

**Communauté française de Belgique**

**FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE  
GEMBLoux**

Caractérisation pédogénétique et évaluation des sols en vue  
d'une gestion environnementale et d'un aménagement durable  
du terroir de Ticuantepe (Nicaragua)

**Année académique 2001-2002**

Promoteurs :

**Bock Laurent  
Lacroix Daniel**

Mémoire de fin d'études présenté par :

**Boubacar Billo BAH**

En vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Agronome  
*Orientation : Science du sol*

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Le présent document n'engage que son auteur.

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, je voudrais témoigner ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation, et qui m'ont soutenu durant mes études à Gembloux.

Je commencerai par remercier mon compagnon Benoît Otte, pour sa collaboration fraternelle durant les deux années passées ensemble en "Science du sol", mais aussi pendant la réalisation de nos travaux de fin d'études, tant au Nicaragua qu'à Gembloux.

Je remercie très chaleureusement mes professeurs et promoteurs Messieurs Laurent Bock et Daniel Lacroix, pour, tout d'abord, nous avoir permis de vivre cette expérience si enrichissante, dans ce beau pays qu'est le Nicaragua, mais aussi pour leurs nombreux conseils et suggestions durant la réalisation de ce travail, tant dans la stratégie à suivre que pendant sa rédaction.

Mes remerciements infinis vont à Monsieur Gilles Colinet, Ingénieur agronome en Science du sol et assistant à l'Unité de Géopédologie, pour son aide précieuse et illimitée, ses avis et remarques pertinents, et ce toujours dans la bonne humeur, tant pendant les analyses de laboratoire qu'au cours de la rédaction de ce mémoire.

Il est important pour moi de remercier Monsieur Christian Prat, pédologue à l'IRD et docteur de l'université de Paris VI, pour les multiples documents mis à notre disposition, mais aussi pour ses nombreux conseils précieux et corrections durant la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur Pedro Paredes, professeur honoraire de l'Université d'Iquitos (Pérou) de s'être si bien occupé de nous lors de notre séjour au Nicaragua et de nous avoir fait partager ses connaissances.

Je remercie nos prédécesseurs Delphine Coulon et Eric Capoen pour les conseils qu'ils n'ont cessé de nous prodiguer, mais aussi pour la panoplie de documents qu'ils nous ont passés.

Je tiens à remercier particulièrement Madame Françoise Toussaint et Mademoiselle Béatrice Lagrange, pour leurs aides techniques judicieuses au laboratoire, ainsi que Monsieur Joseph Servais pour sa disponibilité permanente et son aide en matière de manipulation technique des outils informatiques.

Je remercie également Messieurs Jean Laroche, pour ses avis et remarques pertinents, Roland Sine, pour sa patience lors de mes nombreuses recherches documentaires, ainsi que Charles Bracke, Philippe Véron, Marie Etienne, Romain Crahay ainsi que tout le personnel restant de l'Unité de Géopédologie, pour leur collaboration et leur bonne humeur durant ces plusieurs mois de « croisement » dans les couloirs du service.

Au Nicaragua, j'adresse mes remerciements à Monsieur Laurent Levard, ex-directeur du département des Sciences agraires de la UCA et à Madame Célia Gutierrez, professeur de pédologie à la UCA, pour leur accueil et pour nous avoir permis de mener à bien nos travaux au Nicaragua. Mais aussi à Manuel Serrano et Rodolpho Gutierrez, étudiants en dernière

année à la UCA, pour avoir franchement et chaleureusement collaboré avec nous, durant la réalisation conjointe de nos travaux de terrain.

Mes sincères remerciements vont également à la famille Mendoza Rojas, et plus particulièrement à Gioconda, pour nous avoir hébergés et accueillis si chaleureusement, ainsi qu'à Eric et Mélanie, qui ont grandement contribué à notre rapide adaptation au "train-train" de vie nicaraguayen.

Je n'oublierai pas Anne Guittet et Hélène Noisette, rencontrées au Nicaragua, et avec lesquelles les échanges d'informations ont été très fructueux.

Je remercie du fond du cœur mes chers parents, qui n'ont cessé de me soutenir, tant moralement que matériellement, mes frères et sœurs, ainsi que toute ma famille proche ou éloignée, pour leurs encouragements et soutiens permanents depuis que je suis loin d'eux.

Enfin, je remercie Fatou du fond du cœur, pour son soutien permanent depuis que nous nous sommes rencontrés à Gembloux.

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude du terroir de Ticuantepe, situé au sud-est de Managua, dans la région Pacifique du Nicaragua. Il a été question de le caractériser d'un point de vue pédogénétique et agropédologique, et de dégager les potentialités de ses sols, en vue d'une gestion environnementale et d'un aménagement durable.

Dans une première étape, divers documents concernant le contexte environnemental ont été récoltés, exploités et confrontés. Ce qui a abouti à la délimitation d'une zone d'étude représentative du terroir, et à l'identification au sein de celle-ci de trois secteurs, correspondant à quatre unités géomorphopédologiques.

Le terrain a été abordé via quatre toposéquences, parcourues depuis le volcan Masaya (à l'est) jusqu'aux contreforts des sierras (à l'ouest), pour la réalisation de sondages à la tarière pédologique. Sur base des observations réalisées, six profils (fosses) pédologiques ont été creusés, décrits, et échantillonnés pour les analyses au laboratoire.

De cette étude, il ressort que les sols de Ticuantepe sont jeunes et développés sur cendres volcaniques et scories. Ils sont riches en verres mais ont des propriétés allophaniques peu marquées. Le secteur montrant les meilleures potentialités agropédologiques est le Nord. A l'opposé, celui présentant les plus faibles est le Sud. Quant au secteur centre, il se rattache à la fois au Sud et au Nord, respectivement dans ses parties est et ouest. Ce gradient de potentialité sud-nord et est-ouest, suit l'aplanissement du relief et l'éloignement par rapport au volcan Masaya.

**Mots clefs:** Nicaragua – Ticuantepe - sols volcaniques – Andosols – toposéquences – secteurs – unités géomorphopédologiques – sondages – profils – pédogenèse - potentialités.

## Abstract

This study has been carried out in Ticuantepe, south est of Managua, Pacific region of Nicaragua. The pedogenetical and agropedological factors of soil agricultural potentialities have been studied within a sustainable development perspective.

In a preliminary stage, the analysis of existing map informations have lead to the delimitation of a representative study zone and to the identification of three sectors and four geomorphopedological units within this zone.

Four toposequences, in east-west directions, from Masaya Volcano to the Sierras spurs, were studied on the ground. This survey consisted in soil observations (augerings and pit profiles) as well as land use and crop types identification. Soil samples were collected for laboratory analysis.

A conclusion of this study is the relatively young character of the soils, which developed from volcanic ashes or scoria. They are rich in glass but present few evidences of allophonic properties.

The soils from north sector show the highest agricultural properties. To the opposite, the south sector appears to be the least suitable for agricultural management. The Central sector is a transitional area between South and North.

A fertility gradient was identified as a result of the landscape shape and the distance from the Masaya Volcano.

**Key Words:** Nicaragua – Ticuantepe - volcanic soils – Andosols – toposequences – sectors – geomorphopedological units – augerings - profiles – soil genesis - potentialities.

## Resumen

En la región del Pacífico de Nicaragua; al sud de Managua, se ha iniciado estudios, correspondientes al territorio de Ticuantepe ; caracterizando el territorio desde el punto de vista pedogenético, para llegar a mostrar las potencialidades agropedológicas, dentro un objetivo de la gestión del medio ambiente y de ordenamiento estable.

Antes de iniciar el trabajo de campo, muchos documentos referidos al contexto del medio ambiente de la zona de estudio han sido recopilados, comparados y analizados. Es así que nos ha llevado a la delimitación de una zona de estudio representativa del territorio del sud de Managua, y a la identificación en esta zona de tres sectores principales, correspondientes a cuatro unidades geomorfológicas. Estos tres sectores son : 1) el sector sud, con un relieve muy escarpado, reagrupando las unidades 1 y 2 ;2) el sector central, menos escarpado y más ondulado, correspondiendo a las unidades 3 ; y 3) el sector norte, plano y que corresponde a la unidad 4.

El terreno ha sido seguidamente abordado en cuatro secuencias, recortando la zona de estudio dentro la dirección este-oeste, después del volcán Masaya hasta los contrafuertes de las sierras. Se han realizado sondajes pedológicos a lo largo de las cuatro secuencias. En base a las observaciones durante la campaña de sondajes ; seis perfiles pedológicos han sido abiertos, descritos de manera exhaustiva, y muestreados para ser analizados en laboratorio. La integración de fases de campo y de laboratorio a permitido caracterizar los suelos y evaluar sus potencialidades agropedológicas.

La investigación, nos mostró que los suelos de Ticuantepe son juvenes y desarrollados sobre cenizas volcánicas y escorias. Son ricos en cristales y muestran propiedades alofánicas poco marcadas. El sector que presenta las mejores potencialidades agropedológicas se encuentra al norte. De manera contraria, al sector sud que presenta las condiciones de potencialidad agropedológica más pobres. En cuanto al sector central, se encuentra entre las dos, la parte este muestra las potencialidades similares a las del sector sud, mientras que la parte oeste está ligada al sector norte. Este gradiente de potencialidades sud-nord y este-oeste, es seguido por el aplanamiento del relieve y el alejamiento con respecto al volcán Masaya.

**Palabras calve :** Nicaragua – Ticuantepe – suelos volcánicos – andosoles – toposecuencias – sectores – unidades geomorfo-pedológicas – sondajes – perfiles – pedogénesis - potencialidades.

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION : OBJECTIFS ET METHODOLOGIE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1. LE CADRE DE L'ETUDE .....</b>	<b>3</b>
1.1. LE NICARAGUA .....	3
1.1.1. Généralités .....	3
1.1.2. Géomorphologie et climat .....	4
1.2. LA REGION PACIFIQUE DU NICARAGUA.....	5
1.2.1. Climat.....	5
1.2.2. Géologie.....	5
1.2.3. Hydrologie .....	7
1.2.4. Pédologie .....	7
1.3. LE TERROIR ETUDIE : LE MUNICIPE DE TICUANTEPE .....	12
1.3.1. Présentation générale du municpe de Ticuantepe.....	12
1.3.2. Délimitation et présentation de la zone d'étude.....	12
1.3.3. Quelques aspects socio-économiques .....	13
<b>CHAPITRE 2. LES ANDOSOLS .....</b>	<b>15</b>
2.1. INTRODUCTION .....	15
2.2. FACTEURS DE FORMATION .....	15
2.2.1. Matériau originel .....	15
2.2.2. Climat et pédoclimat .....	16
2.2.3. Age du matériau originel et évolution.....	16
2.3. PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES .....	17
2.3.1. Les propriétés physiques .....	17
2.3.2. Les propriétés chimiques.....	17
2.4. CLASSIFICATION DES ANDOSOLS .....	19
2.4.1. La classification américaine du soil taxonomy .....	19
2.4.2. Les classifications FAO et WRB.....	20
2.4.3. Les classifications françaises .....	22
<b>CHAPITRE 3. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET IDENTIFICATION GEOMORPHOPEDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>23</b>
3.1. CLIMAT .....	23
3.2. GEOLOGIE .....	24
3.3. IDENTIFICATION GEOMORPHOPEDOLOGIQUE.....	25
3.3.1. Unité 1 (zone escarpée et déboisée).....	25
3.3.2. Unité 2 (zone escarpée et partiellement boisée).....	25
3.3.3. Unité 3 (zone peu escarpée à interfluves plats et larges).....	26
3.3.4. Unité 4 (zone plane semi-urbanisée).....	26
3.4. PRESENTATION DES SOLS .....	27
<b>CHAPITRE 4. ANALYSE DU TERRAIN .....</b>	<b>31</b>
4.1. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE DE TERRAIN.....	31
4.2. PRESENTATION DES TOPOSEQUENCES ET SONDAGES .....	31
4.2.1. Toposéquence 1 : El Panama – Los Rios.....	33
4.2.2. Toposéquence 2 : San Pedro – San Felipe.....	35
4.2.3. Toposéquence 3 : Santa Emilia – El Eden .....	37
4.2.4. Toposéquence 4 : San Pedro – Buenos Aires.....	39
4.3. CONCLUSION .....	41
<b>CHAPITRE 5. CARACTERISATION DES PROFILS .....</b>	<b>43</b>
5.1. INTRODUCTION .....	43
5.2. PRESENTATION DES ANALYSES DE LABORATOIRE .....	43
5.2.1. Les analyses physiques.....	44
5.2.2. Les analyses physico-chimiques et chimiques.....	46

5.3. CARACTERISATION ET INTERPRETATION DES PROFILS .....	52
5.3.1. Profil 1 .....	52
5.3.2. Profil 5 .....	53
5.3.3. Profil 3 .....	55
5.3.4. Profil 6 .....	56
5.3.5. Profil 2 .....	57
5.3.6. Profil 4 .....	58
5.4. CLASSIFICATION DES SOLS .....	60
5.4.1. Identification des horizons de diagnostic .....	60
5.4.2. Classification selon la Soil Taxonomy de 1998 et la WRB de 1998 .....	61
<b>CHAPITRE 6. SYNTHESE .....</b>	<b>63</b>
6.1. SYNTHESE PEDO-PAYSAGERE .....	63
6.1.1. Les paramètres physiques .....	63
6.1.2. Les paramètres physico-chimiques et chimiques.....	64
6.2. SYNTHESE DES POTENTIALITES AGROPEDOLOGIQUES PAR SECTEUR .....	68
6.2.1. Secteur sud (unités 1 et 2) .....	68
6.2.2. Secteur centre (unité 3) .....	69
6.2.3. Secteur nord (unité 4).....	69
6.2.4. Conclusion sur les potentialités et l'état de fertilité .....	70
6.2.5. Tableau de synthèse .....	71
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>73</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>75</b>
 <b>ANNEXES</b>	



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Le Nicaragua au sein de l'Amérique centrale (carte extraite de l'Atlas escolar de Nicaragua, INETER, 1995).	2v
<b>Figure 2</b> : Carte orographique du Nicaragua et limite de partage des eaux Pacifique/Caraïbes (d'après INETER, 1995).	3v
<b>Figure 3</b> : Coupe schématique ouest-est du Nicaragua, reprenant le relief, la pluviométrie et la direction des vents dominants (d'après Colmet-Daage et al.1970a).	4
<b>Figure 4</b> : Carte des plaques tectoniques du continent américain (Bibliothèque pour la science, 1980).	4v
<b>Figure 5</b> : Extrait de la carte géologique du Nicaragua (partie ouest et centre-ouest) (d'après Fenzl, 1988).	5v
<b>Figure 6</b> : Carte des sols à talpetate recensés au Nicaragua (zones hachurées). D'après El Catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua (1971).	10v
<b>Figure 7</b> : Carte topographique au 1/50 000 des départements de Managua, Masaya, Granada y Carazo (d'après INETER, 1987).	11v
<b>Figure 8</b> : Zone d'étude : urbanisation et voies de communication.	12 v
<b>Figure 9</b> : Précipitation et température moyennes mensuelles et annuelles de la station métrologique de Masaya (INETER).	22v
<b>Figure 10</b> : Distribution bimodale des précipitations au cours de la saison des pluies, d'après les données météorologiques de la station météorologique de Ticuantepe.	22v
<b>Figure 11</b> : Photographie aérienne couvrant la zone d'étude.	24v
<b>Figure 12</b> : Carte des sols de la zone d'étude (d'après El catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua.	26v
<b>Figure 13</b> : Carte des unités, transects, sondages et profils.	30v
<b>Figure 14</b> : Coupe géomorphopédologique El Panama-los Rios.	32v
<b>Figure 15</b> : Coupe géomorphopédologique San Pedro-San Felipe.	34v
<b>Figure 16</b> : Coupe géomorphopédologique Santa Emilia-El Eden.	36v
<b>Figure 17</b> : Coupe géomorphopédologique San Pedro-Buenos Aires.	38v

v = verso.

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Présentation des formations stratigraphiques, de leurs principales roches et des provinces physiographiques auxquelles elles appartiennent (d'après Rouanet, 1965 ; Marin Castillo, 1990).	6
<b>Tableau 2</b> : Présentation des sondages réalisés.	32
<b>Tableau 3</b> : Présentation des paramètres physiques et chimiques déterminés au laboratoire.	42v
<b>Tableau 4</b> : Echelle montrant la richesse en allophanes.	50
<b>Tableau 5</b> : Présentations des profils réalisés.	51v
<b>Tableau 6</b> : Horizons de diagnostic identifiés et groupe taxonomique des six profils étudiés.	59v
<b>Tableau 7</b> : Synthèse des potentialités agropédologiques par secteur et unité.	

72

v = verso.

## LISTE DES PLANCHES

**Planche 1** : Caractérisation du profil 1.

**Planche 2** : Caractérisation du profil 5.

**Planche 3** : Caractérisation du profil 3.

**Planche 4** : Caractérisation du profil 6.

**Planche 5** : Caractérisation du profil 2.

**Planche 6** : Caractérisation du profil 4.

## **INTRODUCTION : OBJECTIFS ET METHODOLOGIE**

---

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet initié par la CUD (Coopération Universitaire pour le Développement) et réalisé en association entre la FUSAGX (Faculté Universitaires des Sciences Agronomiques de Gembloux) et la UCA (Universidad Centroamericana – Managua, Nicaragua).

Le projet vise d'une part un transfert de méthodologie dans le domaine des sols depuis la FUSAGX vers la UCA et d'autre part l'établissement de sites de référence pour une gestion durable des sols. Il a notamment été mis en place à la UCA un laboratoire d'analyses classiques (de routine) de sols, et déjà deux étudiants belges (Delphine Coulon et Eric Capoen, 2001) ont participé à ce projet dans le cadre de leur mémoire de fin d'étude. C'est dans cette continuité que nous nous sommes rendus, Benoît Otte et moi-même, en juillet et août 2001, au Nicaragua, pour participer à ce projet, dans le cadre de nos mémoires de fin d'études. Toujours dans l'optique d'un transfert de méthodologie, les prospections de terrain ont été menées avec deux étudiants nicaraguayens (Manuel Serrano et Rodolpho Gutierrez) dans le cadre de leurs mémoires également.

Contrairement à nos prédécesseurs, qui ont réalisé une reconnaissance selon un transect d'environ 40 km de long, allant de Jinotepe à Tisma (dans la dépression nicaraguayenne), il a été question pour nous de plus porter l'attention sur un terroir, en l'occurrence Ticuantepe (au sud de Managua), d'en caractériser les sols, évaluer leur fertilité à la parcelle, et jeter les bases d'un système d'information géographique sur les sols, en vue d'une gestion agricole et environnementale durable.

Le travail a été scindé en deux thématiques. Mon collègue Benoît Otte s'est plus axé sur l'évaluation de la fertilité à la parcelle, tandis que nous, notre travail s'est orienté vers une caractérisation plus pédogénétique des sols. Il est complété par une évaluation des potentialités agropédologiques.

Nous insistons sur le fait que nos deux mémoires sont indissociables dans le sens où la pédogenèse est un élément intervenant dans l'explication de la fertilité.

Pour atteindre nos objectifs, la démarche employée a été la suivante.

Il a d'abord été question de récolter et d'exploiter les documents existants (cartes, photographies aériennes, monographies, ...) sur le contexte environnemental pour resituer les sols dans leur cadre physique et humain. Ce qui a abouti à la définition d'unités géomorphopédologiques, mettant en relation le relief, les sols et leur occupation.

Ensuite, l'intégration de deux approches, une de terrain et une de laboratoire, a permis de caractériser les unités définies et d'en dégager les potentialités.

Ce document sera structuré de la manière suivante.

Dans un premier chapitre, nous présenterons le cadre de l'étude. Pour ce faire, différents niveaux de perception ont été choisis : le Nicaragua, la région Pacifique et le terroir étudié (Ticuantepe).

Le second chapitre concernera la présentation générale des principales propriétés des Andosols.

Ensuite, dans le troisième, nous présenterons le contexte environnemental du terroir étudié et procéderons à son identification géomorphopédologique, par la confrontation et l'exploitation des documents existants.

Les chapitres 4 et 5 intègrent les phases de terrain et de laboratoire pour aboutir à une caractérisation des différents profils de sol étudiés et à leur classification.

Dans le chapitre 6, nous procéderons, d'une part à une synthèse pédo-paysagère sous l'angle des paramètres étudiés au laboratoire, en les confrontant, s'il y a lieu, aux observations de terrain, et d'autre part à l'évaluation des potentialités agropédologiques du terroir.

