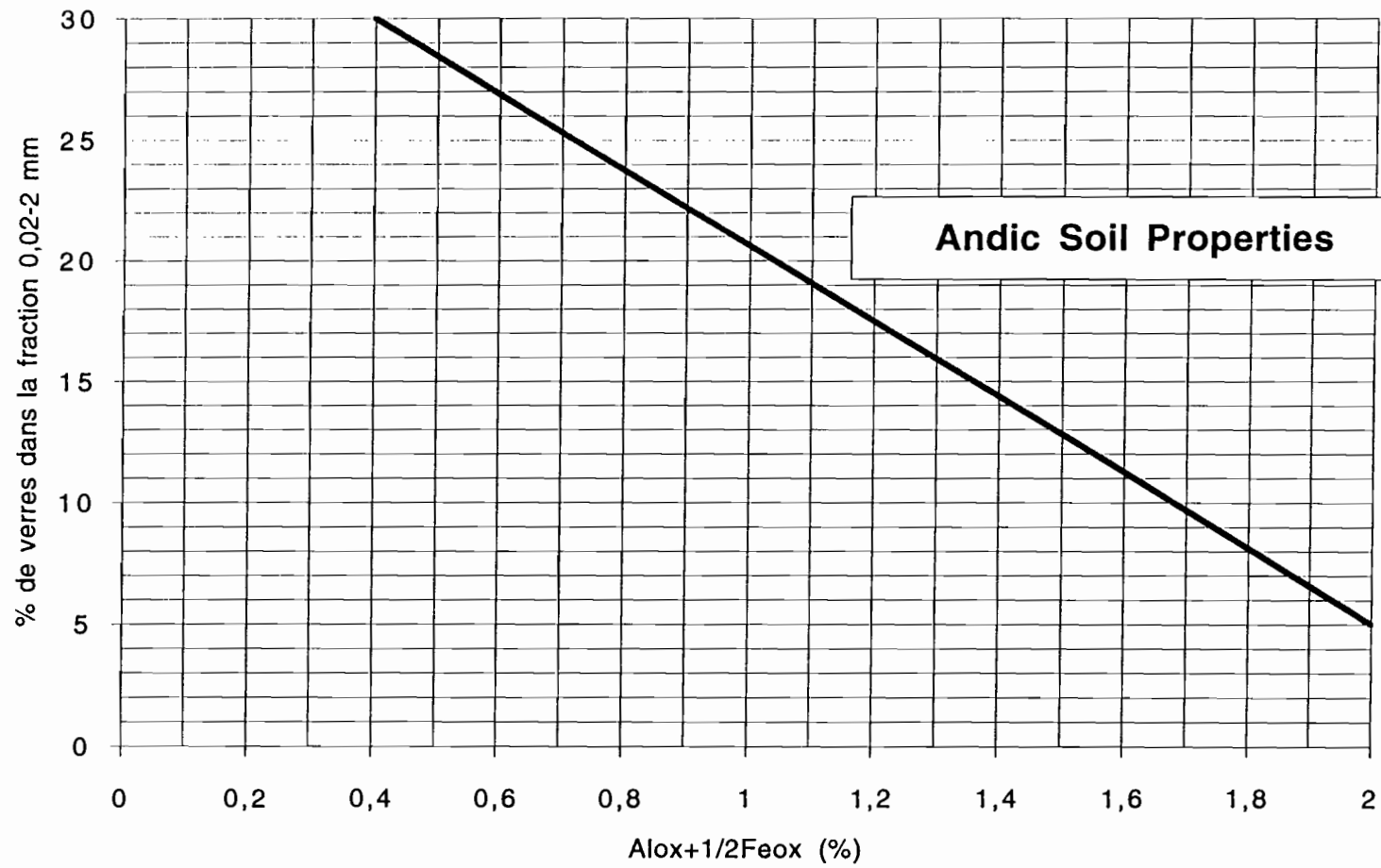
WADA K. KAKUTO Y., 1985.- Embryonic Halloysites in Ecuadorian Soils derived from Volcanic Ash .- Soil Sci. Am. J. 49, pp.1309-1318

WADA K., 1986.- Mineral formed and mineral formation from volcanic ash by weathering.- Chemical Geology 60 pp. 17-28.