Enfin, la conclusion reprendra l'ensemble des enseignements de ce travail ainsi que quelques perspectives.

## CHAPITRE 1

### LE CADRE DE L'ETUDE

---

#### 1.1. Le Nicaragua

(D'après Anonyme, 2002 ; Colmet-Daage et al, 1970a ; Fenzl, 1988)

##### 1.1.1. Généralités

Le Nicaragua, dont la superficie est de 130 000 km<sup>2</sup> est le plus grand pays d'Amérique Centrale. Il est situé sous le tropique du cancer, entre les 11<sup>ème</sup> et 15<sup>ème</sup> parallèles nord et les 83<sup>ème</sup> et 88<sup>ème</sup> méridiens ouest. Il est limité au Nord par le Honduras, au Sud par le Costa Rica, à l'Est par la mer des Caraïbes (l'océan Atlantique) et à l'Ouest par le Pacifique (figure 1, ci-contre). Le Nicaragua fait partie d'une région où la tectonique particulièrement intense, provoque une activité volcanique permanente, et où les limites entre les grandes formations et groupes d'espèces, qu'elles soient végétales ou animales, s'interpénètrent conduisant ainsi à la formation d'un milieu extrêmement riche et varié.

La population actuelle est estimée à environ 4,8 millions d'habitants. La majeure partie de celle-ci se concentre sur la côte Pacifique, autour des principales villes que sont Managua (la capitale, avec 27% de la population), Granada, Masaya, Chinandega et Leon. La population nicaraguayenne est très jeune. Plus de la moitié a moins de 15 ans. Le secteur primaire (agricole) occupe 34% de la population active, le secteur secondaire 16% et le tertiaire 48%.

Avec son PIB estimé à 491 \$ par habitant par an, le Nicaragua est le pays le plus pauvre d'Amérique Centrale. Les inégalités sociales y sont très marquées : en 1994, 74% de la population active percevait 34% du revenu national. Tandis qu'une petite partie de la population s'est enrichie à la suite du processus de privatisation et d'ouverture aux investissements étrangers (lors de la période néo-libérale des années 1990 qui a succédé à la période sandiniste) ; la très grande majorité (82%) vit en dessous du seuil de pauvreté et 46% en situation d'extrême pauvreté.

Pays aux multiples volcans, le Nicaragua voit ses ressources naturelles fragilisées du fait des nombreuses catastrophes naturelles (tremblements de terre, ouragans et éruptions volcaniques) qui l'ont touché ces dernières années. Notamment, en octobre 1998, le pays a été dévasté par l'ouragan Mitch. Les dégâts ont été très importants et ont accru la misère des zones les plus défavorisées. Des rivières se sont élargies de 10 fois leur taille, emportant maisons, ponts, animaux, parcelles entières...

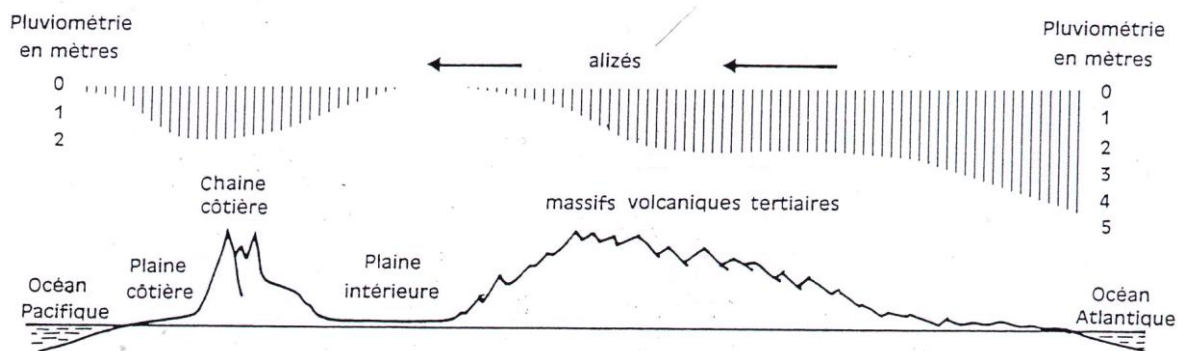
### 1.1.2. Géomorphologie et climat

Le Nicaragua comprend trois régions naturelles (figure 2, ci-contre, et 3, ci-dessous) qui sont :

- La *région Pacifique* qui comprend une plaine côtière, une chaîne volcanique quaternaire active (cordillère Pacifique ou chaîne des Maribios) s'élevant en général entre 500 et 1000 m d'altitude et la dépression nicaraguayenne (ou plaine intérieure), à moins de 30 m d'altitude à certains endroits, comprenant les deux grands lacs du pays que sont les lacs de Managua (encore appelé Xolotlan) et de Nicaragua (ou Colcibloca). Ce dernier est le plus grand d'Amérique centrale (8157 km<sup>2</sup>) et le deuxième lac d'eau douce au monde. Le climat est de type tropical sec (ou de savane) sur la plaine côtière et la chaîne volcanique (subhumide plus en altitude), et subtropical sec dans la plaine intérieure.

- Les *Montagnes du Centre-Nord*, constituées en majorité de massifs volcaniques d'âge tertiaire (Parsons Corporation, 1971). L'altitude y est supérieure à 200 m. On y trouve le point culminant du Nicaragua, le Pico Mogoton (2103 mètres) (Anonyme, 2002). Ces montagnes sont moins peuplées que les basses terres du Pacifique. Le climat y est de type subtropical humide. Il y fait plus frais.

- Les *Basses terres des Caraïbes* (à l'est), aussi appelées côte des Mosquitos, où l'altitude est inférieure à 200 m. Cette région est surtout couverte de forêts tropicales et de savanes de pin. Elles s'étendent sur près de la moitié de la superficie totale du Nicaragua et forment la plus large plaine côtière d'Amérique centrale. Le climat y est de type tropical humide. Il y fait un peu moins chaud que dans la plaine Pacifique. C'est la région du pays où il pleut le plus.



**Figure 3 :** Coupe schématique ouest-est du Nicaragua, reprenant le relief, la pluviométrie et la direction des vents dominants (d'après Colmet-Daage et al, 1970a).

## 1.2. La région Pacifique du Nicaragua

### 1.2.1. Climat

(D'après Colmet-Daage et al, 1970a ; Fenzl, 1988 ; IRENA, 1983 ; MIDINRA, 1989)

Dans la région Pacifique du Nicaragua, on retrouve deux types de climats, à savoir:

- tropical sec (ou de savane) sur la plaine côtière et sur la cordillère quaternaire pacifique (avec un microclimat subhumide plus en altitude), où les températures sont comprises entre 19 et 31°C (avec en altitude des valeurs comprises entre 19 et 25°C) et des précipitations entre 700 et 2000 mm ;
- subtropical sec dans la plaine intérieure et aux abords et contreforts des massifs tertiaires. Cette zone est très sèche voire même aride, est quasi désertique par endroits.

### 1.2.2. Géologie

La géologie du Nicaragua, et en particulier de la région Pacifique, est étroitement liée à la tectonique des plaques. Ce qui nous incite dans cette sous-section à envisager ce thème avant d'aborder réellement les grands traits de la géologie de l'ouest du Nicaragua.

#### 1.2.2.1. Tectonique de l'Amérique Centrale

(D'après Fenzl, 1988 ; Parsons Corporation, 1972 ; Mac Birney, 1956, Williams H., 1964 et 1965, Weyl, 1980 cités par Prat, 1991)

Au Tertiaire, de la rencontre entre la plaque océanique des Cocos à l'ouest et de la plaque continentale des Caraïbes à l'est, résulte une intense activité volcanique, qui crée l'Amérique Centrale et affecte l'ossature centrale du Nicaragua du nord au sud. Les roches volcaniques des montagnes centrales (pyroclastites, ignimbrites, laves, ...) sont les témoins de ce volcanisme du Tertiaire. Par effet de subduction, la plaque océanique des Cocos qui est la plus lourde, s'enfonce sous la plaque des Caraïbes (figure, 4 ci-contre).

A la charnière entre le Tertiaire et le Quaternaire, les tensions tectoniques consécutives à la subduction provoquent la formation de la dépression ou graben nicaraguayen. Ce sont deux systèmes de failles parallèles à la côte qui sont à l'origine de l'effondrement. Ces fractures ont pour effet de relancer l'activité volcanique, sur le flanc ouest du graben, donnant naissance à la cordillère Pacifique quaternaire. Les volcans qui la composent, y compris le volcan Masaya se trouvant à l'est de la zone d'étude, rejettent des laves andésitiques et basaltiques, des pyroclastites et des tufs, durant le Quaternaire ancien et récent. Cette activité qui se poursuit encore de nos jours, est à l'origine du dépôt de roches pyroclastiques d'âge Plio-Pléistocène (groupe *Las Sierras*) et d'âge plus récent (Holocène). Les sols de notre zone d'étude se sont formés sur les pyroclastites récentes.

### 1.2.2.2. Formations géologiques

(D'après Bice, 1985, Williams S.N., 1983, Zoppis Bracci et Del Guidice, 1958 cités par Prat, 1991 ; Marin Castillo, 1990 ; Parsons Corporation, 1971 et 1972 ; Rouanet, 1965)

On retrouve 6 formations stratigraphiques (tableau 1) à l'ouest du Nicaragua. De la plus récente à la plus ancienne, ce sont : les dépôts sédimentaires récents, les dépôts pyroclastiques récents, le groupe *Las Sierras*, le groupe *El Salto*, *Masachapa* et *El Fraile*, la formation *Brito* et la formation *Rivas*.

La figure 5 (ci-contre) donne les principales roches rencontrées à l'ouest et au centre-ouest du Nicaragua. Le tableau 1 résume les grands traits de la géologie de l'ouest du Nicaragua.

**Tableau 1** : Présentation des formations stratigraphiques, de leurs principales roches et des provinces physiographiques auxquelles elles appartiennent (d'après Rouanet, 1965, et Marin Castillo, 1990).

Période	Formation stratigraphique	Lithologie	Provinces Physiographiques
Holocène	Dépôts sédimentaires récents	Sédiments marins (argilo-sableux), alluviaux (alluvions) et lacustres	- Plaines de Tipitapa - Plaines de Rivas
Holo-Pléistocène	Dépôts pyroclastiques récents	Cendres volcaniques fines, lapilli, ponces, tufs	- Chaîne Maribios - Plaines de Tipitapa - Plaines de Rivas - Cuestas de Diriamba
Plio-Pléistocène	Groupe Las Sierras	Lapilli basaltiques, tufs, ponces, cendres	- Cuestas de Diriamba - Crêtes du Pacifique
Plio-Oligocène	Groupe El Salto, Masachapa et El Fraile	Argile schisteuse, grès quartzeux, calcaires coquilliers, grauwackes, tufs fins gréseux et schisteux, brèches volcaniques	- Crêtes du Pacifique
Eocène	Formation <i>Brito</i>	Argile schisteuse, grès calcaires, marnes, tufs et brèches fossilifères	- Crêtes de Brito
Crétacé supérieur	Formation <i>Rivas</i>	Argile schisteuse, grès calcaires, marnes, tufs et brèches fossilifères	- Crêtes de Brito



### 1.2.3. Hydrologie

(D'après Fenzl, 1988 ; Marin Castillo, 1990)

Le Nicaragua est divisé en deux grandes régions hydrographiques, constituant les deux grands bassins versants du pays: le bassin versant Pacifique et le bassin versant Atlantique (cf figure 2 montrant la limite de partage des eaux Pacifiques/Caraïbes).

Le bassin versant Pacifique draine environ 9 % du territoire national. Ses cours d'eau ne fonctionnent réellement que pendant la saison des pluies, et généralement le temps de l'averse seulement. Par contre, ceux de l'Atlantique ont des débits plus importants et constants ; certains sont même navigables.

### 1.2.4. Pédologie

(D'après Capoen, 2001 ; Carte des sols du Ministère des Affaires publiques du Nicaragua, sans date ; FAO-UNESCO, 1975b ; Prat, 1991 ; Soil Survey Staff, 1975 et 1994)

La légende de la carte (reprise en annexe1) du Ministère des affaires publiques du Nicaragua, dont nous disposons, se base sur la version initiale du Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). Le changement majeur par rapport à la version de 1994, nous concernant, est l'ajout de l'ordre des Andisols, alors que dans la première version, les Andosols sont considérés comme un sous-ordre de l'ordre des inceptisols. Pour être le plus fidèle possible aux documents existants, les sols seront présentés par rapport au Soil Taxonomy de 1975.

#### 1.2.4.1. Les entisols

Ce sont des sols (suffixe « ent ») peu évolués, sans horizon de diagnostic. Leur développement de profil est faible à nul.

Ceux de l'ouest du Nicaragua sont des sols très jeunes sur pyroclastites ou laves, peu épais. Ils correspondent à la Caldeira du volcan Masaya ainsi qu'à ses alentours. Certains de ces sols sont pratiquement restés à l'état de champs de lave. Ils font partie du groupe des ustorthents typiques, qui caractérise les entisols qui ne sont pas en contact avec une roche dure dans les cinquante premiers centimètres de profondeur. S'il y a présence d'une roche dure dans ces 50 centimètres, on parle d'ustorthents lithiques.

#### 1.2.4.2. Les inceptisols

Ces sols (suffixe « ept ») montrent une évolution incipiente (naissante). Ils possèdent généralement un horizon cambique (horizon B, marqué par une altération incomplète des minéraux primaires), communément appelé B "structural" ou de couleur, B d'altération ou Bw, et un éventuel duripan (horizon cimenté par de la silice) en profondeur.

Tous les inceptisols de la région Pacifique du Nicaragua sont des Andosols (sols développés sur matériaux volcaniques) ou andepts (sous-ordre de l'ordre des inceptisols). Le sous-ordre des andepts est lui même divisé en 3 grands groupes (durandepts, eutrandepts, et vitrandepts). Remarquons que dans la classification FAO, les Andosols constituent un des 26

groupes de sols définis par celle-ci (le "groupe" dans la classification FAO est au même niveau taxonomique que l'"ordre" de la Soil Taxonomy). Cependant, rappelons que dans le Soil Taxonomy de 1994, les Andosols ont été haussés au niveau de l'ordre. A présent, on parle de l'ordre des Andisols.

A l'ouest du Nicaragua, on retrouve :

- les vitrandepts molliques : ce sont des Andosols peu évolués dont les caractères vitreux restent dominants. Ils ne possèdent pas d'horizon B cambique (développement de profil de type AC) mais ont un épipédon mollique (notion définie plus loin, au niveau des mollisols). Leur taux de saturation en bases peut être élevé si les précipitations ne sont pas assez importantes ou si les pyroclastites (cendres, ponces,...) à partir desquelles ils se sont formés sont basiques.

On les localise à l'ouest et au nord de la caldeira du volcan Masaya.

- les durandepts typiques : Ils peuvent avoir un horizon B cambique en-dessous d'un épipédon ayant au moins la couleur (foncée) de l'épipédon mollique (sans être nécessairement mollique au sens strict). Leur taux de saturation en bases est normal à élevé. De plus, ils présentent un horizon induré de couleur beige débutant à moins d'un mètre de la surface et d'une épaisseur allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de décimètres. Au Nicaragua, ces horizons portent le nom de « talpetate » (voir encadré, plus loin).

Les durandepts typiques occupent la majeure partie de la Meseta de Carazo, incluant les villes de San Marcos, Jinotepe et Masatepe.

- les eutrandepts typiques : comme les précédents, ils sont plus évolués que les vitrandepts, dans la mesure où ils possèdent le plus souvent un horizon cambique en-dessous de l'épipédon foncé (qui n'est pas forcément mollique). Ce sont des sols profonds et assez riches en bases. Ils figurent parmi les meilleurs Andosols pour l'agriculture.

Leur extension se limite à Masaya et au nord de cette ville, ainsi que plus au sud-ouest, près de la Concepcion.

Les Andosols se développent sous haute pluviosité, où le régime d'humidité du sol est udique (eau retenue dans le sol à une tension inférieure à 1,5 Mpa pendant plus de 90 jours consécutifs chaque année) et le régime de température est isothermique (15-22°C) à isohyperthermique (22-27°C) (Malagon et *al.*, 1991 cités par Henao-Toro, 2002).

#### **1.2.4.3. Les alfisols**

Les alfisols (suffixe « alf ») sont des sols riches en bases et assez fertiles. Rares sur la côte Pacifique, ils sont très présents à l'intérieur et sur la côte Atlantique du Nicaragua. Sur la côte Pacifique, seuls les haplustalfs typiques sont représentés.

#### **1.2.4.4. Les mollisols**

Les mollisols (suffixe « oll ») sont des sols sombres, isohumiques, riches en bases. Pour parler de mollisols, plusieurs critères doivent être vérifiés simultanément :

- taux de saturation en bases supérieur à 50 % pour tous les horizons sous-jacents à l'horizon de surface ;
- présence d'un épipédon mollique (foncé, épais, peu acide, structure aérée) ;

- si ce sont des matériaux amorphes qui dominent le complexe d'échange, il faut la présence d'au moins un horizon (en dehors de l'horizon de surface), à une profondeur inférieure à 35 cm, qui présente une densité apparente sèche supérieure ou égale à  $0,85 \text{ g/cm}^3$  et moins de 60% en poids de matériaux amorphes vitreux dans les fractions non colloïdales (limons + sables).

Ce dernier critère est lié soit à une influence volcanique qui a été moins forte, soit à une évolution qui a été plus longue et permet d'inclure dans les mollisols des sols à caractères volcaniques ne remplissant pas les critères pour être classés dans les Andosols (sols ayant dépassé le stade d'Andosol).

Les sous-ordres les plus rencontrés dans la région sont les durustolls (les plus fréquents), les haplaquolls et les haplustolls. Les durustolls recouvrent une bonne partie du versant sud de la Meseta de Carazo, de même qu'une grande étendue à l'est et au nord-est de Masaya (Marin Castillo, 1990).

#### ***1.2.4.5. Les vertisols***

Les vertisols (suffixe « ert ») sortent de la logique d'évolution entisols puis inceptisols ensuite alfisols et mollisols. Ce sont des sols de couleur noire, riches en argiles 2/1 smectitiques (argiles gonflantes). Selon Prat (1991), les vertisols de l'ouest du Nicaragua sont composés principalement d'argile smectitique. On les rencontre dans les dépressions (dépression nicaraguayenne), dans les plaines (où l'écoulement superficiel est lent), mais aussi sur des pentes allant jusqu'à 15 % (Prat, 1991).

Seul le sous-ordre des usterts, et les deux grands groupes chromustert et pellustert qui le composent, sont rencontrés. Les chromustert sont rencontrés sur les buttes tandis que les pellusterts eux se trouvent dans les dépressions. Au nord du lac de Tisma (dans la dépression nicaraguayenne) on rencontre également des vertisols à caractères haliques (exprimant des traits de salinité). Les dernières versions de la classification américaine prévoient le nom de salusterts pour ces types de vertisols.

***Cas du Talpetate : horizon induré, rencontré dans le premier mètre de profondeur de certains sols, au Nicaragua.***

(D'après Prat, 1991)

C'est un horizon induré qui joue un rôle important dans l'érosion des sols au Nicaragua. On le rencontre depuis les bords du lac de Managua jusqu'à la côte Pacifique. Au Mexique, cet horizon porte le nom de *tepetate* qui est d'ailleurs l'origine linguistique du mot « *talpetate* ». Les termes « *tepetate-talpetate* » proviennent des mots Nahuatl (langue Aztèque) « *tetl* », qui veut dire «  *pierre* », et « *petatl* » qui signifie « *lit* », et pourrait se traduire littéralement par « *lit de pierres* ».

L'étymologie du mot *talpetate* ne renseigne donc pas sur son origine, ni sur ses autres caractéristiques. Cette définition, très large, a conduit à une grande confusion puisque des horizons aussi différents que peuvent l'être un encroûtement calcaire et un tuf volcanique, sont considérés par les nicaraguayens, comme étant des talpetates.

Le talpetate a été reconnu par les services de cartographie nicaraguayens (de 1967 à 1971) comme un duripan (terme issu du Soil Taxonomy). On retrouve le talpetate dans l'ordre des Inceptisols (au sein des sous-groupes entic et typic Durandepts, et mollic Vitrandepts, qui appartient au sous-ordre des Andepts) et dans l'ordre des Mollisols (dans les sous-groupes typic Durustolls, duric Argiustolls et duric Haplustolls, typic Durustolls, Argiustolls et Haplustolls, et vertic Haplustolls).