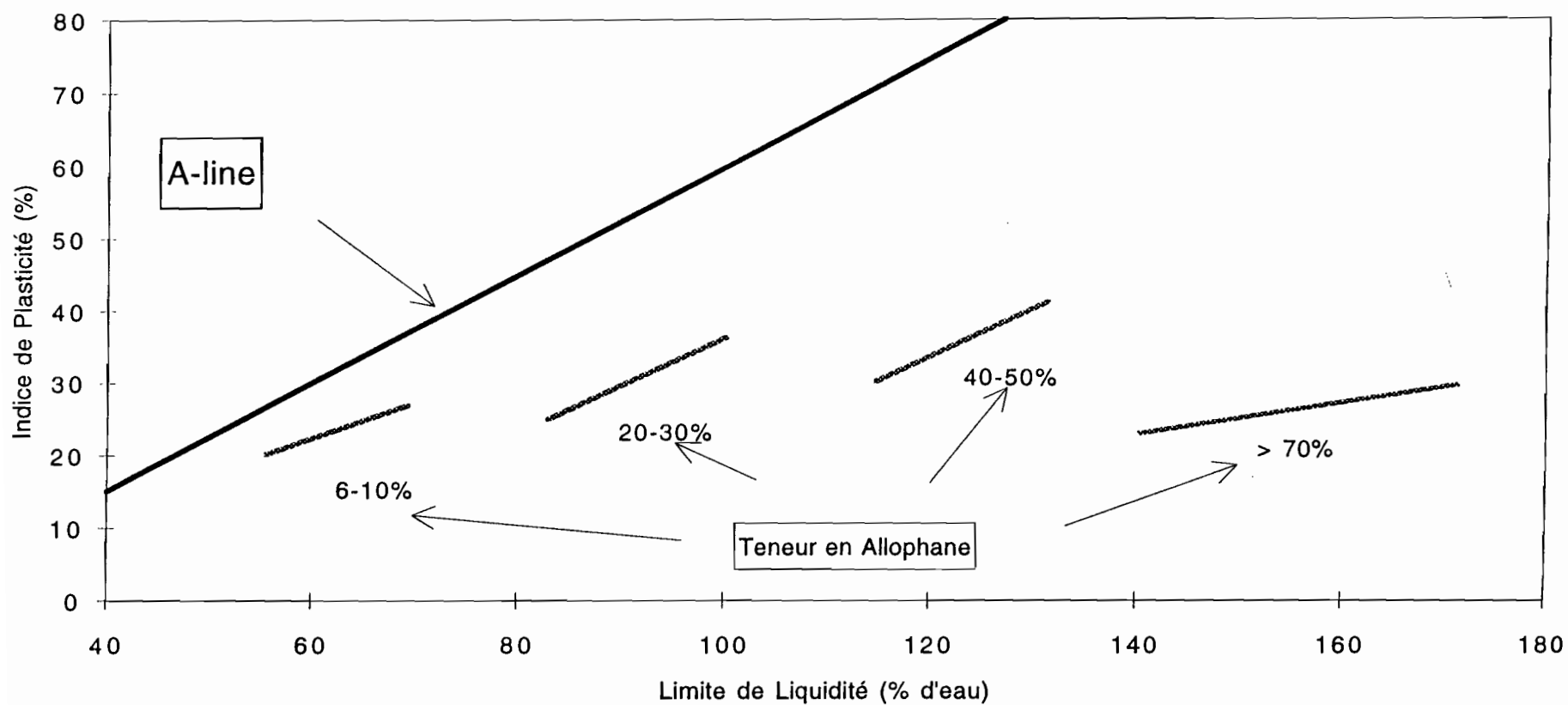
- WADA K., 1989.- Allophane and Imogolite.- In Minerals in Soil Environments, J.B. DIXON et S.B. WEEDS Eds., 2<sup>e</sup> Edi. Soil Sci. Soc. Am., WI, pp. 1051-1087
- WARKENTIN B.P. MAEDA T. SOMA K., 1988.- Physical characteristics for classification of Andisols.- In Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop, KINLOCH, SHOJI, BEINROTH et ESWARAN Eds., Japan, pp. 97-107.
- WARKENTIN B.P., MAEDA T., 1980.- Physical and mechanical characteristics of Andisols.- Soil with variable charge, B.K.G. Theng, Ed. New Zealand Soc. Soil Sci, Lower Hutt,
- WINCKELL A., ZEBROWSKY C., SOURDAT M., 1989.- Les paysages naturels d'Equateur.- Carte au 1/1 000 000, WINCKELL Ed., in géographie de base de l'Equateur T. IV CEDIG IPGH-OSTOM
- WINCKELL A., ZEBROWSKI C., 1992.-La Cangahua en Equateur : le contexte paleogéographique de sa formation.- TERRA, Vol. 10, Num. Especial Suelos Volcanicos Endurecidos, Mexico, pp. 107-112
- YOSHINAGA N., 1988.- Mineralogy of Andisols.- In Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop, KINLOCH, SHOJI, BEINROTH et ESWARAN Eds., Japan, pp. 45-59.
- ZEBROWSKY C., 1975 .- Etude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion .- Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. XIII, n°3/4, pp. 255-278
- ZIDA M., 1994.-Andisols et sols andiques dans le massif vosgien.- DEA Université de Nancy I, 53 p.

# ANNEXES

### Propriétés Andiques

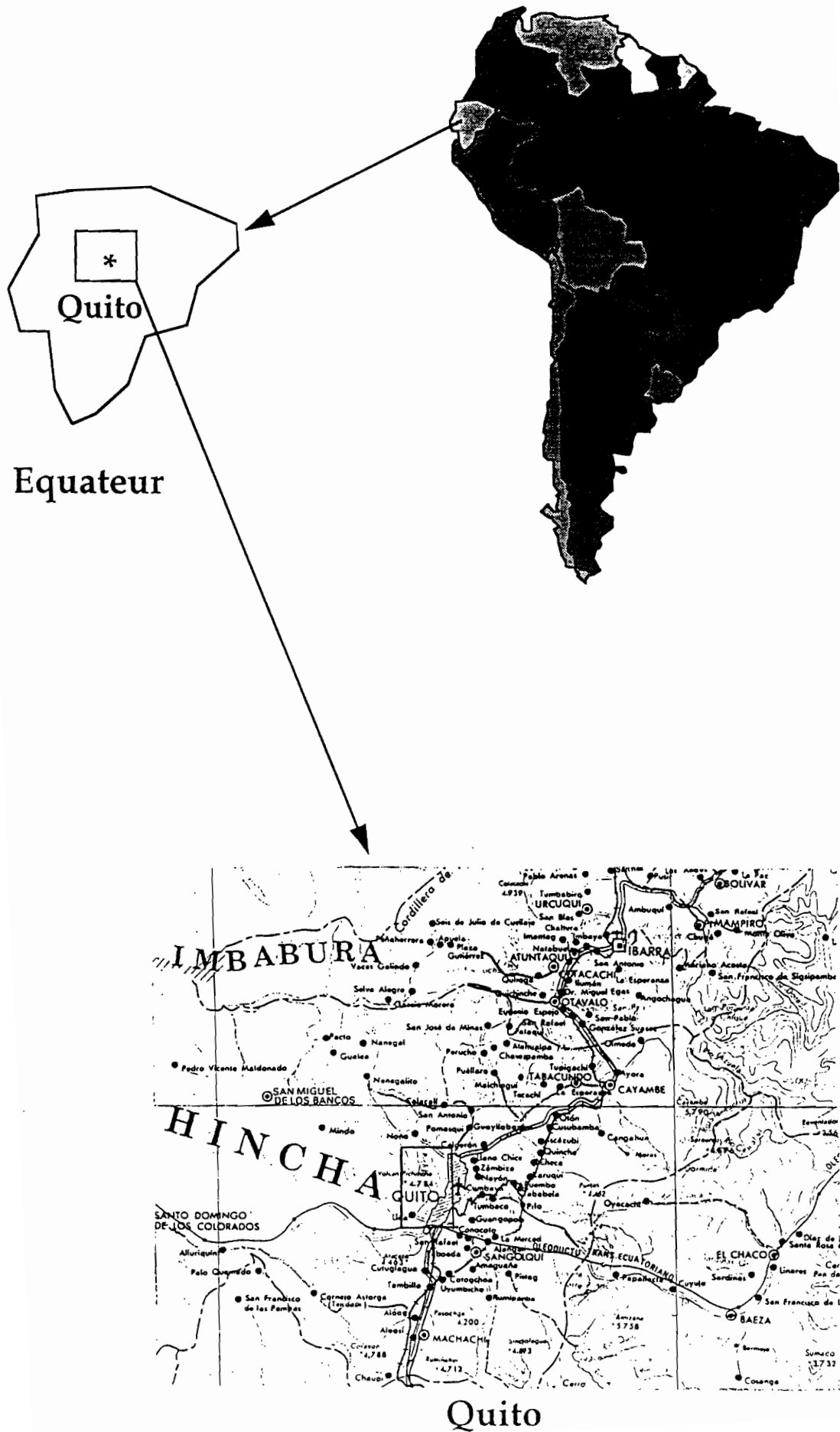


### Plasticité de Casagrande

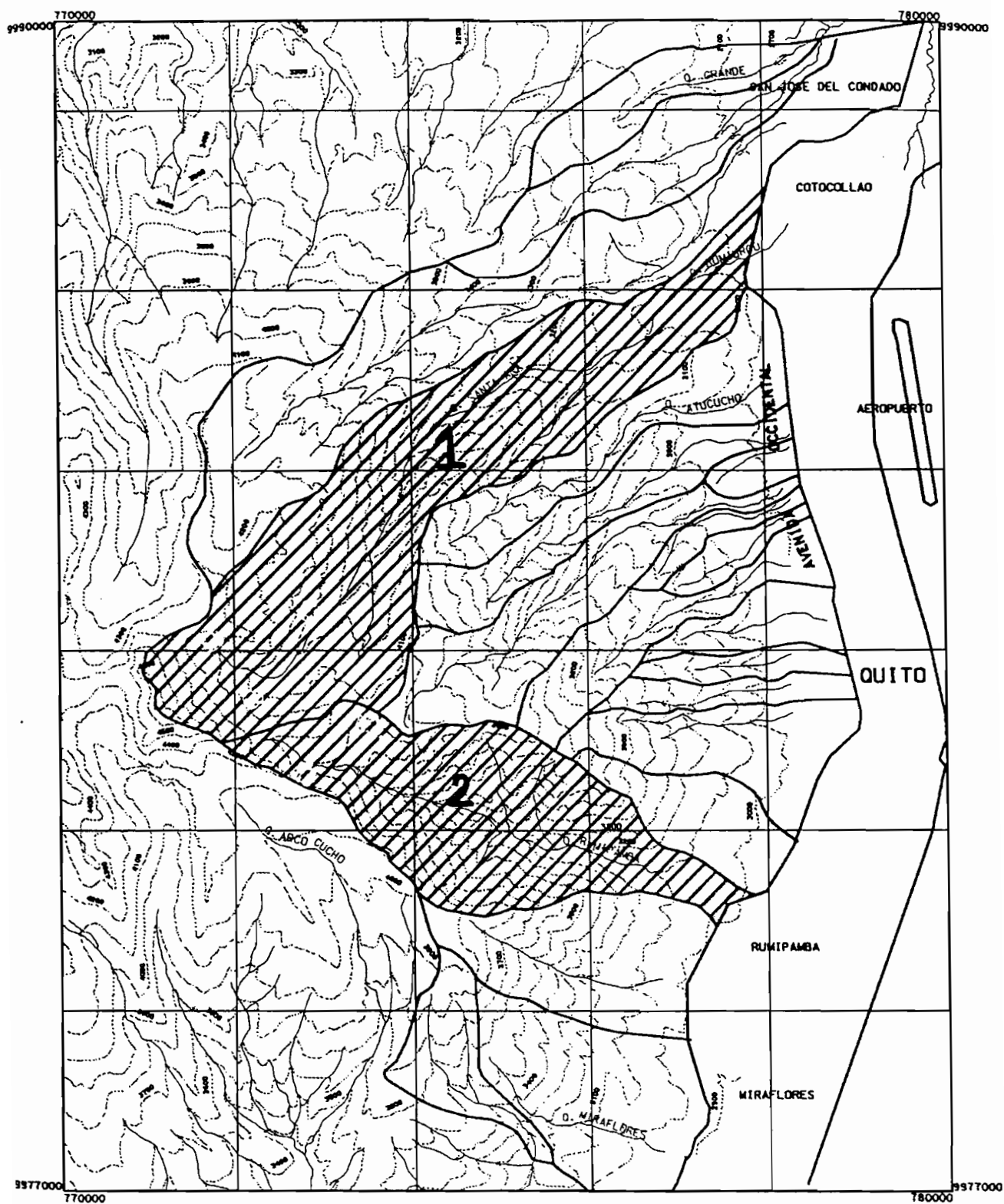


ANNEXE II : Position des Andosols sur le graphique de plasticité de Cassagrande

# ANNEXE III : Localisation de la zone d'étude



### ANNEXE III : Localisation de la zone d'étude



**SIMBOLOGIA**

- SITIOS DE ESTUDIOS
- LIMITE DE CUENCAS

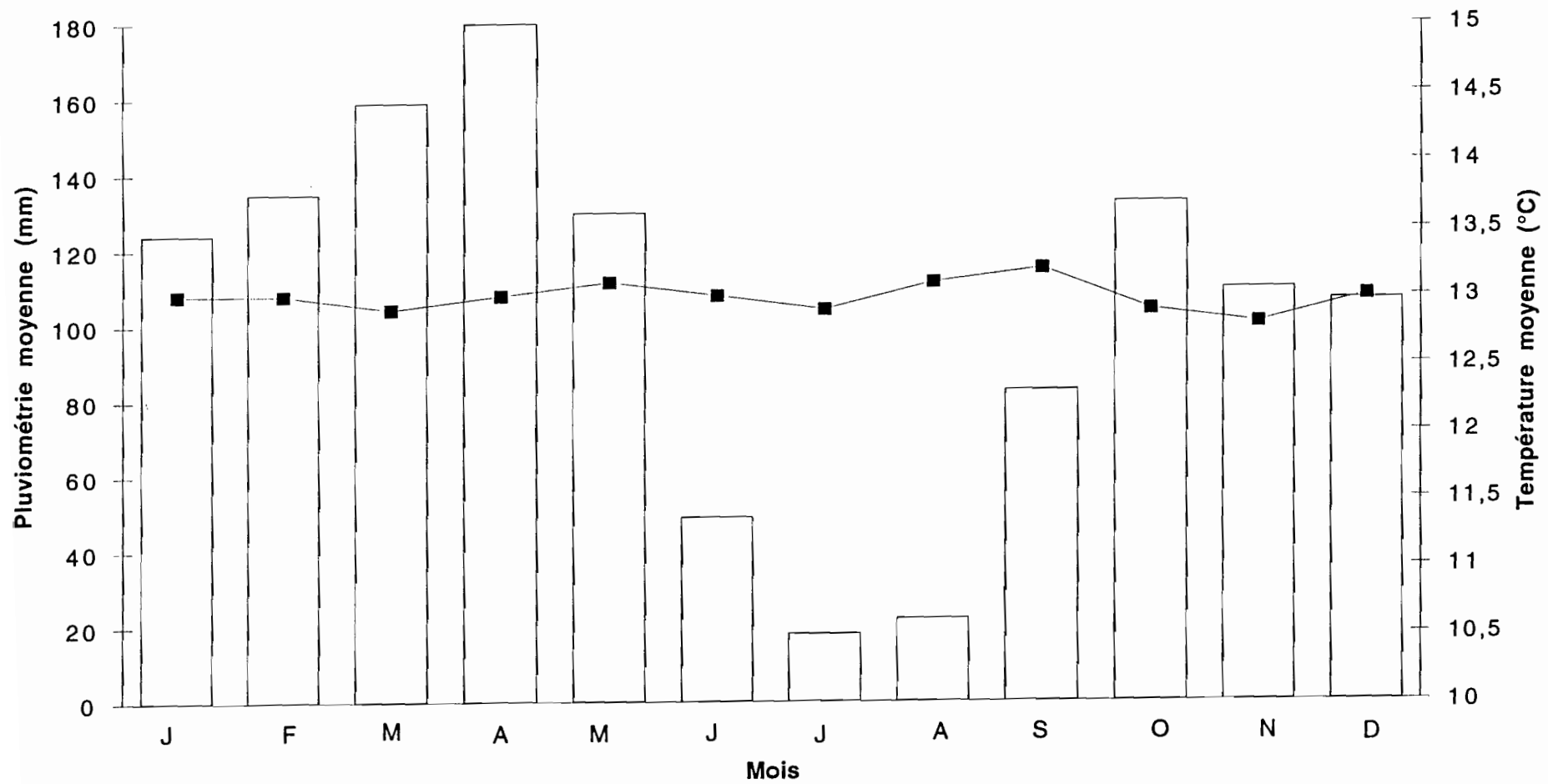


ESCALA GRAFICA  
0 2000 m.

**1 : Bassin versant de la Rumihurcu : lieu d'étude**

**2 : Bassin versant de la Rumipamba**





ANNEXE IV : Pluviométrie et Température à Quito (1890-1957)