Le talpetate a été défini par les services de cartographie nicaraguayens comme un horizon induré, constitué d'un matériau volcanique éjecté, à forte teneur en cendres fines et moyennes, et en scories de ponce. En général, l'horizon est cimenté par de la silice (généralement sous forme d'opale ou micro-cristalline), dont les morceaux exposés à l'air ne se délitent ni dans l'eau ni dans un acide. Après mise en place des matériaux pyroclastiques (cendres, lapilli, scories, ponces : pas nécessairement des pyroclastites consolidés) suite à l'éruption, il y aurait eu lixiviation des éléments solubles (comme la silice), suite aux saisons des pluies, qui vont s'accumuler plus en profondeur à la fin des pluies. S'ils sont retenus dans le profil par un horizon moins perméable, ces accumulations cimentent l'ensemble grâce à la silice amorphe qu'elles contiennent.

L'autre hypothèse concernant l'origine du talpetate est morphogénétique (ou géologique). Les géologues l'ont étudié comme un dépôt au sein d'une séquence. Pour eux, l'origine volcanique du talpetate ne fait aucun doute. Par contre les avis divergent quant au mode de déposition : pour les uns (Bice, 1980), il s'agit de retombées aériennes alors que pour les autres (Williams, 1983), on aurait affaire à une coulée pyroclastique due à une explosion phréato-magmatique issue du complexe volcanique Masaya et Santiago.

Prat (1991) en étudiant les talpetates de la région Centre-Pacifique du Nicaragua, a confirmé la seconde hypothèse.

D'après ses résultats, les talpetates sont constitués de cendres d'andésite basaltique consolidées en tufs. Ces tufs seraient issus d'explosion phréato-magmatique (de l'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entre dans la chambre magmatique, ce qui entraîne une montée en pression dans la chambre puis explosion et projections solides), qui a entraîné d'abord une formation de nuages très chargées en éléments solides (cendres) et en eau,

conduisant ainsi à la formation de coulées boueuses qui ont recouvert le paysage, remplissant les creux voire remontant des pentes, et qui se sont indurées ensuite en se refroidissant et en se desséchant. Ces explosions phréato-magmatiques seraient à l'origine de la caldeira du volcan Masaya, il y a environ 2000 ans.

Les verres constituant ces projections de tufs ont subi une altération géologique lors de leur dépôt, appelée palagonitisation (la palagonite est un verre basaltique hydraté, de couleur orangée). Par ailleurs, Prat (1991) a pu mettre en évidence au sein du talpetate, la soudure de certains verres entre eux. Pour lui, ce processus qui a accompagné la palagonitisation, explique l'induration de l'horizon. Il exclut donc tout processus de cimentation par de la silice, contrairement à ce qui avait été avancé auparavant, sans réelles preuves d'ailleurs.

L'origine et la nature de l'induration de ce type de matériau a ensuite été confirmée dans d'autres cas, comme au Mexique (Hidalgo, 1994 d'après Prat, communication personnelle), sous climat semi-aride.

Prat propose le nom de tuf palagonitisé de Masaya pour désigner les talpetates rencontrés autour de la caldeira du volcan Masaya (figure, 6 ci-contre).

### 1.3. Le terroir étudié : Le municipe de Ticuantepe

Le municipe de Ticuantepe (cf. figure 7, ci-contre) appartient au département de Managua (la capitale). Il a été choisi, d'une part pour sa proximité et son accessibilité facile par rapport à Managua, et d'autre part pour le rôle important qu'il joue dans l'approvisionnement en denrées alimentaires (surtout en ananas) des marchés de la capitale et d'autres grandes villes du Nicaragua comme Masaya, Granada, Leon,....

Dans ce terroir, une large zone d'étude (figure 8, au verso de cette page) représentative du point de vue relief, occupation du sol et exposition par rapport aux gaz du volcan Masaya a été délimitée.

#### 1.3.1. Présentation générale du municipe de Ticuantepe

(D'après Anonyme, 2001; Marinozzi, 1996)

Le municipe de Ticuantepe est localisé dans le bassin versant sud du lac de Managua. Sa superficie est estimée à 66 km<sup>2</sup>. Il comprend le village de Ticuantepe et les localités environnantes.

Le village de Ticuantepe se trouve à 18 km au sud-est de Managua et à 16 km au nord-ouest de la ville de Masaya. Il est délimitée au nord-est par la route « Panaméricaine », le plus important axe routier du Nicaragua.

Le municipe compte 20 225 habitants, dont 60% sont localisés dans la zone rurale, et le reste dans le village de Ticuantepe. La densité de population est de 306 habitants/km<sup>2</sup>. Le potentiel agricole de la région est très élevé et les cultures qui caractérisent Ticuantepe sont : l'ananas, les légumes (tomate, poivron, oignon), les grains de base (maïs, haricot rouge) et les musacées (banane plantain, etc...). On y trouve très peu d'élevage ; celui-ci étant limité aux animaux de basse cour (Marinozzi, 1996).

#### 1.3.2. Délimitation et présentation de la zone d'étude

La zone délimitée s'étend du nord au sud sur environ 10 km, et de l'est à l'ouest sur environ 6 km. Seuls les ensembles caldeira et falaises, inaccessibles, n'ont pas été pris en compte.

Elle est bordée à l'est par la caldeira du volcan Masaya, à l'ouest et au sud par les *Sierras* (qui rejoignent au sud-est le volcan Masaya), et au nord par le long glacis se terminant aux abords du lac de Managua (au nord de Managua).

Sa partie Sud présente un relief très escarpé (alternance d'interfluves peu larges et de talwegs étroits). Les pentes y sont généralement comprises entre 50 et 70 %. Vers le centre, le paysage devient un peu moins escarpé, plus plat (alternance d'interfluves plats et larges et de talwegs également plus larges) et légèrement ondulé.

Sur les terrains très en pente et bien drainées du sud, est cultivé l'ananas, dans le but de réduire l'érosion des sols (Marinozzi, 1996). Dans les talwegs, plus humides, on retrouve

le plus souvent le bananier plantain, généralement associé à d'autres cultures fruitières (manguiers, avocats, etc.), et rarement du café. La pitahaya (*Holocerus undatus*), plante succulente résistante aux gaz du volcan (Marinozzi, 1996), est largement cultivée dans le sud, surtout du côté de la caldeira. Sur les versants ouest, non exposés aux gaz, on retrouve généralement du maïs, des haricot et des légumes.

La partie Nord est caractérisée par un paysage presque plat à faibles pentes. Elle englobe le village de Ticuantepe et va jusqu'à proximité du grand axe routier panaméricain (au nord est du village de Ticuantepe). Les cultures qui dominaient la zone étaient les musacées. Aujourd'hui, elles sont en train d'être substituées par l'ananas. On retrouve également le maïs, le riz, la pitahaya, etc...

### 1.3.3. Quelques aspects socio-économiques

(D'après Guittet et Noisette, 2001)

L'agriculture de la région de Ticuantepe est de type marchande, dominée par la production de fruits et, en premier lieu, de l'ananas, dont elle a le monopole au niveau national. Sa proximité par rapport au plus important axe routier du Nicaragua (la Panaméricaine) détermine plusieurs dynamiques, comme par exemple la facilité dans le transport des produits agricoles vers les marchés de la capitale et des grandes villes (Managua, Masaya, Granada, Léon et Chinandega), mais aussi des phénomènes d'urbanisation croissante et de spéculation foncière forte sur les terres agricoles de la région, découlant de la proximité de Managua (la capitale) et renforcée par la mise en réserve du bois de la réserve naturelle *El-Chocoyero*. La création de cette aire protégée, dans une zone proche du Parc Naturel du Volcan Masaya, à 15 km à peine, crée un lieu touristique et attractif aux portes de la capitale. Le potentiel écotouristique fort de ce terroir pourrait ainsi entraîner de nombreux changements dans son économie et sa tenure foncière d'ici quelques années.

Ticuantepe est également exposé aux gaz émis par le cratère Santiago (en activité depuis 1993), faisant partie du complexe volcanique Masaya, qui se situe à 15 km au sud-est du village de Ticuantepe. Cette émission n'est pas sans conséquence sur l'agriculture de la région, surtout sur celle de la zone plus proche du volcan. D'après les dires des agriculteurs les dégâts occasionnés par le volcan, c'est-à-dire des récoltes moins bonnes en quantité et qualité, seraient plus importants depuis environ 7 ans ; ce qui coïncide avec le début des émissions gazeuses.

Par ailleurs, les petits producteurs de cette région s'insèrent dans l'économie d'un réseau urbain en fort accroissement à travers des activités extra-agricoles, comme salariés, artisans ou commerçants, et la vente de leur production sur les marchés de Managua. Cependant, ils doivent faire face aujourd'hui à des difficultés d'écoulement de la production d'ananas sur le marché national et recherchent des ouvertures vers l'exportation (Guittet et Noisette, 2001).

De plus, la montagne de Managua, en grande partie boisée, agit comme une éponge vis à vis des pluies (rôle épurateur) et participe à l'alimentation de l'aquifère qui approvisionne Ticuantepe et en partie Managua.

Dans ce contexte, l'agriculture de la région, qui pourrait être soumise à des réglementations dans le cadre de la définition de la zone tampon de la réserve *El-Chocoyero* et de la protection des ressources en eau, a un rôle considérable à jouer. Il faudra également qu'elle relève le défi face au potentiel écotouristique de la région, et donc au risque d'abandon des activités agricoles au profit d'autres plus rentables.

Face à ces défis, il nous paraît primordial de caractériser et d'évaluer la potentialité des sols de ce terroir, ce qui servirait à la gestion environnementale et à l'aménagement durable de ce dernier.



## CHAPITRE 2

### LES ANDOSOLS

---

(D'après Baize et Girard, 1995 ; Colmet-Daage et *al.*, 1970 ; Fiantis, 2000 ; Henao-Toro, 2002 ; ISSS Group Reference Base, 1998 ; Quantin, 1972 et 1992 ; Sieffermann, 1973 ; Soil Survey Staff, 1975, 1994 et 1998)

#### 2.1. Introduction

Les Andosols<sup>1</sup> sont des solums dont les propriétés sont largement déterminées par la nature de leur fraction colloïdale non cristalline ou para cristalline (Référentiel pédologique-Quantin, 1995). La présence de verre volcanique et son altération relativement rapide en présence de matière organique déterminent pour les sols à caractères andiques (Andosols ou Andisols) des propriétés très particulières.

Dans ce chapitre, après avoir revu les principaux facteurs de formation de ces sols, nous nous attarderons sur leurs propriétés physiques et chimiques remarquables. Enfin, nous aborderons leur classification selon les systèmes les plus couramment utilisés : Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975, 1994 et 1998), FAO-World Reference Base for Soil Resources (WRB) et les classifications françaises.

#### 2.2. Facteurs de formation

##### 2.2.1. Matériau originel

Les Andosols couvrent plus de 100 millions d'hectares à travers le monde principalement dans des régions de volcanisme actif ou ancien. On les trouve donc principalement développés à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques, cendres, lapillis, ponces et tufs. Il est à noter toutefois, qu'ils ont été observés en régions tempérées et tropicales de haute altitude sur des matériaux non volcaniques (loess, argilites, produits d'altération ferrallitique) (Référentiel pédologique-Quantin, 1995).

La richesse en verre très finement divisé des matériaux volcaniques pyroclastiques explique la rapidité de l'hydrolyse et de l'altération des cendres volcaniques, et la formation abondante de substances amorphes dont les allophanes<sup>2</sup>. Par ailleurs, il ne faut pas penser à priori que sur des matériaux volcaniques pyroclastiques on observera toujours des Andosols. D'autres facteurs orientent la pédogenèse, dont principalement l'âge des matériaux originels, le climat et la géomorphologie. C'est principalement la vitesse d'altération du matériau pyroclastique qui est à l'origine de l'Andosolisation

---

<sup>1</sup> Andosol provient des mots japonais « an do » qui signifient sol noir.

<sup>2</sup> Les allophanes sont des substances alumino-silicatées amorphes et hydratées.

### 2.2.2. Climat et pédoclimat

Tous les auteurs s'accordent à reconnaître que les Andosols les plus riches en substances amorphes sont situés dans les régions les plus pluvieuses et les plus régulièrement humides. Cependant on peut aussi rencontrer des Andosols à allophanes dans des régions moins pluvieuses et à longue saison sèche ; par exemple sur les versants ouest du Nicaragua ou sur les Hauts-Plateaux des Andes (Colmet-Daage, 1968 et 1969, cité par Quantin, 1972). D'après Sieffermann (1973), le fort drainage interne des matériaux volcaniques meubles favorise en même temps le renouvellement rapide des solutions de sol et la formation d'allophanes. Ce phénomène est accru par l'augmentation de la pluviométrie, ou réduit dans des conditions de mauvais drainage interne (hydromorphie) ou de climat à longue saison sèche.

Par ailleurs, la diminution de la température ne semble pas être un facteur limitant la formation des substances amorphes et des Andosols. Colmet-Daage (1969 cité par Quantin, 1970a) observe des Andosols dans les Andes jusqu'à la limite des neiges permanentes.

### 2.2.3. Age du matériau originel et évolution

Il a été souvent observé que les Andosols sont fréquents sur des matériaux volcaniques jeunes, d'âge quaternaire récent. Certains auteurs proposent un âge de 8 000 à 9 000 ans pour la transformation des allophanes en une argile bien cristallisée : l'halloysite.

D'autre part de nombreux auteurs ont remarqué que les sols formés sur des cendres volcaniques d'âge très récent sont caractérisés par une fraction inférieure à  $2 \mu$  dont les substances « amorphes » sont très riches en silice, tandis que les Andosols d'âge plus ancien contiennent des substances « amorphes » riches en alumine. L'interprétation de ce fait est évidemment très importante pour la distinction des sols.

Enfin, un autre fait observé est celui du changement progressif de la nature des sols en fonction de leur éloignement du centre éruptif. Comme le signale Quantin (1972, 1992), ce changement va par exemple en zone tropicale du passage de sols peu évolués à allophanes, à des Andosols typiques, puis à des sols encore plus évolués (sols bruns eutrophes tropicaux, voire des sols ferrallitiques).

Cette genèse différente, indépendante dans une certaine mesure du climat et de l'âge des matériaux originels, s'explique par l'accroissement de la finesse des cendres et la diminution de l'épaisseur et de la fréquence des dépôts en fonction de l'éloignement du centre éruptif : il en résulte que les sols les plus éloignés du centre « évoluent » plus vite que les sols les plus proches.

## 2.3. Propriétés physiques et chimiques

Les sols à caractères andiques sont caractérisés par des horizons de surface épais, riches en matière organique (jusqu'à 10 à 20 %), et généralement très foncés. Leurs propriétés physiques remarquables sont leur faible densité apparente, forte capacité de rétention en eau, et leur bonne stabilité structurale. Les propriétés chimiques les plus notables sont leur contenu élevé en matière organique, leur point isoélectrique élevé, conditionné par leur pH élevé, leur forte CEC et forte capacité de rétention des phosphates, et leur surface spécifique élevée.

### 2.3.1. Les propriétés physiques

#### 2.3.1.1. La densité apparente

La densité apparente est l'un des critères importants pour identifier les sols à caractère andique. La densité apparente des Andosols est inférieure à  $0,9 \text{ g/cm}^3$  (Fiantis, 2000) et peut descendre jusqu'à  $0,3 \text{ g/cm}^3$  (Quantin, 1972). Cette faible valeur est due au contenu élevé en matière organique, à la faible densité des particules de verre volcanique et des allophanes et naturellement, à la porosité très élevée des Andosols (60 à 90%).

#### 2.3.1.2. La rétention en eau

Les Andosols, par suite de leur richesse en substances amorphes très hygroscopiques et de leur faible densité apparente, ont une capacité de rétention pour l'eau très élevée. Celle-ci est généralement comprise entre 20 et 100%. A la capacité au champ, la teneur en eau pondérale (poids d'eau par poids de sol sec) dépasse souvent les 100% du poids de sol sec (à  $105^\circ\text{C}$ ), et peut atteindre les 300% (Quantin, 1972). Par ailleurs, Colmet-Daage et al (1967) ont montré qu'une dessiccation poussée (environ à  $pF = 4,2$ ) provoque une déshydratation irréversible. Ce qui entraîne une modification structurale irréversible du sol, le rendant alors particulièrement sensible à l'érosion.

#### 2.3.1.3. Structure des agrégats

La très bonne stabilité des agrégats à l'état humide, et a contrario, leur très forte instabilité après dessèchement ; sont des propriétés caractéristiques des Andosols. Il en va de même en ce qui concerne la structure en micro-agrégats, responsable en grande partie de la faible densité apparente. Les micro agrégats sont des complexes organo-minéraux de forme ovoïde de 1 à  $10 \mu\text{m}$  de diamètre, composés de polyagrégats friables et très poreux (Référentiel pédologique-Quantin, 1995).

### 2.3.2. Les propriétés chimiques

#### 2.3.2.1. La matière organique et les allophanes

Les Andosols sont généralement très riches en matière organique, souvent liée aux substances amorphes (complexes organo-allophaniques). Cette complexation de la matière

organique la rend très stable et résistante à la minéralisation. Selon Quantin (1972), il est fréquent de trouver de la matière organique en profondeur, même si cela ne se marque pas particulièrement dans la couleur du sol.

D'après plusieurs auteurs (notamment Wada, 1980 ; cité par Fiantis, 2000), il existe une relation inverse entre l'accumulation de matière organique et la formation d'allophanes dans les Andosols. Notamment, Henao-Toro (2002) observe sur des Andosols de Colombie une richesse plus importante en allophanes, des horizons B par rapport aux horizons A, généralement plus riches en matière organique.

La dualité du devenir de l'aluminium (formation d'allophanes ou de complexes Al-humus) est à l'origine de ce qui a été dénommé « composition binaire » du complexe d'altération des Andisols : aluminosilicates mal cristallisés (allophane, imogolite et ferrihydrite) contre complexes organo-minéraux (Mizota et Van Reeuwijk, 1989 cités par Henao-Toro, 2002).

#### **2.3.2.2. Les pH H<sub>2</sub>O et KCl**

Le pH H<sub>2</sub>O (ou pH eau) des Andosols varie selon plusieurs auteurs entre 5,5 et 7,0 , même quand ils sont très fortement désaturés en bases (V < 10%) (Sieffermann, 1969 cité par Quantin, 1972). Ces valeurs de pH relativement élevées comparées au taux de saturation en bases, s'expliquent par la valeur élevée du point isoélectrique<sup>3</sup> des allophanes : 5,5 à 6,5 (Fieldes et Schofield, 1960 cités par Quantin, 1972).

Le pH KCl (pH mesuré sur suspension dans du chlorure de potassium 1 normal) est le plus souvent plus faible que le pH H<sub>2</sub>O.

#### **2.3.2.3. La capacité d'échange cationique (CEC)**

La capacité d'échange cationique des Andosols est en général très élevée. Celle-ci serait essentiellement due aux allophanes, qui dominent le complexe d'échange.

Sherman (1964 cité par Quantin) a observé une diminution de la CEC allant de 30 à 91% par simple dessiccation à l'air. Ceci pourrait s'expliquer par une diminution irréversible de la surface active des allophanes par suite du phénomène de déshydratation irréversible des allophanes.

Par ailleurs, Colmet Daage et *al.* (1969) ont montré que les hydroxydes amorphes adsorbés sur les allophanes masquent les sites d'échanges de ces derniers. Utilisant la méthode Mehra et Jackson (1958) pour la purification des allophanes de leur revêtement d'hydroxydes amorphes, ils ont constaté sur des Andosols des Andes, une nette élévation de la capacité d'échange cationique.

#### **2.3.2.4. La capacité d'échange anionique (CEA) et la rétention du phosphore**

La rétention énergétique du phosphore par les Andosols (généralement supérieure à 85%) est principalement due à la CEA des gels hydroxydes et des allophanes (faisant partie du complexe d'échange) (Fieldes, 1962 cité par Quantin, 1972). Même lorsque les charges de

---

<sup>3</sup> Le point isoélectrique est le pH auquel la charge nette est nulle.

surface du complexe d'échange sont négatives, les phosphates peuvent être fixés à travers des ligands, à condition que ces charges contiennent des groupements Al-OH et Fe-OH (Fiantis, 2000).

Cloos, Herbillon et Echeverra (1968 cités par Quantin, 1972) ont montré, en synthétisant des gels alumino-siliceux semblables aux allophanes et en déterminant leur disponibilité en phosphates, que les Andosols à allophanes plus riches en alumine manifestent une plus forte adsorption des phosphates, tandis que les Andosols à allophanes plus riches en silice eux, manifestent une plus faible adsorption des phosphates.

#### **2.3.2.5. La surface active**

D'après Aomine et Otsuka (1968 cités par Quantin, 1972) la surface spécifique des allophanes serait de l'ordre de 500 m<sup>2</sup>/g. Ceci explique la très forte activité physico-chimique des Andosols, notamment vis-à-vis de l'eau, des cations, anions et de la matière organique.

## **2.4. Classification des Andosols**

### **2.4.1. La classification américaine du soil taxonomy**

Comme nous l'avons déjà dit ci-dessus, dans la première version du Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), les Andosols sont désignés sous le nom d'andepts et classés dans l'ordre des Inceptisols. Les andepts sont caractérisés par :

1) Au moins un des deux critères suivants, et sur leurs premiers 35 cm au moins :

- une densité apparente de la terre fine (< 2mm) inférieure à 0,85 g/cm<sup>3</sup>, et un complexe d'échange dominé par des substances amorphes ;

- plus de 60% en poids de cendres volcaniques vitreuses ou autres matériaux pyroclastiques vitreux, dans les fractions limon, sable et gravier.

2) Le fait qu'ils ne sont pas engorgés d'eau à aucun moment et n'ont pas les caractères des aquepts.

Les andepts sont divisés en 7 groupes qui sont : les cryandepts, les durandepts, les hydrandepts, les placandepts, les vitrandepts, les eutrandepts et les dystrandeps. Pour plus d'informations concernant ces groupes, le lecteur peut se référer au Soil Taxonomy de 1975, dont les références complètes sont données en bibliographie.

Depuis la version du Soil taxonomy de 1994, les Andosols ne sont plus considérés comme un sous-ordre des Inceptisols, mais plutôt comme un ordre à part entière, comme les dix autres ordres du Soil Taxonomy. On parle à présent de l'ordre des Andisols (suffixe « and »). Pour être reconnu comme faisant partie des Andisols (selon le Soil Taxonomy de 1994 ou 1998), un sol doit contenir moins de 25% de carbone organique et avoir les propriétés andiques ci-dessous sur au moins 36 de ces 60 premiers centimètres. Ces propriétés sont :

- 1) Soit, à la fois :
- $Al_o^4 + 1/2 Fe_o \geq 2\%$  ;
  - densité apparente sèche  $\leq 0,9 \text{ g/cm}^3$  ;
  - rétention des phosphates  $\geq 85\%$ .
- 2) Soit, à la fois :
- rétention des phosphates  $\geq 25\%$  ;
  - plus de 30% de particules supérieures à 0,02 mm, dans la terre fine ;
  - et un des 3 critères suivants :
    - $Al_o + 1/2 Fe_o \geq 0,4\%$ , et plus de 30% de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2 mm ;
    - $Al_o + 1/2 Fe_o \geq 2\%$ , et plus de 5% de verres volcaniques dans la fraction 0,02-2 mm ;
    - $0,4\% \leq Al_o + 1/2 Fe_o \leq 2\%$  et un pourcentage en verres volcaniques dans la fraction 0,02-2 mm supérieur à une valeur dépendant de la somme  $Al_o + 1/2 Fe_o$  (relation graphique donnée dans les Soil Taxonomy cités ci-dessus).

Selon le Soil Taxonomy, les Andisols peuvent donc regrouper tant des sols peu altérés et riches en verre volcanique (cf deuxième possibilité (2) des propriétés énumérées ci-dessus) que des sols plus évolués et riches en minéraux à organisation cristalline à courte distance (allophane, imogolite, ferrihydrite).

Les Andisols comprennent 7 sous-ordres qui sont les aquands, cryands, torrands, udands, ustands, vitrands et les xerands.

#### 2.4.2. Les classifications FAO et WRB

Les Andosols constituent une des 26 unités principales de sols définies par la classification FAO-UNESCO de 1972. Au sein des Andosols, 4 sous-unités ont été définies : les Andosols ochriques, molliques, humiques et vitriques. Les critères d'identification des Andosols définis par la FAO sont les mêmes que ceux définis par la classification américaine de 1975, sauf que les 60% en poids de matériaux pyroclastiques vitreux doivent être observés dans la fraction supérieure à 50  $\mu$ , donc les sables et graviers (éventuellement).

En 1994, la classification FAO a été remplacée par le World Reference Base for Soil Resources ou WRB (ISSS Group Reference Base, 1998), qui est la référence internationale actuelle.

Dans la nouvelle version du WRB, les Andosols sont un des 30 groupes de référence définis. La WRB identifie des horizons diagnostiques, qui sont définis d'une part par leurs traits caractéristiques (expressifs), en relation avec les facteurs bioclimatiques, et d'autre part par un ensemble de critères mesurables et pertinents. Pour être considérés comme diagnostic, l'horizon doit avoir un minimum d'épaisseur.

Dans la WRB, les Andosols sont identifiés par les deux critères suivants :

- 1) La présence d'un horizon vitrique ou andique (qui sont deux horizons diagnostiques) débutant à moins de 25 cm de la surface du sol ; et

---

<sup>4</sup>  $Al_o$  et  $Fe_o$  sont l'aluminium et le fer extraits à l'oxalate d'ammonium acide (mélange d'oxalate d'ammonium et d'acide oxalique)

2) l'absence d'horizons diagnostiques (sauf s'ils sont à plus de 50 cm de profondeur) autres que les horizons histique, fulvique, melanique, mollique, umbrique, ochrique, durique ou cambique.

L'horizon vitrique (de surface ou de sub-surface) est dominé par les verres volcaniques et autres minéraux primaires dérivés des rejets volcaniques. Il doit avoir :

- au moins 10% de verre volcanique et autres minéraux primaires dans la terre fine ;
- un des 4 caractères suivants :
  - moins de 10% d'argile dans la terre fine ; ou
  - densité apparente sèche  $> 0,9 \text{ g/cm}^3$  ; ou
  - $\text{Al}_o + \frac{1}{2} \text{Fe}_o > 0,4\%$  ; ou
  - rétention des phosphates  $> 25\%$  ; et
- une épaisseur d'au moins 30 cm.

L'horizon andique est quant à lui constitué par des matériaux mal cristallisés et par des complexes Aluminium-humus. Ses critères diagnostiques sont :

- densité apparente à la capacité au champ  $< 0,9 \text{ g/cm}^3$  ;
- au moins 10% d'argile dans la terre fine ;
- $\text{Al}_o + \frac{1}{2} \text{Fe}_o \geq 2\%$  ;
- rétention des phosphates  $\geq 70\%$  ;
- moins de 10% de verres volcaniques dans la terre fine ;
- une épaisseur d'au moins 30 cm.

Pour les horizons andiques, deux types ont été différenciés : le silandique, de pH neutre à légèrement acide, dont le matériau dominant est l'allophane, et l'aluandique, de pH acide à très acide, dont les matériaux dominants sont les complexes Al-humus. Les critères de différenciation entre les deux horizons sont soit (1) une valeur du rapport Al extrait au pyrophosphate de sodium sur Al extrait à l'oxalate d'ammonium ( $\text{Al}_p/\text{Al}_o$ ) inférieur à 0,5 pour les horizons silandiques et supérieur ou égal à 0,5 pour les horizons aluandiques, soit (2) un contenu de silicium extrait à l'oxalate d'ammonium supérieur ou égal à 0,6% et inférieur à 0,6% respectivement. Récemment, Poulénard et Herbillon (2000) ont proposé une catégorie intermédiaire : les horizons sialuandiques.

Les Andosols à horizon silandique de la WRB correspondent aux Andisols allophaniques selon le groupement proposé par Mizota et van Reeuwijk (1989 cités par Henao-Toro, 2002), tandis que les Andosols à horizon aluandique correspondent aux Andisols non allophaniques.

Il faut souligner également que pour chaque groupe de référence, la WRB donne une liste de qualificatifs (voir les pages 76 à 78 du WRB, édition 1998) permettant de définir des sous-unités au sein de chaque unité ou groupe principal. Par exemple un Andosol à caractère andique et présentant un horizon durique sera qualifié de duric andic Andosol.

### **2.4.3. Les classifications françaises**

Contrairement aux systèmes FAO et américain, le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 1995) n'est pas une clef dichotomique. Il s'agit d'un classement plutôt que d'une classification. Les Andosols y constituent un des Grands groupes de Référence. On y accède par la reconnaissance d'un horizon vitrique (vitrosols), silandique (silandosols) ou aluandique (aluandosols).

Dans l'ancien système français (1967), les Andosols constituent une des 12 classes définies par ce système. La classe des andosols comprend deux sous-classes : celle des andosols des pays froids (andosols humifères désaturés) et celle des andosols des pays tropicaux, elle-même divisée en deux groupes : andosols saturés et andosols désaturés.



## CHAPITRE 3

### CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET IDENTIFICATION GEOMORPHOPEDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

---

#### 3.1. Climat

(D'après Guittet et Noisette, 2001 ; INETER, 2001 ; Marinozzi, 1996).

Le relief marqué du terroir lui confère une forte variation du climat. De type tropical sec (à longue saison sèche, 5 mois) à l'aval (sur le glacis), on passe à un microclimat subhumide à l'amont sur les crêtes.

Les températures sont en moyenne comprises entre 24°C et 27°C sur le glacis jusqu'à environ à 400 m d'altitude, et entre 22°C et moins de 30°C sur les crêtes (entre 400 et 700 m). Les températures minimales peuvent atteindre 19°C, et sont observées pendant les mois de décembre et janvier. Les températures maximales, qui peuvent aller jusqu'à 37°C, se manifestent pendant les mois d'avril et mai, à la fin de la saison sèche (figure 9, ci-contre).

L'humidité relative varie entre 60 et 90 %. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 1000 et 1600 mm, et sont caractérisées par une grande variabilité inter-annuelle, phénomène qui détermine un niveau de risque très élevé dans l'exploitation agricole [Marinozzi, 1996]. On observe deux saisons bien marquées : une sèche (de 5 à 6 mois) et l'autre des pluies (de 6 à 7 mois). Ce qui est caractéristique d'un climat tropical de savane (correspondant au Aw de la classification de Köppen) (Calembert, 1995).

L'époque des pluies commence aux mois de mai, juin et se termine aux mois d'octobre, novembre, avec une interruption au mois d'août (période dite *veranillo*<sup>5</sup>). La distribution bimodale des pluies (figure 10, ci-contre), à l'intérieur de la période humide, détermine deux saisons de semis : la *primera*, à partir de mai jusqu'à juin et la *postrera*, d'août à novembre.

Les vents soufflent 10 mois sur 12 de l'est à l'ouest. Ce facteur climatique est déterminant pour la direction des émissions gazeuses du volcan Masaya, à la limite Sud-Est de la commune. Ce volcan est dans une phase active avec d'abondantes émissions gazeuses, qui se dirigent dans la partie Sud de la commune, nuisant aux cultures de grains de base, café et musacées (Marinozzi, 1996).

---

<sup>5</sup> Mini saison sèche (vient de *Verano* qui veut dire été).

## 3.2. Géologie

(D'après Bice, 1980 et 1985, Clifford, 1980, Krusi et Shultz, 1979, Zoppis Bracci, 1957 et 1968 ; Zoppis Bracci et Guidice, 1958 cités par Prat, 1991 ; Colmet-Daage et *al.*, 1970a ; Marin Castillo, 1990 ; Parsons Corporation, 1972)

Les sols de la région de Ticuantepe se sont formés à partir des dépôts pyroclastiques récents (Holocène) provenant d'éruptions du complexe volcanique Masaya, voire du volcan Apoyo (au sud-est de Ticuantepe). Ces dépôts dateraient de quelques milliers d'années. Ils sont venus recouvrir ceux du groupe Las Sierras (qui datent du Plio-Pléistocène), depuis le sud de Masaya jusqu'aux abords de Tisma (dans la dépression nicaraguayenne).

Ces dépôts pyroclastiques récents sont composés de pyroclastes fins à grossiers : cendres, lapilli, graviers et coulées hydro-magmatiques (tufs, dont certains sont appelés localement talpetate) dont les minéraux sont de type andésitique ou basaltique. Les ponces et les cendres (sables pyroclastiques) constituent les couches les plus récentes. Entre celles-ci, peuvent s'intercaler des lentilles sédimentaires, comme par exemple des alluvions argileuses.

Pour des sols dérivés de matériaux volcaniques de type andésitique ou basaltique, une séquence d'évolution progressive Andisol  $\equiv$  inceptisol  $\equiv$  alfisol a été souvent observée (Martini, 1976 ; Delvaux *et al.*, 1989 ; Takahashi *et al.*, 1993 cités par Henao-Toro, 2002).

### ➤ Le volcan Masaya

Ce volcan (cf photo ci-contre) est situé au sud-est de Ticuantepe, à environ 40 km de Managua, la capitale. Il influence particulièrement le terroir étudié. Selon les agriculteurs, c'est un facteur limitant pour la diversification des cultures (Guittet et Noisette, 2001).

Le volcan Masaya s'élève à une altitude de 500 m selon Colmet-Daage et *al.* (1970a), de 625 m selon Richter et *al.* (2001). D'après Prat (1991), Bice (1980) et Williams S.N. (1983), l'explosion du Masaya qui a formé le talpetate date de 2000 à 3000 ans. D'après Zoppis de Sena (1957 cité par Colmet-Daage et *al.*, 1970a), les premières éruptions de l'époque historique remontent à 1522-1537. En 1772, il y eut d'abondantes coulées de lave qui envahirent les plaines environnantes et coupèrent la route de Managua à Masaya. Ces laves sont encore visibles du côté est de l'axe routier Ticuantepe-La Concepcion (au sud de Ticuantepe). La végétation a à peine repris sur ces laves, extrêmement déchiquetées et fissurées. Les éruptions qui ont suivies se produisirent en 1857 et en 1902. Cette dernière est à l'origine d'importantes émissions de cendres qui édifièrent les deux cônes actuels (le cône actif porte le nom de cratère Santiago) et s'étendirent sur plus de 20 km aux alentours. Quelques coulées se sont encore épanchées en 1946. Depuis cette date, il n'y a plus qu'une activité de fumerolles et un abondant dégagement de vapeur d'eau mêlée d'anhydride sulfureux qui provoque de sérieux dégâts dans les cultures (Colmet-Daage et *al.*, 1970a et Guittet et Noisette, 2001) et sur l'outillage métallique des agriculteurs (selon ces derniers).

### **3.3. Identification géomorphopédologique**

L'identification géomorphopédologique de la zone d'étude a été réalisée à partir des documents cartographiques existants (carte topographique au 1/50 000 des régions III et IV, regroupant les départements de Managua, Masaya, Granada et Carazo, carte pédologique au 1/50 000 de la région pacifique du Nicaragua, carte d'occupation des sols au 1/250 000 de la région Managua-Masaya) et de l'examen au stéréoscope de la photographie aérienne (à l'échelle 1/40 000) couvrant la zone d'étude (figure 11, ci-contre). La carte des sols est reprise au verso de la page 26 (figure 12, en regard de la présentation des sols, au verso de la page 26) tandis que la carte d'occupation des sols se trouve en annexe 2.

Cette exploitation des documents cartographiques et photographiques a conduit à subdiviser la zone d'étude en quatre unités géomorphopédologiques, se distinguant surtout par la forme du relief et l'occupation des sols. Ces unités sont décrites ci dessous.

#### **3.3.1. Unité 1 (zone escarpée et déboisée)**

Cette unité est localisée au sud-est de la zone d'étude. Elle est contiguë au volcan Masaya. Elle présente un relief légèrement bombé, en son centre, et escarpé (succession de crêtes et de talwegs) sur ses abords. On y rencontre un microclimat humide (l'altitude y est rarement inférieure à 400 mètres).

C'est la partie la plus affectée par les gaz volcaniques et l'aspect de sa végétation s'en ressent : absence d'arbres (ou présents, mais dépourvus de végétation), présence de pâturages et de la culture de pitahaya, comme on l'a déjà dit, résistante aux gaz du volcan (Marinozzi, 1996). Même l'ananas, largement implanté dans le terroir, d'une part pour sa résistance aux émanations gazeuses, n'y est pas cultivé. Les parcelles sont tellement petites et irrégulières qu'elles n'apparaissent pas au stéréoscope. La zone est également très faiblement urbanisée.

#### **3.3.2. Unité 2 (zone escarpée et partiellement boisée)**

Cette unité prolonge la première vers l'ouest et englobe quasiment toute la partie sud de la zone d'étude. Elle est délimitée à l'ouest par la réserve naturelle El Chocohiero et comprend les villages Los Aguirres, Los Rios, La Francia et Las Carpas. Elle est fortement entaillée par les cours d'eau qui descendent des contreforts de l'ouest et qui alimentent la plaine au nord. Cette unité est à la limite entre le climat tropical sec et le microclimat humide de l'unité 1.

D'après les photographies aériennes, la carte d'occupation des sols et les observations de terrain, les pentes sont majoritairement occupées par des parcelles d'ananas. Les crêtes sont laissées au bois et les fonds de vallons au bananier plantain, qui y est souvent associé à des arbres (le café y a été rencontré une seule fois, en association avec des bananiers et des manguiers). Sur les photographies aériennes, le boisement apparaît irrégulier et les parcelles souvent mal délimitées. La zone est très peu urbanisée (les maisons sont très dispersées).

### **3.3.3. Unité 3 (zone peu escarpée à interfluves plats et larges)**

Cette unité est directement située au nord des deux précédentes. Les localités La Borgoña, San José et El Eden appartiennent à cette dernière. La dissection par les cours d'eau y est encore marquée, mais de façon moindre que dans l'unité 2. L'axe principal d'écoulement des cours d'eau marque la légère différence entre la partie est et la partie ouest. A l'est, les cours d'eau convergent plus rapidement vers l'axe principal, ce qui confère à cette partie des interfluves plus étroits. Tandis qu'à l'ouest, les interfluves sont plus larges et plats et le paysage a plutôt un aspect ondulé. Cette différence se marque surtout au niveau des parcelles qui sont plus larges et bien délimitées du côté ouest, moins larges et irrégulières à l'est. Le climat y est de type tropical sec (l'altitude y est rarement supérieure à 300 m).

D'après notre expérience de terrain, l'unité est majoritairement occupée par la culture d'ananas (principalement sur les interfluves et parfois sur les versants) et par quelques musacées dans les vallons. Dans ces mêmes vallons, on observe parfois des arbres ou de la végétation naturelle. Sur les photos, on note la présence d'arbres autour des parcelles et parfois sur les pentes. Les routes ont été également tracées dans les zones basses (généralement, on observe des bananiers de part et d'autres de celles-ci).

L'unité apparaît sur la carte d'occupation des sols (qui est incomplète pour la surface correspondant à cette unité) comme étant une zone fortement anthropisée avec association de cultures en petites parcelles.

### **3.3.4. Unité 4 (zone plane semi-urbanisée)**

Elle se trouve juste au nord de l'unité 3. Elle regroupe le village de Ticuantepe et ses alentours. Elle se distingue des trois autres par son caractère plat et ses cultures variées. Comme l'unité 3, l'altitude y est comprise entre 200 et 300 m et le climat de type tropical sec.

Les sols y sont principalement occupés par les cultures d'ananas, maïs, riz (très rarement), haricot, pitahaya et des légumes. D'après les agriculteurs, les cultures y sont en rotation. Sur les photographies aériennes, même si on ne distingue pas le type d'occupation des parcelles, celles-ci apparaissent plus étendues, bien délimitées et régulières, malgré la forte urbanisation de l'unité. Ce qui reflète un contexte socio-économique plus favorable, accentué par la proximité de l'axe routier Managua-Masaya.

Les chemins, bordés de quelques arbustes, sont tracés dans les creux.

### 3.4. Présentation des sols

#### 3.4.1. Introduction

Les sols seront présentés d'après la carte des sols (au 1/50 000) de la région Pacifique du Nicaragua, éditée par le Ministère de l'Agriculture et de l'élevage, réalisée dans le cadre de l'inventaire des ressources naturelles du Nicaragua (Catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua, 1971). Cette carte a été digitalisée pour la partie concernant notre zone d'étude (figure 12, ci-contre).