## ANNEXE V : Caractéristiques morphologiques des quatres profils d'étude

### PROFIL D

Altitude : 3960 m

Localisation géographique : 00° 09' 26" Latitude Sud

78° 33' 09" Longitude Ouest

Pente : 30%

Topographie : convexe

Végétation, occupation du sol : Paramo

Exposition : Sud-Sud Est

### DESCRIPTION

0-42 cm :	Avi	10 YR 2,5/1; grumeleux; limoneux; quelques lapilli inclus (20%); frais; nombreuses racines fines, moyennes et grosses; transition nette et horizontale.
42-57 cm :	2 Mvo	Lapilli; blanchâtre; particulière; lapilli grossier (1 cm); frais; traversé par quelques racines moyennes et grosses, transition nette et horizontale
57-135 cm :	3 Avi	10 YR 2,5/1 à 10 YR 3/2; massif à sous structure polyédrique peu affirmée de 1 à 2 cm; limono-argileux; quelques lapilli inclus (10%); frais; quelques racines; transition diffuse.
135-215 cm :	3 C	10 YR 5/3; massif; sableux; quelques lapilli inclus à la base de cet horizon; frais; peu de racines; peu cohérent; transition nette et horizontale.
215-335 cm :	4 Avi a	10 YR 3/2; massif à sous structure polyédrique; argilo-limoneux; frais; très peu de racine; transition diffuse.
335-415 cm :	4 Avi b	10 YR 2,5/1; massif à sous stucture polyédrique subangulaire; argilo-limoneux; quelques lapilli inclus (10%); frais; très peu de racines; transition nette et horizontale.
415-460 cm :	5 Mvo	Lapilli; blanchâtre-grisâtre; particulière; lapilli grossier (1 cm); frais; plus de racines, transition nette et horizontale.
460-480 cm :	6 Avi a	10 YR 3/2, massif, argilo-limoneux, humide, transition nette et horizontale.
480-490 cm :	6 C	10 YR 6/3; massif; sablo-argileux, humide mais sans suintement; transition nette et horizontale.
490-500 cm :	7 A-Snd	10 YR 2,5/1; massif; argilo-limoneux; quelques lapilli en décomposition de couleur rouille; humide mais sans suintement; sensation cireuse au toucher; transition nette et horizontale.
500-510 cm :	7 C	10 YR 4/2; massif; argilo-limoneux; humide mais sans suintement; sensation cireuse au toucher

## ANNEXE V : Caractéristiques morphologiques des quatres profils d'étude

### PROFIL L

Altitude : 3640 m

Localisation géographique : 00° 08' 24" Latitude Sud  
78° 32' 08" Longitude Ouest

Pente : 25%

Topographie : convexe

Végétation, occupation du sol : Prairie

Exposition : Sud-Sud Ouest

### DESCRIPTION

0-20 cm :	Avi	10 YR 2,5/1; grumeleux; sablo-limoneux; frais; nombreuses racines fines, moyennes et grosses; transition diffuse.
20-50 cm :	3 Avi a	10 YR 3/2; massif à sous structure grumeleuse; limono-sableuse; lapilli inclus (20%); frais; nombreuses racines; transition nette et horizontale.
50-103 cm :	3 Avi b	10 YR 3/1; massif à sous structure polyédrique peu affirmée de 0,5 cm; sablo-limoneux; quelques lapilli inclus (10%) frais; nombreuses racines; transition nette et horizontale.
103-174 cm :	3 C	10 YR 4/2; massif; sableux; quelques lapilli inclus à la base de cet horizon; frais; quelques racines; peu cohérent; transition nette et horizontale.
174-260 cm :	4 Avi a	10 YR 3/1; massif à sous structure polyédrique; argilo-limoneux; frais; très peu de racine; transition diffuse.
260-x cm :	4 Avi b	10 YR 3/1; massif à sous stucture polyédrique; argilo-limoneux; nombreux lapilli grosier inclus (50%); frais; peu de racines.

## ANNEXE V : Caractéristiques morphologiques des quatre profils d'étude

### PROFIL J2

Altitude : 3335 m

Localisation géographique : 00° 08' 17" Latitude Sud  
78° 31' 55" Longitude Ouest

Pente : 10%

Topographie : convexe en limite de bassin

Végétation, occupation du sol : Culture, eucalyptus

Exposition : Sud-Sud Est

### DESCRIPTION

0-15 cm :	Avi	10 YR 3/3; grumeleux; limoneux; lapilli (15%); frais; nombreuses racines fines, moyennes et grosses; transition diffuse.
15-75 cm :	3 Avi a	10 YR 2,5/1; massif à sous structure polyédrique subangulaire peu affirmée; limono-argileux; lapilli inclus (15%); frais; nombreuses racines; transition diffuse.
75-123 cm :	3 Avi b	10 YR 4/2; massif; sableux; quelques lapilli à la base (10%); frais; nombreuses racines; peu cohérent; transition nette et horizontale.
128-185 cm :	3 Avi c	10 YR 3/3; massif à sous structure polyédrique subangulaire peu affirmée (0,5 cm); argileux; revêtements noirs sur les surfaces des agrégats; sec; quelques racines; transition nette et horizontale.
185-195 cm :	3 Mvo	Grisâtre; particulière; grossier à ciment limon-argileux; sec; peu de racines; transition nette et horizontale.
195-x cm :	4 Avi	10 YR 4/4; massif; argilo-limoneux; quelques lapilli fins inclus (10%); sec; peu de racines.