La carte divise les plages de sols en série (ensemble de profils de sol ayant la même roche sous-jacente et se trouvant dans le même contexte paysager et climatique, avec des gammes de pentes et des conditions de drainage bien définies). Chaque série est divisée en sous-séries ou phases, représentées sur la carte des sols (ci-contre). Une sous-série (ou phase) est une portion du relief où les caractéristiques physiques des sols (texture, pente, profondeur, drainage, etc.) sont similaires. Les sous-séries sont symbolisées de la manière suivante : une, deux ou trois lettres majuscules abrégant le nom de la série de sols (la série de sol porte en général le nom de la localité dans laquelle elle est située ou qui lui est la plus proche), suivi(s) d'une lettre minuscule de "a" à "g" qui indique la classe de pente ("a" est la classe la plus faible et "g" la plus forte), vient ensuite un chiffre arabe (ce dernier vient parfois avant la lettre minuscule) qui définit le drainage, et enfin un chiffre romain qui indique la classe d'aptitude d'utilisation du sol.

#### 3.4.2. Présentation des séries et sous-séries de sol traversées

Après avoir donné les caractéristiques principales des différentes séries de sol rencontrées dans notre zone d'étude, nous citerons et donnerons celles des sous-séries traversées par les 4 toposéquences suivies lors de nos prospections de terrains.

Les séries sont présentées du sud (toposéquence 1) vers le nord (toposéquence 4) et d'est (de la Caldeira) vers l'ouest (les contreforts).

##### 1. La série « coulées de lave » (RV)

Les sols de cette série sont caractérisés par des surfaces rugueuses et dentées de coulées de laves (récentes et anciennes), couvertes de pierres et de roches en périphérie, et s'étendant en langues depuis la base des volcans. Les anciennes surfaces possèdent des ondulations où s'accumulent des matériaux altérés de roches. Ces matériaux non consolidés ont été transportés par le vent depuis les aires adjacentes élevées. Ils soutiennent une végétation clairsemée d'arbustes.

La sous-série traversée est *RV VIII* : Coulées de lave (RV), à aptitude nulle pour les cultures commerciales (VIII). Ces sols sont le plus souvent laissés à l'état naturel et servent de zones de captage d'eau. Dans la zone d'étude, on les retrouve à l'est des unités 1, 2 et 3, où ils sont contiguës à la caldeira du volcan Masaya.

## 2. La série « San Ignacio » (SI)

Elle consiste en des sols profonds, bien drainés, de texture légère et dérivant de cendres volcaniques récentes. Ils sont bruns très sombre en surface et bruns à bruns foncés en profondeur. On retrouve ces sols le plus souvent à des altitudes variant entre 300 et 400 m.

Les sous-séries traversées sont :

- *Sif VII* : sols appartenant à la série San Ignacio, de texture limon sableux à sable limoneux (dans la légende de la carte des sols on parle de texture *franco*<sup>6</sup> *arenoso*), aux pentes comprises entre 30 et 50% (zone escarpée), inaptes aux cultures et essentiellement utilisés pour le pâturage, ou laissés à l'abandon pour la vie sauvage ou la forêt. Elle couvre majoritairement les unités 1 et 2 (son côté est). Elle est très rare dans l'unité 3 et absente dans l'unité 4.
- *Sid IV* : sols appartenant à la série San Ignacio, franchement sableux, aux pentes comprises entre 8 et 15 % (zone modérément ondulée à inclinée), qui ne sont aptes qu'aux cultures requérant un labour soigneux. On rencontre ces sols à l'ouest de l'unité 2 et dans l'unité 3.
- *Sic III* : sols appartenant à la série San Ignacio, franchement sableux, aux pentes comprises entre 4 et 8% (zone modérément ondulée à inclinée), aptes uniquement aux cultures requérant des pratiques spéciales de conservation. On retrouve ces types de sols dans les unités 2, 3 et à l'ouest de l'unité 4.
- *Sib III* : sols appartenant à la série San Ignacio, franchement sableux, aux pentes comprises entre 1,5 et 4% (zone légèrement ondulée à légèrement inclinée), aptes uniquement aux cultures requérant des pratiques spéciales de conservation. On les rencontre dans les unités 2 (à l'ouest) et 3.

## 3. La série « Carcavas (ravines escarpées) » (CV)

Ce type de terres comprend les talus escarpés des cours d'eau, les sols alluviaux des vallons étroits et les sols colluviaux à la base des pentes escarpées. Les bords des ravines de même que leur fond étroit caractérisent cette unité et la différencient des autres sols escarpés. Ces sols ont des pentes variant en majorité de 25 à plus de 75%. Beaucoup de terres conservent leur végétation naturelle qui les protège contre l'érosion. Là où les pentes dépassent les 75%, les sols sont généralement superficiels et érodés à cause du ruissellement de surface.

Les sous-séries traversées sont :

- *CV2 VII* : Ravines escarpées, aux pentes comprises entre 30 et 75%, bien drainées (chiffre 2), inaptes aux cultures et essentiellement utilisées pour le pâturage, ou laissées à l'abandon pour la vie sauvage ou la forêt. On les retrouve à l'ouest des unités 2 et 4 et un peu partout dans l'unité 3.

---

<sup>6</sup> Voir chapitre 6 (point 6.1.1.2) pour la signification de la texture *franco*.

- *CV VIII* : Ravines très escarpées et fracturées, aux pentes supérieures à 75%, inaptes aux cultures, et le plus souvent laissées à l'abandon. Ces endroits servent généralement de zones de captage d'eau. On les retrouve à l'est des unités 3 et 4.

#### **4. La série « sols alluviaux » (TX)**

Ces sols se sont formés à partir des matériaux (cendres, tufs,...) récents provenant des terres adjacentes plus élevées, déposés par les rivières sur les terres basses. On les rencontre généralement sur des aires étroites et allongées. Ils ont une grande variabilité de drainage et de texture sur de faibles distances.

A cause de leur pierrosité, ces sols sont laissés au pâturage, qui peut être amélioré par le semis de graminées adaptées.

La sous-série traversée est *TXi IV* : sols alluviaux fréquemment inondés, aux pentes comprises entre 0 et 8%, utilisés uniquement pour le pâturage. On ne les retrouve qu'à l'ouest de l'unité 3.

#### **5. La série des « sols très superficiels » (MV)**

Ce sont des sols bien drainés, à texture variée, avec une épaisseur inférieure à 25 cm. Ils dérivent de basaltes, tufs, ignimbrites et scories cimentés.

La sous-série traversée est : *MVc VII* : sols très superficiels, aux pentes comprises entre 4 et 8%, inaptes aux cultures et essentiellement utilisés pour le pâturage, ou laissés à l'abandon pour la vie sauvage ou la forêt. On retrouve ces sols dans l'unité 3, vers le centre.

#### **6. La série « Sabana Grande » (SG)**

Ce sont des sols brun grisâtre sombre à brun très sombre, profonds à modérément profonds, bien drainés, qui se sont formés à partir d'alluvions grisâtres de cendres volcaniques. On les rencontre surtout sur les larges plaines avoisinant le village de Sabana Grande.

La sous-série traversée est : *SG2b III* : sols appartenant à la série Sabana Grande, franchement sableux, bien drainés, aux pentes comprises entre 1,5 et 4%, aptes uniquement aux cultures requérant des pratiques spéciales de conservation. On rencontre ces sols dans la partie centrale de l'unité 3.

#### **7. La série « Nindiri » (ND)**

Elle consiste en des sols profonds à modérément profonds, bien drainés, friables, dérivés de cendres volcaniques et de scories. Ces sols se rencontrent dans les plaines au nord de Ticuantepe et près du village de Nindiri.

La sous-série traversée est : *ND2b II* : sols appartenant à la série Nindiri, franchement sableux fin, bien drainés, aux pentes comprises entre 1,5 et 4%, aptes aux plantes requérant des pratiques de conservation modérées. On retrouve ces sols sur une très petite surface de l'unité 3 (dans le centre) et surtout dans l'unité 4, où ils occupent tout l'est et le centre.

### **8. La série « Esquipulas » (ES)**

Ce sont des sols profonds à modérément superficiels, bien drainés, bruns obscurs, franchement sableux, qui se sont formés à partir d'alluvions anciennes provenant des hautes terres couvertes de cendres volcaniques. Ils possèdent en profondeur un horizon de scories légèrement cimenté et reposent sur des graviers de scories basaltiques. On les rencontre dans les plaines entourant le village d'Esquipulas.

La sous-série traversée est : *ESb II* : sols appartenant à la série Esquipulas, franchement sableux, aux pentes comprises entre 1,5 et 4%, aptes aux plantes requérant des pratiques de conservation modérées. On ne retrouve ces sols qu'à l'ouest de l'unité 4.



## CHAPITRE 4

### ANALYSE DU TERRAIN

---

#### 4.1. Description de la méthodologie de terrain

La méthodologie de prospection du terrain a été établie en tenant compte de l'existence éventuelle d'une différenciation pédogénétique, agropédologique, entre le sud (plus en altitude et au relief plus marqué) et le nord (plat, et où l'intensification agricole est plus forte) d'une part, et l'est (plus exposé au gaz du volcan) et l'ouest d'autre part.

Ainsi, afin de mieux caractériser le terroir, quatre transects (d'une longueur d'environ 6 km chacun) couvrant la totalité de la zone d'étude (du nord vers le sud) ont été établis (dans la direction est-ouest) sur la carte topographique et dessinés sur papier millimétré afin de bien faire ressortir les formes du relief (on parle de toposéquences). La figure 13 (ci-contre) montre les quatre transects réalisés, ainsi que les différents points d'observations (sondages et profils).

Les prospections de terrain ont été menées en deux phases : une de reconnaissance, qui a consisté en la réalisation de sondages à la tarière en parcourant les toposéquences établies, et une phase de description de profils pédologiques et de prélèvements d'échantillons des horizons différenciés.

Les horizons reconnus par sondages ont été décrits du point de vue de la texture, couleur, type d'horizon, etc., au moyen d'une fiche conçue par le Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx.

En fonction des observations réalisées pendant la phase de reconnaissance, six profils représentatifs de la zone d'étude ont été décrits et prélevés pour être analysés au Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx. Ces profils font l'objet du chapitre suivant.

#### 4.2. Présentation des toposéquences et sondages

Les figures 14, 15, 16 et 17 présentent les quatre toposéquences représentatives de la zone d'étude, ainsi que les endroits où ont été réalisés les sondages et profils. Le tableau 2 donne pour chaque unité et toposéquence les numéros des sondages effectués, ainsi que des informations générales sur leur environnement.

Pour chaque toposéquence, les sondages jugés représentatifs sont présentés (de manière succincte) de l'est vers l'ouest. Une fiche de description synthétique ainsi que les photographies du contexte et des horizons (dans des bacs) sont reprises.

Tableau 2 : Présentation des sondages réalisés.

Unité	Toposéq.	Sondage n°	Lieu-dit	Coordonnées			Géomorphologie			Série de sol	Occupation
				latitude	longitude	altitude	Forme	Pente	Exposition		
Unité 1		4	El Panama	11°58'43"N	86°11' 58" W	520 m	versant	19%	Sud	Sif VII	Pitahaya
Unité 2	1	5	La Francia 1	11°58'59"N	86°12' 40" W	440 m	versant	72%	Sud-Ouest	Sif VII	Ananas
		2	La Francia 1	11°58'53"N	85°13'13"	455 m	versant	11%	Nord	Sif VII	Ananas
		6	La Francia 2	12°08'02"N	86° 14' 48" W	450 m	versant	55%	Ouest	Sif VII	Ananas
		7	Los Rios	11° 58' 50" N	86° 13' 45" W	420 m	versant	55%	Nord-Ouest	CV2 VII	Ananas
		8	Los Rios	11° 58' 50" N	86° 13' 45" W	420 m	plane	-	-	CV2 VII	Café
		9	Los Rios	11° 58' 57" N	86° 14' 21" W	430 m	versant	35%	Sud-Est	Sld IV	Ananas
	2	10	San Pedro	11° 59' 56" N	86° 11' 58" W	430 m	versant	22%	Nord-Ouest	RV VIII	Ananas
Unité 3	2	11	San Pedro	12° 00' 12" N	86° 12' 11" W	395 m	plane	-	-	Slc II	Ananas
		12	La Borgonã	11° 59' 57" N	86° 12' 50" W	460 m	plane	-	-	Slb III	Ananas
		13	San José	12° 00' 00" N	86° 13' 23" W	330 m	versant	10%	Nord-Ouest	Slc III	Ananas
		3	San José	-	-	380 m	plane	-	-	Slb III / CV2 VII	Ananas
	14	San Felipe	11° 59' 59" N	86° 14' 22" W	415 m	versant	15%	Est	Slb III	Ananas	
	3	15	Santa Emilia	12° 00' 30" N	86° 11' 33" W	410 m	Bombée	-	-	RV VIII	Ananas
		16	Las Perlas	12° 00' 35" N	86° 12' 24" W	340 m	plane	-	-	CV2 VII	Ananas
		17	Palestina	12° 06' 36" N	86° 12' 50" W	320 m	plane	-	-	ND2b II	Ananas
		18	La Boronã	12° 00' 40" N	86° 13' 16" W	330 m	Bombée	-	-	Slb III	Ananas
		19	El Eden	12° 00' 53" N	86° 13' 43" W	330 m	plane	-	-	Slb III	Ananas
20		El Eden	12° 00' 56" N	86° 13' 42" W	330 m	plane	-	-	Slb III	Ananas	
21	El Eden	12° 00' 38" N	86° 13' 57" W	380 m	versant	23%	-	Slc III	Ananas		
Unité 4	4	22	San Pedro 3	12° 01' 53" N	86° 11' 57" W	285 m	plane	-	-	ND2b II	Maïs
		23	San Pedro 2	12° 01' 52" N	86° 11' 52" W	275 m	plane	-	-	ND2b II	Pitahaya
		26	Buenos aires	12° 01' 50" N	86° 12' 26" W	250 m	versant	9%	Est	ND2b II / CV III	Bananiers
		25	Buenos aires	12° 01' 49" N	86° 13' 01" W	280 m	Bombée	-	-	ND2b II / CV2 III	Ananas
24	Buenos aires	12° 01' 54" N	86° 13' 28" W	330 m	plane	-	-	Slc III	Ananas		

### 4.2.1. Toposéquence 1 : El Panama – Los Rios

Longue d'environ 6 kilomètres (figure 14, ci-contre), elle s'étend entre les localités El Panama (à l'est, côté volcan) et Los Rios (à l'ouest, côtés Sierra). L'altitude y est le plus souvent comprise entre 400 et 500 m. Elle traverse les unités 1 et 2 (définies au chapitre 4) et représente donc la partie très escarpée et fortement exposée aux gaz du volcan (le secteur sud). La séquence recoupe une succession d'interfluves étroits et de vallons profonds.

Elle traverse, d'est vers l'ouest, les séries Coulées de lave, San Ignacio et Carcavas (voir la légende pédologique de la toposéquence). Elle est cependant dominée par la série San Ignacio, qui sont des sols formés sur cendres volcaniques récentes et scories, profonds, bien drainés, et de texture légère.

L'occupation du sol y est dominée par la culture de l'ananas (surtout sur les pentes). Les crêtes et fonds de vallée sont laissés respectivement au bois et au bananier plantain (souvent en association avec des arbres).

Cette toposéquence a été caractérisée par 7 sondages à la tarière (voir coupe géomorphologique). Sur base de ces sondages, une fosse pédologique (profil 1) a été creusée, décrite et échantillonnée pour être analysée au laboratoire.

#### 4.2.1.1. Présentation des sondages

##### 1. Sondage n°4 (El Panama)

Ce sondage a été réalisé en haut d'un versant occupé par de la pitahaya. L'altitude y est de 520 mètres.

Le sondage montre un sol profond (> 120 cm), de couleur noire jusqu'à 20 cm et noir brunâtre à brune au-delà. La charge en éléments grossiers est comprise entre 15 et 50% entre 0 et 70 cm. Elle est inférieure à 15% entre 70 et 105 cm puis augmente avec la profondeur (supérieure à 50% au-delà de 110 cm). La texture est de type sable limoneux jusqu'à 70 cm et limon sableux au-delà. Le pH est de 4 dans les 20 premiers cm et de 5 au-delà de 70 cm.

Les horizons reconnus se succèdent dans un ordre Ap/C/"2Bw"/2C/3C.

##### 2. Sondage n°5 (La Francia 1)

La parcelle sondée est située sur une forte pente (72%) cultivée en ananas. L'altitude au point de sondage est de 440 mètres.

Le sol est moins profonds (80 cm) que ceux de la même toposéquence. Il est de couleur noir brunâtre jusqu'à 56 cm et brun olive au-delà. La charge est inférieure à 15% sur toute l'épaisseur sondée. La texture est partout de type sable limoneux. Le pH est de 5,5 dans tous les horizons.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C.

### 3. Sondage n°2 (La Francia 1)

Ce sondage a été réalisé sur un versant de 11 % de pente, à quelques mètres de là où sera creusé le profil 1. La parcelle est occupée par de l'ananas et l'altitude y est de 455 mètres.

Le sol est profond (> 120 cm), noir jusqu'à 30 cm, et noir brunâtre et brun en profondeur. Le sondage montre deux ensembles d'horizons graveleux (l'un entre 0 et 55 cm et l'autre au-delà de 80 cm), séparés par une épaisseur (entre 55 et 80 cm) où la charge est très fine voire nulle. La texture alterne du limon sableux (0-30 ; 55-80 cm) au sable limoneux (30-80 et > 80 cm). Le pH est de 4,5 dans les 20 premiers centimètres et de 5 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C/2Bw/2C.

### 4. Sondage n°8 (Los Rios)

Ce sondage a été effectué sur une parcelle de forme plane cultivée en café sous bananiers et manguiers, de forme plane. L'altitude y est de 420 mètres.

Le sol est profond (>120 cm), de couleur noir brunâtre, mais un peu plus foncée entre 50 et 75 cm. La charge grossière est inférieure à 15% sur toute l'épaisseur sondée. La texture est plus fine (limon argileux au limon) au-delà de 75 cm par rapport à un ensemble limon sableux et sable limoneux entre 0 et 75 cm. Le pH est de 4 dans les 20 premiers centimètres et de 6 au-delà de 120 cm.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C/2AB/2Bw/2C.

### 5. Sondage n°9 (Los Rios)

Ce sondage a été réalisé sur une parcelle d'ananas sur versant (pente de 35%), au pied de la montagne *Santa Rita*. C'est le dernier de la toposéquence 1. L'altitude y est de 430 mètres.

Le sol est profond (120 cm) et de couleur noire à noir brunâtre (10 YR). La charge en éléments grossiers reste inférieure à 15% dans tous les horizons. La texture est de type limon sableux jusqu'à 25 cm et au-delà de 115 cm, et de type limon dans les horizons intermédiaires. Le pH est de 4 dans les 25 premiers centimètres et de 5 au-delà de 50 cm.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C/2Bw/2C.

#### 4.2.1.2. Synthèse des observations réalisées

Les sols de cette toposéquence (qui représente le secteur sud fortement escarpé) sont profonds. Leur couleur est noire à noir brunâtre dans les horizons supérieurs, et brune en profondeur. Ils montrent une charge en éléments grossiers généralement inférieure à 15%. Les textures s'inscrivent le plus souvent dans les domaines limon sableux et sable limoneux

(texture *franco*), mais deviennent plus fines (limon et limon argileux) vers l'ouest. Les pH sont de 4 à 5 en surface, et de 5 à 6 en profondeur.

Les horizons observés se succèdent le plus souvent dans un ordre Ap/AC/C/"2Bw"/2C/3C, qui laisse supposer l'existence de plusieurs phases de pédogenèse sur une épaisseur courte. Étant donné le contexte volcanique, on pourrait par ailleurs penser à la superposition de dépôts provenant d'éruptions volcaniques différentes, qui recouvrent d'autres dépôts et/ou sols : on parle alors de paléosols.

#### 4.2.2. Toposéquence 2 : San Pedro – San Felipe

Cette toposéquence (figure 15, ci-contre) s'inscrit à la limite entre les unités morphopédologiques 2 et 3 (qu'elle traverse en alternance) du côté est, mais se trouve entièrement dans l'unité 3 à l'ouest. Elle s'étend d'environ 5 kilomètres et demi, depuis la localité San Pedro vers celle de San Felipe, au pied des contreforts de l'ouest. L'altitude y est comprise entre 300 et 450 mètres.

Le relief est ici moins escarpé et plus ondulé que sur la toposéquence 1. On observe une alternance d'interfluves longs et larges, avec des ravines et vallons escarpés. La toposéquence traverse d'est vers l'ouest les séries de sol RV, SI, TX (sols alluviaux) et CV.

L'ananas y reste la culture dominante. Le bananier plantain occupe toujours les vallons, de moins en moins nombreux.

Cette toposéquence a été caractérisée par 6 points de sondages et par le profil 5.

##### 4.2.2.1. Présentation des sondages

###### 1. Sondage n°10 (*San Pedro*)

Il a été effectué sur un versant de 22% de pente, occupé par de l'ananas. L'altitude y est de 430 mètres.

Il montre un sol profond (>120 cm), noir brunâtre dans les 20 premiers centimètres, noir foncé (7,5 YR) de 20 à 65 cm, et brun clair au-delà. La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% entre 0 et 100 cm et comprise entre 15 et 50% au-delà. La texture est de type limon sableux jusqu'à 100 cm et sableux au-delà. Le pH est de 5 dans les 45 premiers centimètres et de 6,5 entre 65 et 100 cm. Il est de 4,5 au-delà de 100 cm (cas exceptionnel).

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C.

###### 2. Sondage n°12 (*La Borgoña*)

Ce sondage a été réalisé sur la même parcelle où sera creusé le profil 5. La parcelle est de forme plane et occupée par une culture d'ananas. L'altitude y est de 460 mètres.

Le sol est profond (>120 cm), noir jusqu'à 60 cm et noir brunâtre au-delà. La charge est partout inférieure à 15%. La texture est de type limon sableux. Le pH est de 4 dans les 25 premiers centimètres et de 6 en profondeur.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC.

### 3. Sondage n°13 (*San Jose*)

Ce sondage a été réalisé sur un versant de 10% de pente, cultivé en ananas. L'altitude y est de 330 mètres.

Le sol est profond, noir foncé jusqu'à 70 cm et noir brunâtre pour les horizons plus profonds. La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% dans les 33 premiers centimètres et au-delà de 70 cm, et nulle entre 33 et 70 cm. La texture est exclusivement de type sable limoneux. Le pH est de 5 dans les 50 premiers centimètres et de 6 en profondeur.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AB/"Bw"/BC/C.

### 4. Sondage n°14 (*San Felipe*)

La parcelle sondée est sur un versant de 15% de pente, situé au pied de la montagne *Santa Teresa*. Il est occupé par de l'ananas et l'altitude y est de 415 mètres.

Le sol est profond (>120 cm) et de couleur homogène (noir brunâtre). La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% sauf entre 18 et 25 cm, où elle est comprise entre 15 et 50%. La texture varie entre le type limon (0-25 ; 60-120 cm) et les ensembles argile limoneuse et limon argileux (25-60 cm). Le pH est de 5 dans les 18 premiers centimètres et de 5,5 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AB/Bw/BC/C.

#### 4.2.2.2. Synthèse des observations réalisées

Les sondages réalisés sur cette toposéquence (qui représente le secteur centre-sud, moins escarpé et plus ondulé) montrent des sols d'une profondeur généralement supérieure à 120 cm, et de couleur noire à noir brunâtre. Leur charge en éléments grossiers est généralement inférieure à 15%. La texture varie entre le limon sableux et le sable limoneux depuis l'est jusqu'au centre, et devient plus fine (limon, argile limoneuse ou limon argileux) au pied des montagnes de l'ouest. Les pH sont de 4 à 5 dans les horizons supérieurs et de 5,5 à 6 en profondeur.

A l'est (sondages n° 10 et 12), les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C, et à l'ouest (sondages n° 13 et 14) dans l'ordre Ap/AB/Bw/BC/C. Ce qui laisse supposer un développement un peu plus poussé (horizon Bw) des sols, du côté ouest. L'horizon C des sondages à l'est se distingue d'un horizon Bw par son importante charge en éléments grossiers.

### 4.2.3. Toposéquence 3 : Santa Emilia – El Eden

Elle s'étend sur environ 6,5 kilomètres entre les localités Santa Emilia à El Eden (figure 16, ci-contre). L'altitude y est généralement comprise entre 300 et 400 m. Cette toposéquence illustre le centre-nord de la zone d'étude, où le relief devient plus plat (surtout au centre et à l'est) et l'occupation du sol plus dense. Elle se situe quasi entièrement dans l'unité géomorphopédologique 3 dont elle permet d'illustrer les larges interfluves, entrecoupés par quelques cours d'eau et des routes.

Aux séries de sol déjà présentes à la toposéquence 2, apparaissent en plus, celles de Nindiri (ND), Sabana Grande (SG) et des terrains superficiels (MV). Ce sont des sols alluviaux et profonds pour les séries ND et SG, tandis qu'ils dérivent de roches pyroclastiques et sont peu profonds pour la série MV.

La culture dominante est l'ananas. On y a également observé des bananiers et du maïs (très rarement).

La toposéquence est caractérisée par 6 sondages et par les profils 3 (côté caldeira) et 6 (côté Sierrras).

#### 4.2.3.1. Présentation des sondages

##### 1. Sondage n°15 (Santa Emilia)

Le sondage a été réalisé sur une parcelle d'ananas, de forme bombée. Le profil 3 a été creusé à quelques mètres du lieu de sondage. L'exploitation qui nous accueille est contiguë à la caldeira du volcan Masaya. L'altitude y est de 410 mètres.

Le sol est profond (> 120 cm), noir jusqu'à 35 cm et noir brunâtre plus en profondeur. La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% dans les 25 premiers centimètres et comprise entre 15 et 50% au-delà. La texture est de type limon dans les 25 premiers centimètres, limon sableux entre 25 et 90 cm et sable limoneux au-delà. Le pH est de 4,5 dans les 25 premiers cm, de l'ordre de 5-5,5 entre 25 et 100 cm et de 7 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C.

##### 2. Sondage n°16 (Las Perlas)

La parcelle sondée est plane et occupée par de l'ananas. L'altitude y est de 340 mètres.

Le sol est profond (>120 cm) et de couleur noire. La charge est partout inférieure à 15%. La texture est de type limon sableux jusqu'à 75 cm et sable limoneux au-delà. Le pH est de 5,5 entre 0 et 40 cm, et de 7 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AB/"Bw"/BC/C.

### 3. Sondage n°17 (*Palestina*)

Ce sondage a été réalisé sur une parcelle d'ananas de forme plane. L'altitude y est de 320 mètres.

Le sol est moins profond (95 cm) que dans les sondages précédents. Il est de couleur noire à noir brunâtre. La charge est inférieure à 15% jusqu'à 95 cm et comprise entre 15 et 50% plus en profondeur. La texture est de type limon sableux entre 0 et 55 cm et sable limoneux au-delà. Le pH est de 4,5 dans les 45 premiers centimètres et de 7 au-delà de 85 cm.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/"Bw"/BC/C.

### 4. Sondage n°18 (*La Borgoña*)

Il a été réalisé sur une parcelle d'ananas de forme bombée. L'altitude y est de 330 mètres.

Le sol est très court et noir brunâtre. Un talpetate apparaît dès les 25 cm. La charge est inférieure à 15%. La texture est de type limon dans les 10 premiers centimètres et limon argileux entre 10 et 25 cm. Le pH est de 5 dans les 10 premiers centimètres et de 5,5 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AB/R.

### 5. Sondage n°19 (*El Eden*)

Ce sondage a été effectué sur une parcelle d'ananas de forme plane, à une altitude de 330 mètres.

Le sol est profond (>120 cm) et de couleur noir brunâtre. La charge est inférieure à 15% sauf entre 75 et 110 cm, où elle est comprise entre 15 et 50%. La texture est de type limon dans les 20 premiers centimètres, limon argileux de 20 à 60 cm et limon sableux en profondeur. Le pH est de 4,5 dans les 20 premiers centimètres et de 6 au-delà de 60 cm.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AB/"Bw"/BC/C.

### 6. Sondage n°21 (*El Eden*)

Ce sondage a été effectué à quelques mètres de là où sera creusé le profil 6. La parcelle est occupée par de l'ananas et se trouve au pied des contreforts de l'ouest. Elle présente une pente de 23%. Nous sommes à l'altitude de 380 mètres.

Le sol fait une profondeur d'environ 100 cm (présence d'un talpetate à cette profondeur). Le sol a une couleur homogène (noir brunâtre). La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% dans les 25 premiers centimètres et comprise entre 15 et 50% au-delà. La texture alterne entre le limon sableux et le limon. Le pH est de 5 sauf entre 55 et 80 cm, où il est de 5,5.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/"Bw"/BC/C/R.



#### 4.2.3.2. Synthèse des observations réalisées

Cette toposéquence (qui représente les sols plats du centre-nord) montre des sols profonds à l'est et à l'ouest, et plus courts (sondages n°17 et n°18) dans la partie centrale, où les altitudes sont également les plus faibles (320-330 m). Ils sont de couleur noire à noir brunâtre. Leur charge en éléments grossiers est généralement inférieure à 15% dans les horizons supérieurs et comprise entre 15 et 50% dans les horizons en profondeur. La texture devient plus fine à l'ouest. On passe des types limon sableux et sable limoneux, au limon et limon argileux, en surface. Les pH sont compris entre 4,5 et 5,5 dans les horizons supérieurs. En profondeur, ils atteignent 7 à l'est, et 5,5 à l'ouest.

Les horizons observés se succèdent le plus souvent dans un ordre Ap/AB/"Bw"/BC/C ou R (synonyme de présence d'un talpetate). Cette succession laisse supposer une évolution un peu plus poussée des sols rencontrés sur cette toposéquence, par rapport à ceux rencontrés sur les toposéquences 1 et 2.

#### 4.2.4. Toposéquence 4 : San Pedro – Buenos Aires

Tracée à quelques kilomètres au nord du village de Ticuantepé, cette toposéquence (figure 17, ci-contre) illustre les plaines du nord (unité 4) semi-urbanisées. Elle fait environ 6,5 kilomètres et est délimitée à l'est par le petit village de San Pedro et à l'ouest par celui de Buenos Aires. L'altitude y est rarement supérieure à 300 m (seulement à l'extrémité ouest). Par rapport à la toposéquence 3, seule la série Esquipulas (ES) est nouvelle. Ce sont des sols profonds formés sur alluvions.

L'ananas n'est plus la culture dominante. On y trouve également du maïs, du haricot, de la pitahaya, des légumes et du riz (cas très rare).

Cette toposéquence a été caractérisée par 5 sondages et par les profils 2 (à l'est) et 4 (à l'ouest).

##### 4.2.4.1. Présentation des sondages

#### 1. Sondage n°22 (San Pedro 3)

Ce sondage a été effectué sur la parcelle de maïs où le profil 2 sera creusé. Elle est plane et l'altitude y est de 285 mètres.

La progression de la tarière a été arrêtée aux alentours des 70 cm par un talpetate. Le sol est noir brunâtre jusqu'à 40 cm et brun à brun sombre plus en profondeur. La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% dans les 20 premiers cm et comprise entre 15 et 50% au-delà. La texture est de type limon dans les 20 premiers centimètres et au-delà de 70 cm, et de type limon sableux entre 20 et 70 cm. Le pH est de 4,5 dans les 20 premiers centimètres et de 5 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C/R.

## 2. Sondage n°23 (*San Pedro 2*)

La parcelle sondée est plane et occupée par de la pitahaya. L'altitude y est de 275 mètres.

Le sol est profond de 95 cm. Un talpetate apparaît à cette profondeur. La couleur du sol est noir brunâtre dans les 30 premiers centimètres et brune au-delà. La charge est inférieure à 15% jusqu'à 80 cm et comprise entre 15 et 50% en profondeur. La texture est exclusivement limoneuse. Le pH est de 4,5 dans le premier horizon et de 5 au-delà mais descend à 4 entre 80 et 95 cm.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C.

## 3. Sondage n°26 (*Buenos Aires*)

Le sondage a été réalisé sur une parcelle à pente douce (9%), occupée par des bananiers et des haricots. L'altitude y est de 250 mètres.

Le sol est profond (>120 cm), noir foncé jusqu'à 45 cm et noir brunâtre au-delà. La charge en éléments grossiers est partout inférieure à 15%. La texture est de type limoneuse entre 0 et 45 cm et de type limon sableux au-delà. Le pH est de 5 dans les 35 premiers centimètres et de 6 en profondeur.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C.

## 4. Sondage n°25 (*Buenos Aires*)

Ce sondage a été réalisé sur la parcelle où sera creusé le profil 4. Elle a une forme bombée et est occupée par de l'ananas. L'altitude y est de 280 mètres.

Le sol est profond (>120 cm) et de couleur exclusivement noir brunâtre. La charge est absente dans les 30 premiers centimètres et comprise entre 15 et 50% au-delà. La texture est de type limon argileux jusqu'à 30 cm, limoneux entre 30 et 80 cm et limon sableux en profondeur. Le pH est de 6 entre 0 et 30 cm et de 5,5 au-delà.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/AC/C.

## 5. Sondage n°24 (*Buenos Aires*)

Ce sondage a été effectué sur une parcelle plane d'ananas, située au pied de la montagne *Santa Juana*. L'altitude y est de 330 mètres.

Le sol est profond, noir dans les 35 premiers cm et noir brunâtre au-delà. La charge en éléments grossiers est inférieure à 15% dans les 35 premiers cm et au-delà des 90 cm. La texture est de type limon argileux jusqu'à 35 cm et au-delà de 115 cm. Entre ces deux horizons, elle alterne entre le limon sableux et le sable limoneux. Le pH est de 4,5 entre 0 et 35 cm et de 5 en profondeur.

Les horizons observés se succèdent dans un ordre Ap/C/2AB/"2Bw".

#### 4.2.4.2. Synthèse des observations réalisées sur la toposéquence 4

Les sondages réalisés sur cette toposéquence (qui représente le glacis du nord) montrent un sol peu à moyennement profond à l'est (<100 cm) par rapport à l'ouest (> 120 cm). La couleur du sol varie entre le noir et le noir brunâtre. La charge en éléments grossiers est généralement inférieure à 15% dans les horizons supérieurs et comprise entre 15 et 50% en profondeur. Par rapport aux trois autres toposéquences, la texture est devenue plus fine. Elle est partout de type limon ou limon argileux, dans les horizons supérieurs, et généralement limon sableux ou sable limoneux en profondeur. Les pH sont compris entre 4,5 et 6.

Les horizons observés se succèdent le plus souvent dans un ordre Ap/AC/C sauf à l'extrême ouest où l'ordre de succession (Ap/C/2AB/Bw) laisse supposer l'existence d'un paléosol enterré par une succession de dépôts volcaniques ultérieurs.

### 4.3. Conclusion

Les sols sont dans l'ensemble profonds, avec néanmoins une apparition plus ou moins fréquente du talpetate dans le nord (toposéquences 3 et 4), à une profondeur souvent inférieure à 100 cm. Ils sont généralement de couleur noire (surtout en surface) à noir brunâtre. La charge en éléments grossiers est le plus souvent inférieure à 15% dans les horizons supérieurs, et comprise entre 15 et 50% en profondeur. Les textures sont le plus souvent de type limon sableux et sable limoneux, mais s'affinent (limon et limon argileux) à l'ouest et dans le nord. Les pH varient entre 4,0 et 5,5 dans les horizons supérieurs et peuvent atteindre 7 en profondeur.

Les critères de texture et de charge en éléments grossiers permettent de regrouper les toposéquences deux à deux : d'une part les toposéquences 1 et 2, qui représentent le sud, au relief très marqué, et d'autre part les toposéquences 3 et 4, représentant les plaines du nord. Nous constatons que la charge en éléments grossiers est généralement inférieure à 15% sur les toposéquences du sud, tandis que sur celles du nord, elle augmente avec la profondeur (< à 15% dans les horizons supérieurs, mais généralement comprise entre 15 et 50% dans les horizons inférieurs).

Dans l'ensemble, nos observations concordent avec celles données par la légende (voir chapitre 3, point 3.4) de la carte des sols du Ministère de l'agriculture du Nicaragua, sauf pour les textures. Selon cette légende, la texture est essentiellement de type limon sableux à sable limoneux (texture *franco arenoso*) alors que nous observons un affinement (limon et limon argileux) de celle-ci au nord et à l'ouest.

D'un point de vue pédogénétique, nous avons affaire à des sols jeunes, qui semblent néanmoins être un peu plus évolués à l'ouest et au nord. Ils sont dans l'ensemble formés sur cendres volcaniques et scories. Dans le sud, l'ordre de succession des horizons observés nous laisse supposer une superposition de sols courts. Les sols du centre-nord et nord se sont formés à partir d'alluvions et colluvions provenant du sud, et montrent souvent un talpetate dans leur premier mètre.

Les sondages montrent une variabilité pédologique latérale (sur une même toposéquence) peu marquée ; à part sur la toposéquence 2, où on observe une différence entre l'est et l'ouest, dans les types d'horizons observés. A l'ouest, apparaît notamment un horizon Bw (horizon d'altération).

Sur la base de la campagne de sondage, des sites ont été sélectionnés afin d'y creuser des fosses pédologiques, qui permettent des observations de volumes de sols non perturbés. Cette nouvelle phase de l'étude fait l'objet du chapitre suivant.

## CHAPITRE 5

### CARACTERISATION DES PROFILS

---

#### 5.1. Introduction

Sur base des observations réalisées lors des sondages, six fosses pédologiques ont été creusées et décrites en détail à l'aide du manuel de description des sols établi par l'Unité de Géopédologie de la FUSAGx (Delecour et Kindermans, 1980).

Les numéros attribués aux profils correspondent à leur ordre de description. Ceux des échantillons renseignent à la fois sur le profil et l'horizon dont ils sont issus. Les noms attribués aux horizons des profils reflètent leurs caractéristiques morphologiques observées sur le terrain. Ils ont été parfois corrigés, en se basant sur les analyses effectuées au laboratoire.

Le profil 1 représente le secteur sud (unités 1 et 2), le profil 5 se trouve à la limite entre les secteurs sud et centre (unité 3), les profils 3 et 6 représentent le secteur centre et les profils 2 et 4 le secteur nord (unité 4). Dans les secteurs centre et nord, un profil représente le côté est ou caldeira (respectivement les profils 3 et 2) et un le côté ouest ou sierras (profils 6 et 4).

Nous regroupons les unités 1 et 2, parce qu'aucun profil n'a été réalisé dans l'unité 1. Ceci parce que lors de nos prospections de terrain, ces deux unités ont été involontairement associées. Grâce aux photographies aériennes reçues par la suite, nous avons pu les différencier.

Une fiche de caractérisation (planche) est réalisée pour chaque fosse. Elle reprend la localisation du profil, la présentation de son environnement, sa description détaillée, sa photo et celle de son contexte environnemental. Au verso, sont présentés les résultats analytiques des horizons prélevés.

En tout, 37 échantillons de sols ont été prétraités (séchage, émottage et broyage) et analysés au Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx. Le choix des analyses à effectuer a été fonction du contexte et des objectifs poursuivis. Le tableau 3 (ci-contre) reprend de manière synthétique pour chaque paramètre analytique déterminé, les différentes méthodes utilisées, un bref résumé du mode opératoire, les échantillons concernés, ainsi que les calculs consécutifs à l'analyse, pour les paramètres qui en nécessitent. Les modes opératoires sont ceux en vigueur à l'unité de géopédologie.

Après avoir présenté les analyses de laboratoire, nous nous attacherons à la caractérisation des profils.

#### 5.2. Présentation des analyses de laboratoire

(D'après Hanotiaux, 1985 ; Duchaufour, 1997 et 2000 ; Baize, 2000 ; Capoen, 2001)

## 5.2.1. Les analyses physiques

### 5.2.1.1. L'humidité résiduelle

C'est la perte de poids après séchage à 105°C exprimée en % par rapport à la terre fine séchée à l'air.

L'humidité résiduelle entre non seulement dans le calcul des différentes fractions granulométriques (selon la méthode de l'hydromètre), mais aussi elle permet d'exprimer la CEC, les bases échangeables et les concentrations de plusieurs éléments, notamment les éléments totaux, par rapport à la matière sèche (en % de MS ou en ppm de MS).

En général, l'humidité résiduelle est directement proportionnelle aux taux d'argiles et de matières organiques, mais dépend des conditions de séchage également.

### 5.2.1.2 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique (ou analyse texturale) a pour but de déterminer les proportions relatives des particules minérales de la terre fine (< 2 mm), classées selon leurs dimensions. Ces particules sont souvent sous forme d'agrégats dans le sol, et les diverses étapes de l'analyse granulométrique (prétraitements) permettent de les individualiser et à les définir selon un système de référence en neuf classes :

- la fraction *argileuse* comprend toutes les particules de taille inférieure à 2  $\mu$ ,
- les *limons fins* sont définis comme ayant une dimension comprise entre 2 et 10  $\mu$ ,
- les *limons moyens* entre 10 et 20  $\mu$ ,
- les *limons grossiers* entre 20 et 50  $\mu$ ,
- les *sables très fins* entre 50 et 100  $\mu$ ,
- les *sables fins* entre 100 et 200  $\mu$ ,
- les *sables moyens* entre 200 et 500  $\mu$ ,
- les *sables grossiers* entre 500 et 1000  $\mu$ , et
- les *sables très grossiers* entre 1000 et 2000  $\mu$ .