## ANNEXE V : Caractéristiques morphologiques des quatres profils d'étude

### PROFIL T

Altitude : 3115 m

Localisation géographique : 00° 08' 04" Latitude Sud  
78° 31' 59" Longitude Ouest

Pente : 10%

Topographie : convexe en bas de versant

Végétation, occupation du sol : Eucalyptus, zone périurbaine

Exposition : Sud-Sud Ouest

### DESCRIPTION

0-30 cm :	Js	10 YR 4/4; grumeleux; argilo-limoneux; lapilli (10%); frais; nombreuses racines fines, moyennes et grosses; transition diffuse.
30-55 cm :	3 Js a	10 YR 3/2; massif à sous structure polyédrique grumeleuse (1 cm) et polyédrique peu affirmée (0,5 cm); sablo-limoneux; lapilli inclus (30%); frais; nombreuses racines; transition diffuse.
55-92 cm :	3 Js b	10 YR 3/2; massif; sableux; frais; nombreuses racines; peu cohérent; transition diffuse.
92-109 cm :	3 Jp	10 YR 5/3; massif; sableux; lapilli inclus (30%); sec; quelques racines; transition nette et horizontale.
109-112 cm :	3 Mvo	Grisâtre; particulière; grossier à ciment limon-argileux; sec; peu de racines; transition nette et horizontale.
112-157 cm :	4 Js a	10 YR 3/2; massif à sous structure polyédrique; argilo-limoneux; revêtements noirs sur les surfaces des agrégats; quelques lapillis; sec; peu de racines; transition diffuse.
157-210 cm :	4 Js b	10 YR 3/2; massif à sous structure polyédrique subangulaire; argilo-limoneux; revêtements noirs sur les surfaces des agrégats; nombreux lapillis inclus (50%); sec; peu de racines.

## RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une étude sur le fonctionnement hydrologique et les risques de coulées boueuses des versants du volcan Pichincha qui domine la ville de Quito (Equateur), une séquence de sols volcaniques dérivés de cendres récentes est étudiée. Les profils correspondent à des séries de sols formés sur une succession de dépôts quaternaires. L'ensemble du versant est constitué de sols jeunes en début de pédogenèse. Selon les conditions climatiques apparaissent des *Thaptics* et *Humics Vitricryands* en haut de versant et des *Vitrantic Troprothents* en bas de versant (Soil Survey Staff, 1994). Les synthèses de minéraux allophaniques sont très limitées pour le type Andisol. Les sols de bas de versant sont dépourvus de tous minéraux secondaires aussi bien d'allophanes que d'argiles. Le facteur limitant à une pleine évolution des sols semble être ici le temps : les sols actuels dérivent de matériaux trop jeunes et la succession trop rapide des éruptions a empêché l'évolution des horizons enfouis jusqu'au stade andique.

Les propriétés andiques, et en particulier les caractéristiques physiques particulières des Andosols, sont donc trop peu exprimées pour pouvoir être considérées comme responsables d'une instabilité des versants en condition de fortes pluies.

**Mots-clés :** Andisol, Cendres, Classification, Sols volcaniques, Verres, Andes, Equateur

## ABSTRACT

In the framework of a study on the hydrological functioning and muddy casting risks of slopes of the volcano Pichincha that dominates the city of Quito (Ecuador), a sequence of soils derived from recent ashes is studied. Profiles correspond to series of soils formed on a succession of quaternary deposits. The slope is made of young soils. According to climatic conditions appear *Thaptics* and *Humics Vitricryands* in the top of the landscape and *Vitrantic Troprothents* near Quito (Soil Survey Staff, 1994).

Syntheses of allophanics minerals are limited in the Andisol area and the Entisols don't have neither allophanics minerals nor phyllosilicates. The factor limiting to a complet evolution of soils seems to be here the time.

Actual soils derive from too young materials and the too rapid succession of eruptions limit the evolution of the paleosurfaces. Andics soils Properties, especially the physical characteristics of Andisols are too poorly expressed to be able to be considered as responsible for an instability of slopes in strong rain conditions.

**Key words :** Andisol, ashes, Clasification, Volcanic ash soils, Glasses, Andes, Ecuador