La texture du sol est obtenue par le report dans un diagramme triangulaire de référence des trois valeurs correspondant aux teneurs en argile, limons totaux et sables totaux.

## 1. Problèmes rencontrés et solutions préconisées

Il est bien connu que dans les Andosols, l'association entre les constituants minéraux non cristallins à surface spécifique élevée (allophanes, gels hydroxydes, etc.) et l'humus est à l'origine d'agrégats très stables à faible aptitude à la dispersion, limitant la qualité de la caractérisation granulométrique (Shoji et al.; 1993). La formation de ces agrégats est accentuée par le séchage des échantillons qui favorise les enrobages d'amorphes autour des particules minérales. Par ailleurs, Colmet-Daage et al. (1970) ont constaté que les sables magnétiques, abondant dans les Andosols, peuvent gêner une bonne dispersion des colloïdes. Ceci s'explique par le fait que la fraction inférieure à 2  $\mu$  contient de fines particules d'hydroxydes de fer magnétiques enrobant les sables.

Dans cette étude, nous avons surtout rencontré des difficultés avec certains échantillons du profil 1 (P1H1, P1H2, P1H3, P1H4), contenant des allophanes.

Lors du prétraitement classique, à l'ajout de HCl 0,2 N pour la dispersion des particules minérales, les échantillons floculent normalement. Par contre, après ébullition pendant 15 minutes et refroidissement, ils peptisent, ce qui empêche tout lavage pour l'élimination de l'acide. Lorsque, par curiosité, nous leurs avons ajouté le peptisant, les échantillons (P1H1 et P1H2) contenant plus d'allophanes, ont floculé tandis que les autres n'ont pas montré de caractères particuliers.

Comme le rappelle Quantin (1972), la dispersion des substances amorphes est très difficile. En effet, les allophanes ont la propriété de se comporter comme des colloïdes à la fois électro-négatifs et électro-positifs. Ceci explique qu'en fonction de la composition de leurs substances colloïdales, certains Andosols se dispersent en milieu acide, voire très acide (pH 3) (Ahmad et Prashad, 1970 cités par Quantin, 1972) tandis que d'autres le font en milieu alcalin. Ces colloïdes forment des enrobages autour des minéraux primaires, ce qui leur donne une taille plus grande (pseudo-limons ou pseudo-sables), dont la conséquence est de sous-estimer la fraction argileuse (0 –2  $\mu$ ) et surestimer les fractions limoneuses et sableuses.

Certains auteurs préconisent l'utilisation des ultrasons pour briser les enrobages formés par les gels d'hydroxydes ou d'allophanes. Selon Arimura (1967 cité par Quantin, 1972), les ultrasons peuvent réduire à une taille inférieure à 2 $\mu$ , des minéraux déjà fissurés par altération, et que ce risque est faible en limitant au minimum le temps d'exposition aux ultrasons. D'autres comme Mehra et Jackson (1960) recommandent le DCB pour la destruction des oxydes de fer et donc des liens que ceux-ci formeraient avec d'autres substances. Henao-Toro (2002) a utilisé la méthode combinée ultrasons et résines sodiques sur des Andosols de Colombie.

## 2. Méthode utilisée et stratégie de travail

La méthode utilisée est celle de l'hydromètre à chaîne, basée sur la loi de Stokes. Un prétraitement à l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vise à détruire la matière organique pour permettre une bonne dispersion des particules. L'HCl déplace les cations polyvalents qui exercent une action floculante sur les cations alcalins. Le peptisant hexaméthaphosphate de sodium permet une bonne dispersion des argiles.

Les mesures sont ensuite effectuées à l'hydromètre à chaîne pour déterminer les fractions argileuse et limoneuse. Les sables sont déterminés par tamisage.

Les résultats obtenus sont pondérés par la teneur en matière organique, carbonates et l'humidité résiduelle.

Cependant, vu les problèmes (largement décrits ci-dessus) posés par les Andosols lors de l'analyse granulométrique, il fallait adopter une stratégie de travail et recourir à des méthodes de prétraitements.

C'est ainsi que 5 échantillons-test (P1H2, P3H4 P4H8, P5H2 et P6H6) ont été choisis en fonction de leur richesse en allophanes et prétraités de trois manières différentes. Par la méthode classique (à l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et à l'HCl uniquement) pour voir si réellement ils allaient poser problème, aux ultrasons, et au DCB (Dithionate-Citrate-Bicarbonat). Parmi ceux-ci, un échantillon (P3H4) ne contenait pas d'allophanes (selon le test de Fieldes et Perrot) et servait

donc de témoin pour vérifier l'efficacité des prétraitements puisque l'on pouvait supposer que les résultats seraient identiques, dans le cas de cet échantillon, pour les trois prétraitements.

### 3. Comparaison des trois prétraitements

La comparaison des résultats obtenus par les trois prétraitements sur nos échantillons-test montrent la mauvaise performance du prétraitement classique ( $H_2O_2$ , HCl, hexamétaphosphate de sodium) sur nos Andosols. Les teneurs en argile obtenues par la méthode à l'hydromètre à chaîne, après prétraitement classique, sont largement inférieures à celles obtenues par la même méthode, mais avec les deux autres prétraitements (DCB et ultrasons). En parallèle, les pourcentages en sable les plus élevés sont obtenus par le prétraitement classique. Ce qui pourrait correspondre à une surestimation des sables (pseudo-sables) comme conséquence de la dispersion incomplète.

La similitude des résultats obtenus par les trois prétraitements (classique, aux ultrasons et au DCB) pour l'échantillon P3H4, ne montrant pas d'allophanes d'après le test de Fieldes, permet de constater (même s'il est hâtif de tirer des conclusions à partir de 5 échantillons) que les ultrasons et le DCB n'apportent pas d'artéfacts sur les mesures.

De fait, les pourcentages de limons obtenus pour le prétraitement aux ultrasons, quasiment toujours supérieurs à ceux du prétraitement au DCB, pour le même échantillon, pourraient être le signe d'une destruction des sables par les ultrasons. Plutôt que de chercher à hypothétique temps idéal d'exposition aux ultrasons, nous avons finalement opté pour le prétraitement aux DCB, pour tous nos échantillons à problèmes.

## **5.2.2. Les analyses physico-chimiques et chimiques**

### ***5.2.2.1. Le pH eau (pH d'une suspension de sol dans l'eau)***

Le pH eau représente l'acidité actuelle du sol. Il rend compte de l'activité des ions  $H_3O^+$  dans le liquide surnageant.

La valeur du pH fournit des renseignements sur le milieu physico-chimique. Par exemple, en dessous de pH eau = 5, on se trouve dans un milieu physico-chimique dominé par l'aluminium et/ou par une acidité d'origine organique (Baize, 2000). Le pH eau permet également de décider de la suite des analyses à réaliser.

### ***5.2.2.2. Le pH KCl (pH d'une suspension de sol dans du KCl 1 N)***

Le pH KCl définit l'acidité potentielle du sol. Les ions  $K^+$  s'échangent avec les ions  $H^+$  qui n'étaient pas dissociés en suspension aqueuse (retenus énergiquement par des molécules organiques ou par des minéraux argileux). La différence entre pH eau et pH KCl ( $\Delta pH$ ) donne une idée de l'acidité potentielle. Le pH KCl est en outre un paramètre plus stable dans le temps que le pH eau.

### ***5.2.2.3. Le carbone organique total (COT)***

La teneur en carbone organique total (C en %) (carbone des carbonates exclus) permet d'estimer celle de la matière organique, grâce à un facteur multiplicateur fonction de la



méthode de dosage utilisée et de la nature de l'horizon. Avec la méthode Springer-Klee, ce facteur est de 1,72 pour les horizons labourés, et 2 pour les horizons de surface forestiers. Selon Baize (2000), aucun facteur n'est parfaitement adapté à toutes les matières organiques car il varie avec le degré d'humification. En conséquence, il vaudrait mieux raisonner sur le carbone (que l'on dose vraiment) plutôt que sur la matière organique que l'on estime de façon approximative.

Il est intéressant de connaître le taux de carbone organique total d'un sol étant donné les rôles multiples que joue l'humus dans le sol : rôle positif sur la stabilité structurale des horizons de surface, la capacité d'échange cationique, l'adsorption des éléments traces métalliques, des pesticides... En outre, le pourcentage en carbone organique total entre dans le calcul du pourcentage des différentes fractions granulométriques.

#### **5.2.2.4. L'azote total**

C'est l'ensemble de toutes les formes d'azote minéral et organique présentes dans un échantillon de sol, excepté l'azote gazeux (essentiellement représenté par le  $N_2$  de l'air). L'azote est principalement sous forme organique dans le sol et doit être minéralisé pour être assimilable par les plantes. Cette minéralisation est liée au pH du sol.

La détermination des quantités d'azote a été effectuée seulement pour les échantillons dont les pourcentages en carbone (C) sont supérieurs ou égaux à 0,8 %. En effet, en dessous de 0,8 %, les pourcentages d'azote obtenus ne peuvent être que très faibles.

La teneur en azote, outre son importance dans l'évaluation globale de la fertilité (c'est l'un des éléments essentiels pour la plante), intervient dans le calcul du rapport C/N qui donne des indications sur la qualité de la matière organique et sa faculté de se minéraliser plus ou moins rapidement. Selon Baize (2000), en sols agricoles, les rapports C/N des horizons de surface labourés sont de l'ordre de 9 quand l'humification est bonne. Sous culture un rapport C/N égal ou supérieur à 12 indique que la minéralisation rencontre des difficultés (conditions d'anaérobiose, acidité excessive).

#### **5.2.2.5. Le phosphore disponible**

C'est le phosphore susceptible d'être absorbé par les racines. On y trouve différentes formes d'anions ( $PO_4^{3-}$ ,  $PO_4H^{2-}$ ,  $PO_4H_2^-$ ) : les uns dissous dans la solution du sol, d'autres plus ou moins fortement adsorbés sur les surfaces externes des minéraux argileux, mais aussi sur les surfaces sorbantes des oxy-hydroxydes de fer et/ou aluminium.

Le phosphore est l'un des éléments majeurs absolument indispensables aux végétaux car il entre dans la constitution de nombreux composés organiques, notamment les acides nucléiques et l'ATP. En outre, son rôle dans la photosynthèse est fondamental, ce processus ne pouvant intervenir sans sa participation.

Concernant les Andosols, de nombreux auteurs ont constaté la très forte rétention du phosphore par ces sols, surtout par ceux plus riches en alumine. D'où l'importance de la détermination du phosphore disponible, pour ces sols.

### 5.2.2.6. La capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC ou capacité d'échange cationique représente la quantité totale de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant, à un pH donné. En d'autres termes, elle correspond à la capacité du sol à stocker et à maintenir les éléments nutritifs sous une forme échangeable. Elle donne une idée sur l'acidité d'échange si on connaît la somme des bases (CEC – somme des bases). Dans ce cas on parle d'acidité d'échange calculée.

Le complexe adsorbant du sol est constitué de colloïdes minéraux et organiques et de complexes organo-minéraux. Ce sont les colloïdes négatifs qui présentent une capacité d'échange cationique. Ils comprennent les argiles minéralogiques, la silice, les colloïdes humiques en général et des complexes organo-minéraux. Les colloïdes positifs, principalement des sesquioxides, ont une capacité d'échange anionique qui peut masquer une partie de la CEC.

L'origine des charges négatives des argiles tient dans la particularité de leur composition cristallographique. Les substitutions isomorphiques (certains cations des couches tétraédriques ou octaédriques de l'argile sont remplacés par des cations de valence inférieure) provoquent l'apparition d'un déficit de charges positives ou un excès de charges négatives. Celles-ci constituent les charges permanentes de la CEC.

A côté des charges permanentes, il existe des charges dépendantes (ou variables) liées à la valeur du pH du milieu. Elles trouvent leur origine dans l'ionisation des groupements hydroxyles de surface et des faces de rupture des argiles.

Les colloïdes organiques quant à eux, ne possèdent que des charges dépendantes du pH résultant de la dissociation des  $H^+$  des groupes carboxyliques et phénoliques

La CEC a été mesurée par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7 et non au pH du sol (ou CEC effective). La CEC, lorsqu'elle est mesurée à pH 7, est surestimée si le pH de l'échantillon de sol sur lequel elle est déterminée est inférieur à 7. Comme on l'a vu au chapitre 3, la CEC des Andosols est fortement dépendante du pH de la solution d'extraction surtout à cause du caractère amphotère des allophanes. Sur des sols à allophanes fortement hydratés du Nicaragua, Colmet-Daage et al (1970a) ont observé une augmentation de la CEC de 15 à 20 % lorsqu'on passe de pH 7 à pH 9 pour l'acétate d'ammonium.

Notre choix se justifie par les ordres de grandeur obtenues pour nos pH (généralement de l'ordre de 7).

Les échantillons analysés ont été choisis en fonction des critères de description des horizons (morphologie et épaisseur des horizons) et des paramètres analytiques pouvant influencer la CEC (% d'argiles et de matières organiques, présence ou non d'allophanes et pH). Pour chaque profil, les horizons de surface (en général riches en matière organique et en argile), un à deux horizons de mi-profondeur et au minimum un horizon de profondeur (le plus riche en argile et/ou contenant des allophanes) ont été sélectionnés. Les horizons intermédiaires n'ont pas été choisis.

Pour savoir dans quelle mesure la CEC est influencée par d'autres substances que les argiles (matière organique, allophanes,...) et pour éventuellement détecter la présence de types d'argiles différents, la CEC a été mesurée sur la fraction argileuse de 4 échantillons représentant les 6 profils, choisis en fonction de leur contenu en argile et de leur CEC totale

rapportée à 100g d'argile (CEC\*100/%A). Ce rapport permet d'avoir une idée sur le type d'argile. Il était différent pour les échantillons choisis. Il s'est avéré que les échantillons P5H1 et P5H6 sont assez représentatifs des profils P1, P5 et P3 (se trouvant dans le secteur sud), tandis que les échantillons P4H1 et P4H5 le sont assez bien pour les profils P6, P2 et P4 (situé dans le secteur nord).

#### **5.2.2.7. Bases échangeables et taux de saturation en bases**

Comme la CEC, les bases échangeables ont été déterminées à pH 7 et sur les mêmes échantillons. Cette analyse donne une évaluation, à un moment donné, des réserves du sol en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  sorbés sur le complexe d'échange (argilo-humique) et facilement disponibles pour les plantes.

Le taux de saturation en bases (V en %) est défini par le rapport entre la somme des bases échangeables (S en méq/100 g) et la capacité d'échange cationique (T en méq/100 g). Il fournit une indication précieuse quant à la fertilité potentielle des sols. Il traduit la disponibilité des cations sorbés sur le complexe. En effet, plus il est élevé, plus la disponibilité des cations vis-à-vis des plantes est élevée.

Quant à l'acidité d'échange, elle a été calculée par différence entre la CEC et la somme des bases échangeables. Celle-ci n'a pas été déterminée analytiquement puisque les pH que nous avons obtenus (compris entre 5,4 et 7,9) pour nos sols ne justifient pas la réalisation de cette analyse. En effet, l'acidité d'échange est la résultante des deux ions  $\text{H}^+$  et  $\text{Al}^{+++}$ , et concerne donc surtout les sols acides (pH < 5).

#### **5.2.2.8. Le phosphore total**

Le phosphore total (ensemble de toutes les formes de phosphore présentes dans un échantillon de sol, qu'elles soient minérales ou organiques) a été déterminé par attaque à l' $\text{HClO}_4$  sur la terre fine (fraction 0-2 mm).

#### **5.2.2.9. Les éléments totaux**

Le dosage des éléments totaux permet non seulement de connaître la part de l'élément échangeable par rapport à la quantité totale présente, mais aussi de confronter les horizons au sein d'un même profil et les profils entre eux. Elle permet donc d'estimer la fertilité potentielle des sols, à long terme, et de suivre une différenciation pédologique au sein d'un solum (au niveau du profil) ou à l'échelle d'une parcelle ou d'une région. En outre, on peut grâce à cette analyse identifier le matériau parental (nature des dépôts), en suivre les processus d'altération et en distinguer les origines.

Les éléments majeurs (Ca, Mg, K, Na, Fe et Al) et certains éléments traces métalliques (éléments chimiques naturels dont la concentration moyenne dans la croûte terrestre est, pour chacun d'eux, inférieur à 0,1 pour mille) ont été déterminés par la méthode triacide (HF,  $\text{HClO}_4$  et HCl) sur la terre fine broyée à 200 microns. Les éléments traces dosés sont le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn). Ils sont considérés comme des oligo-éléments indispensables à la vie des plantes.

#### **5.2.2.10. Le test de Fieldes et Perrot**

Ce test a pour but de détecter la présence d'allophanes. Il est basé sur le fait que en présence du fluorure de sodium (NaF), les allophanes libèrent des ions  $\text{OH}^-$ , ce qui entraîne l'augmentation du pH et la formation simultanée de fluoro-aluminates.

Le test peut-être mené au terrain ou au laboratoire. Le test de terrain, plus simple et plus rapide, consiste à placer une pincée de terre sur un papier filtre préalablement imbibé de phénolphthaléine, et à y ajouter quelques gouttes de NaF 1M. En quelques secondes à 2 minutes, la libération des  $\text{OH}^-$  se manifeste par le changement de couleur du papier filtre, qui devient violet (virage de la phénolphthaléine au violet).

Le tableau 4 reprend une échelle d'appréciation à dix niveaux, fonction du temps et de l'intensité de coloration du papier filtre.

**Tableau 4** : Echelle montrant la richesse en allophanes.

Couleur observée	Apparition de la coloration après:		
	20''	1'	2'
Rose foncé(violet)	9	8	7
Rose	6	5	4
Rose clair	3	2	1
Incolore	0		

Comme le recommande Quantin (1972), ce test est à interpréter avec réserve. En effet, certains hydroxydes d'alumines amorphes et même parfois certaines argiles peuvent y réagir. Par ailleurs, l'abondance de matière organique, fréquente dans les Andosols, peut masquer la réaction (complexes organo-allophaniques).

#### 5.2.2.11. La rétention des phosphates

Cette analyse permet de connaître la capacité qu'a un échantillon de sol à fixer les phosphates. La méthode consiste à ajouter une quantité connue de P (1000ppm de P) en solution (phosphate de potassium  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) à un échantillon de sol (rapport terre solution de 5/100) et d'agiter pendant 16 heures à un pH de 4,6. Il est important de contrôler le pH car il affecte les capacités de sorption du P dans le cas des sols à charges variables (notamment les Andosols). La quantité de phosphore retenue par le sol est déterminée par différence entre la quantité initiale de P ajoutée à l'échantillon et la quantité de P restante dans le surnageant obtenu par centrifugation. Les résultats sont exprimés en pourcentage (proportion du P retenu par le sol).

#### 5.2.2.12. Les extractions sélectives du fer et de l'aluminium

Cette analyse a été effectuée dans le but de répondre à l'un des critères de classification des Andosols (voir chapitre 3, point 3.3.).

- *Extraction au pyrophosphate de Na 0,1 M à pH 10* : l'échantillon est agité dans l'extractif (le pyrophosphate de Na) pendant 16 heures. Fe et Al sont dosés dans l'extrait (soit  $\text{Fe}_p$  et  $\text{Al}_p$ ). Cet extractif déplace surtout le fer et l'aluminium liés à la matière organique

(Fiantis, 2000). Comme le rapporte Bock (1984 cité par Capoen, 2001) il s'agit du réactif spécifique de la matière organique. Cependant, il peut solubiliser des complexes organo-métalliques, certains hydroxydes amorphes voire une partie des aluminosilicates de type allophanes (Bonneau et Souchier, 1979, Poulénard, 2000, Jeanroy, 1983 cités par Capoen, 2000).

- *Extraction à l'oxalate acide (oxalate d'ammonium 0,2 M et acide oxalique 0,2 M) à pH 3* : l'échantillon est agité dans l'oxalate acide pendant 4 heures à l'obscurité. Ensuite, Fe et Al sont dosés dans l'extrait (soit  $Fe_o$  et  $Al_o$ ). Pour Fiantis (2000), cet extractif solubilise les allophanes, le fer, les oxydes d'aluminium amorphes, l'aluminium et le silicium liés à la matière organique. Pour Jeanroy (1983 cité par Capoen, 2001), seule une partie ou la totalité du fer des complexes organo-minéraux et des oxyhydroxydes amorphes (ferrihydrite) serait extraite. Quant à l'aluminium, celui des complexes organo-minéraux, des oxyhydroxydes amorphes et des allophanes serait solubilisé (tout comme le silicium des allophanes).

Il importe donc de rester vigilant dans l'interprétation des résultats de ces analyses au-delà des seuls critères de classification.

Le rapport  $Al_p/Al_o$  est utilisé pour catégoriser les Andosols en allophaniques ( $pH > 5$ ,  $Al_p/Al_o < 0,5$ ), et non allophaniques ( $pH < 5$ ,  $Al_p/Al_o > 0,5$ ), dans lesquels se forment les complexes Al-humus au lieu des liaisons Al-Silice (cf. chapitre 3).

Néanmoins, cette catégorisation est une simplification de la réalité, car des horizons allophaniques peuvent théoriquement exister quand le rapport  $Al_p/Al_o$  est supérieur à 0,5, comme l'ont montré récemment Poulénard et Herbillon (2000).

Quant au rapport  $Fe_p/Fe_o$ , il rend compte du degré de complexation du fer non cristallisé avec la matière organique (Poulénard, 2000 ; cité par Capoen, 2001).

Enfin, une valeur  $Al_o + \frac{1}{2} Fe_o$  supérieure à 2% signifie que les propriétés andiques sont bien exprimées.

### 5.3. Caractérisation et interprétation des profils

Le tableau 5 (ci-contre) donne quelques informations sur l'environnement des profils, ainsi que les secteurs et unités dans lesquels ils ont été réalisés.

#### 5.3.1. Profil 1

Cette fosse (planche 1) a été creusée sur une parcelle d'ananas, située sur un interfluve étroit et bombé, avec une pente de 11%. Nous sommes au milieu de la toposéquence 1, au lieu-dit La Francia 1. D'après la carte des sols, nous sommes sur la sous-série Sif VII (sols de la série San Ignacio, *franco* sableux, aux pentes comprises entre 30 et 50%). L'altitude y est de 455 m.

##### 5.3.1.1. Description

Le profil montre un sol profond. Il est noir dans les 34 premiers centimètres (horizons H1, H2 et H3) et noir brunâtre jusqu'à 145 cm de profondeur ; au-delà, il s'agit d'une couche de cendres à l'état brut.

Les pourcentages en éléments grossiers relativement faibles à mi-profondeur (< 10%) par rapport aux autres horizons laissent entrevoir une discontinuité de matériaux, cependant peu marquée lorsqu'on observe le profil. Ce qui pourrait traduire un remaniement au sein même du profil, lié à l'activité biologique, à l'altération, etc..

Les textures, au toucher et par analyse granulométrique, sont plus fines (limon fin) dans les horizons 4 (26-42 cm) et 10 (125-145 cm), par rapport à un ensemble limon sableux et sable limoneux. La structure, polyédrique dans les 24 premiers cm et devenant massive au-delà, pourrait expliquer l'absence de racines en profondeur.

##### 5.3.1.2. Caractérisation analytique

Le sol montre une réaction marquée (valeurs de 6, 8) en allophanes dans les horizons Ap (0-24 cm), relativement peu marquée (2) jusqu'à 76 cm, et nulle en profondeur. Les plus forts pourcentages (3,7 et 4,8%) en humidité résiduelle sont observés dans les horizons Ap. Les pourcentages en argile montrent 3 ordres de grandeurs. Celui des horizons Ap, où les pourcentages sont de 8,6 et 7,5 (respectivement pour Ap1 et Ap2), celui des horizons de mi-profondeur (de 12 à 20%) et le groupe des horizons de profondeur, où le pourcentage est inférieur à 7%. L'horizon H3 semble être le moins altéré puis que c'est lui qui présente la courbe granulométrique la plus concave.

Les pourcentages en éléments totaux majeurs sont généralement plus faibles dans les Ap. Ce qui pourrait indiquer un stade d'altération plus poussé pour ces horizons. Les teneurs en aluminium total restent quasi constantes dans tout le profil, tandis que celles du fer augmentent avec la profondeur. L'aluminium et le fer extraits au pyrophosphate de sodium montrent fort logiquement des pourcentages plus élevés pour les horizons supérieurs.

Le pH H<sub>2</sub>O est de 5,4 dans les 24 premiers centimètres (H1 et H2), aux environs de 6,0 de 24 à 76 cm, et supérieur à 6,5 au-delà. L'acidité d'échange est comprise entre 14,5 et 19,6 méq/100g dans les 24 premiers centimètres, et entre 1,7 et 5,7 méq/100 g jusqu'à 76 cm.

Les pourcentages en matière organique décroissent avec la profondeur. Il sont aux environs de 6% dans les horizons Ap (H1 et H2) et supérieurs ou égaux à 1% jusqu'à 100 centimètres. Le rapport C/N est partout inférieur à 12%. Jusqu'à 42 cm il avoisine 10. Ce qui indique une bonne minéralisation de la matière organique pour cette épaisseur.

Les CEC sont plus élevées (25,4 et 28,7 méq/100g) dans les horizons Ap. Ce qui est à attribuer aux fortes teneurs en allophanes et matière organique. En profondeur, les valeurs sont comprises entre 17,7 et 23,4 méq/100g.

Le taux de saturation en bases augmente en profondeur ; 31,7 à 43,0% jusqu'à 24 cm et plus de 68,0% à partir de 34 cm. Dans les horizons Ap, le complexe d'échange est dominé par l'acidité d'échange, suivie du calcium et du magnésium. Dans les horizons en profondeur, le calcium est l'élément dominant.

Les teneurs en phosphore total sont respectivement de 190 et 160 mg/100g dans les horizons Ap1 et Ap2. Elles sont comprises entre 99 et 110 mg/100g de 24 à 76 cm. Le phosphore disponible est de 6,9 mg/100 g dans l'horizon Ap1, et compris entre 0,6 et 0,0 mg/100g dans les horizons inférieurs. Ces teneurs élevées dans les horizons Ap sont à attribuer à la présence notable de matière organique.

### 5.3.2. Profil 5

Ce profil (planche 2) a été creusé à mi-chemin de la toposéquence 2, au lieu-dit la Borgoña, sur une parcelle plane d'ananas, à une altitude de 378 m. Nous sommes sur la sous-série SIb III (sols appartenant à la série San Ignacio, *franco* sableux, aux pentes comprises entre 1,5 et 4%).

#### 5.3.2.1. Description

Le profil montre un sol profond, noir brunâtre jusqu'à 51 cm et brun sombre à brun olive au-delà. Les limites entre les horizons sont bien définies.

Le pourcentage en éléments grossiers est inférieur à 10% dans tous les horizons. Au toucher, la texture est de type limon jusqu'à 83 cm et devient limon sableux au-delà. La structure est grenue dans les 51 premiers centimètres et polyédrique dans le reste du profil. Le profil est poreux et présente des racines sur toute son épaisseur. L'activité biologique est présente jusqu'à 83 cm.

### 5.3.2.2. Caractérisation analytique

Le profil montre une présence peu marquée en allophanes entre 21 et 51 cm. Les pourcentages en humidité résiduelle les plus élevés (7 et 4%) sont observés dans les horizons Ap.

Les pourcentages en argile apparaissent nettement plus élevés dans les Ap (entre 11,1 et 13,4%) qu'en profondeur (< 5%). La texture est de type limon sableux sur tout le profil. Les courbes granulométriques montrent deux ensembles. Celui constitué par les deux horizons de surface, plus riches en argile et l'ensemble formé par les horizons de profondeur, plus limoneux et sableux. Elles montrent que l'altération est un peu plus poussée dans les Ap.

Les pourcentages en éléments totaux majeurs, moins élevés dans les Ap (entre 0 et 51 cm), viennent confirmer l'hypothèse de l'altération plus poussée en surface. Les pourcentages en aluminium et fer extraits au pyrophosphate de sodium sont logiquement plus élevés dans les Ap. Ceux de l'Al extrait à l'oxalate diminuent avec la profondeur tandis que ceux du fer extrait à l'oxalate augmentent.

Le pH H<sub>2</sub>O est de 6,2 dans les 20 premiers centimètres (Ap1) et aux environs de 7 au-delà. L'acidité d'échange est de 8,6 méq/100g jusqu'à 20 cm et nulle en profondeur.

Les pourcentages en matière organique sont logiquement plus élevés en surface (entre 3 et 4%) qu'en profondeur (< à 1%). Le rapport C/N est de 11 dans le Ap1 et de 15 dans le Ap2. Ce rapport relativement élevé (dans le Ap2) peut-être dû à l'abondance de débris organiques (racines, tiges, etc.) dans l'échantillon provenant de cet horizon et pas nécessairement à un ralentissement de la minéralisation de la matière organique.

Les CEC les plus élevées (25,7 et 26,0 méq/100g) sont observés dans les horizons Ap, en raison de la présence de matière organique. Elle sont comprises entre 12,7 et 20,3 méq/100g en profondeur (l'horizon H4 pour lequel la CEC n'a pas été mesurée est à rattacher avec les horizons de profondeur).

Le taux de saturation en bases est de 66,6% en surface et de plus de 100% en profondeur. Le complexe d'échange apparaît dominé par le calcium.

Les teneurs en phosphore total sont logiquement plus importantes dans les horizons Ap (entre 117 et 156 mg/100g). On obtient une quantité de 66 mg/100g entre 73 et 99 cm. Le phosphore disponible, déterminé que pour les horizons Ap1 et Ap2, montre des valeurs respectives de 2 et 4 mg/100g.



### 5.3.3. Profil 3

L'exploitation qui nous accueille est située au bord de la Caldeira. L'altitude y est de 410 m. Le profil (planche 3) a été creusé sur une parcelle d'ananas bombée. Il est sur la sous-série RV III (sols formés sur coulées de lave) et représente le secteur est (caldeira) de la toposéquence 3.

#### 5.3.3.1. Description

Le sol est profond et repose sur des cendres noires. Il est brun sombre jusqu'à 75 cm et brun olive au-delà. Les limites entre les horizons sont peu nettes (floues) et irrégulières, sauf pour les trois derniers horizons, où elles sont bien définies.

Le pourcentage en éléments grossiers est compris entre 6 et 11% jusqu'à 106 cm et supérieur à 20% au-delà. La texture, au toucher, est de type limon sableux jusqu'à 126 cm et sable limoneux au-delà. La structure alterne entre le grenu (horizon H1) et le polyédrique (pour les autres horizons). La compacité du sol augmente jusqu'à 133 cm, puis diminue avec la profondeur. Malgré cette observation, le profil semble être poreux sur toute son épaisseur. On note la présence de racines jusque dans le dernier horizon. Une forte activité biologique (Krotovinas) est observée jusqu'à 106 cm.

#### 5.3.3.2. Caractérisation analytique

Le profil ne montre pas de réaction positive au test de détection des allophanes. L'humidité résiduelle des horizons n'atteint pas les 5%. Les pourcentages d'argile les plus élevés (10,4 et 11,3%) sont observés dans les horizons Ap. Ils sont inférieurs ou égaux à 5,3% au-delà de 62 cm.

Les éléments totaux, le fer et l'aluminium extraits au pyrophosphate et à l'oxalate sont relativement homogènes sur le profil.

Le pH H<sub>2</sub>O est en moyenne de 6,5 dans les 47 premiers centimètres et de 7 au-delà. L'acidité d'échange est de 7,2 méq/100g dans le premier horizon (Ap1), comprise entre 2,5 et 5 méq/100g jusqu'à 106 cm et nulle au-delà.

Le pourcentage en matière organique est de 3% dans les horizons Ap et inférieur à 1% à partir de 62 cm. Le C/N, de 10 en surface, indique une bonne minéralisation de la matière organique.

La CEC est de 25,7 et 27,3 méq/100g respectivement pour les horizons Ap1 et Ap2 (0-47 cm), et comprise entre 16,8 et 24,4 au-delà de 47 cm.

Le taux de saturation en bases est compris entre 71,9 et 90,7% dans les horizons supérieurs (entre 0 et 106 cm) et est supérieur à 100% en profondeur. Le complexe d'échange reste dominé par le calcium, suivi de l'acidité d'échange.

Comme pour les profils précédents, les plus fortes quantités en phosphore total sont observées pour les horizons Ap. La quantité en phosphore disponible décroît fortement lorsqu'on passe du Ap1 au Ap2.

#### 5.3.4. Profil 6

Ce profil (planche 4) est situé à l'extrémité ouest de la toposéquence 3, au pied des falaises. Il a été creusé sur la sous-série S1c III (sols appartenant à la série San Ignacio, aux pentes comprises entre 4 et 8%). L'altitude y est de 370 m et l'occupation de l'ananas.

##### 5.3.4.1. Description

Le profil montre un talpetate entre 30-40 et 77 cm. Les deux horizons Ap sont noir brunâtres, tandis que ceux en dessous du talpetate sont noir rougeâtres. Le talpetate montre deux couleurs différentes (voir photo), correspondant à deux horizons différents (H3 et H4). L'horizon H3 est verdâtre (couleur qui semble être de l'hydromorphie) tandis que le H4 est jaune-rougeâtre. La limite entre le talpetate et les deux horizons de part et d'autre (H2 et H5) est peu nette et laisse entrevoir, soit un mélange lié à l'activité biologique, soit un début d'altération.

Au toucher, la texture est de type limon sableux dans les horizons Ap (0-40 cm) et entre 77 et 123 cm, et limon au-delà. Le talpetate est sableux. Le pourcentage en éléments grossiers est supérieur à 28% dans les horizons Ap et inférieur à 20% dans les horizons en dessous du talpetate. La structure est polyédrique jusqu'à 123 cm et massive au-delà. On observe une bonne porosité générale sauf au niveau du talpetate, qui est très peu poreux. Des racines sont présentes sur tout le profil. Ce dernier montre une importante activité biologique (turricules, coprolithes et galeries de lombrics).

##### 5.3.4.2. Caractérisation analytique

Seul le dernier horizon montre une réaction (peu marquée) positive, mais peu marquée, au test de détection des allophanes. L'humidité résiduelle varie entre 6 et 8% sur tout le profil. Les plus forts pourcentages en argile sont observés en surface (17%) et en profondeur (11 %). Le talpetate montre les teneurs les plus faibles (environ 6%).

Les teneurs en éléments totaux sont relativement homogènes sur le profil. Le fer et l'aluminium extraits au pyrophosphate affichent logiquement les plus fortes valeurs (0,1%) en surface. Celles de l'aluminium extrait à l'oxalate sont homogènes (2,5%) sur tout le profil tandis que celles du fer augmentent en profondeur (on passe de 2% à 5%).

Le pH H<sub>2</sub>O est de 6,5 dans les horizons Ap, et quasi de 7 en profondeur. L'horizon H5 (62-100 cm), dans lequel a été observé des cristaux de calcaires, montre logiquement un pH de 7,9. L'acidité d'échange la plus élevée (30,5 méq/100g) est observée pour l'horizon H5, qui

montre le pH le plus élevé. Elle est de 16,2 méq/100g dans les 10 premiers cm et de 3,4 méq/100g au-delà de 123 cm.

Le pourcentage en matière organique est de 4,6 dans les 10 premiers cm, et inférieur à 2% au-delà.

La CEC est de 47,7 méq/100g dans l'horizon Ap, et varie entre 58,6 et 59,1 méq/100g entre 22 et 100 cm. Elle est de 42,5 méq/100 g au-delà de 123 cm.

Le taux de saturation en bases est compris entre 47,9% (horizon H5) et 98,5% (horizon H4). Il est de 66,1% dans les 10 premiers cm (H1). Le complexe d'échange est dominé par le calcium, sauf pour l'horizon H5 où il est dominé par l'acidité d'échange. On n'observe pas de sursaturation en profondeur.

La plus forte teneur en phosphore total (115,1 mg/100g) est observée en surface alors que le phosphore disponible y est présent à l'état de traces.

### **5.3.5. Profil 2**

Le profil 2 (planche 5) est creusé à l'est de la toposéquence 4 (unité 4), sur la sous série de sol ND2b II (sols de la série Nindiri, aux pentes comprises entre 1,5 et 4%). La parcelle qui l'accueille a une forme plane et cultivée en maïs. L'altitude y est de 290 m.

#### **5.3.5.1. Description**

Le profil montre un sol profond, de couleur noire à brune sombre jusqu'à 65 cm et brun-jaunâtre au-delà. La limite entre les horizons est bien définie.

Le pourcentage en éléments grossiers passe de 10% en surface à 90% en profondeur. La texture, au toucher, est de type limon dans les horizons Ap (de 0 à 27 cm) et limon sableux au-delà.

La structure est particulière sur tout le profil. Il est plus poreux en surface qu'en profondeur. On observe partout des racines. L'activité biologique y est peu développée (quelques racines décomposées en surface, et galeries).

#### **5.3.5.2. Caractérisation analytique**

Le test de détection des allophanes ne révèle pas leur présence. L'humidité relative est comprise entre 6 (en surface) et 10 % (en profondeur). Les pourcentages en argile sont partout supérieurs à 10% sauf dans le dernier horizon (après 135 cm), où on observe à peine 5%.

Les teneurs en éléments totaux, à part celles du zinc (plus élevées en surface), sont homogènes sur le profil. Le fer et l'aluminium extraits au pyrophosphate montrent des teneurs plus élevées en surface, tandis que celles de l'extraction à l'oxalate sont homogènes.

Le pH H<sub>2</sub>O est de 6,5 dans les 27 premiers cm et de 7 au-delà. L'acidité d'échange est comprise entre 8,2 (en surface) et 15,2 méq/100g (entre 27 et 70 cm). Elle est absente au-delà de 99 cm.

Le pourcentage en matière organique est compris entre 1,5 et 4,3% jusqu'à 70 cm, et entre 0,7 et 1,2 au-delà. Le C/N varie entre 10 et 12 dans les horizons Ap. Ce qui est synonyme d'une bonne minéralisation de la matière organique dans ces horizons.

La CEC varie entre 32,5 et 54,0 méq/100g et ne montre pas de corrélation positive avec les pourcentages d'argile et de matière organique. Elle est plus élevée dans les horizons Ap (38,5 - 44,1 méq/100g) et au-delà de 99 cm (54,0 méq/100g).

Le complexe d'échange est dominé par le calcium sauf dans l'horizon 7 (entre 99 et 115 cm), où on observe les plus fortes teneurs pour le magnésium. Le taux de saturation en bases est en moyenne de 75% dans les horizons Ap (0-27 cm), et supérieur à 100% au-delà de 100 cm.

Les plus fortes teneurs en phosphore total (100,0 et 127,9 mg/100g) et disponible (4,1 mg/100g) sont observées dans les horizons Ap, plus riches en matière organique.

#### **5.3.6. Profil 4**

Ce profil (planche 6) a été creusé du côté ouest de la toposéquence 4, sur la sous-série ND2b II (comme le profil 2), à une altitude de 280 m. La parcelle se trouve sur un versant à faible pente.

##### **5.3.6.1. Description**

Le sol est profond et de couleur homogène (noir brunâtre). La limite entre les horizons est peu nette.

La charge en éléments grossiers est nulle jusqu'à 40 cm. On observe des blocs volcaniques entre 40 et 69 cm, et des graviers au-delà. La texture, au toucher, est de type limon.

La structure est grumeleuse en surface et polyédrique subangulaire pour les horizons à mi-profondeur. La quantité de racines observées diminue fortement en profondeur. L'activité biologique est bien présente (galeries de lombrics et de rongeurs).

##### **5.3.6.2. Caractérisation analytique**

Seul le dernier horizon (au-delà de 137 cm) montre une réaction positive au test de détection des allophanes. L'humidité résiduelle est d'environ 7% sur tout le profil. Les pourcentages en argile sont en moyenne de 22,5% dans les horizons Ap (0-20 cm) et de 10,5% au-delà de 137 cm. L'allure générale tendue des courbes granulométriques (surtout

celles des horizons Ap) pourrait attester la présence d'un manteau colluvial. Ce qui est justifié par la position du profil (au centre d'un versant).

Les teneurs en éléments totaux sont homogènes sur le profil, sauf celles du zinc, qui sont plus élevées en surface. Les teneurs en aluminium et fer extraits au pyrophosphate sont pour la première fois plus élevées en profondeur qu'en surface. Celles de l'extraction à l'oxalate sont homogènes sur le profil.

Le pH H<sub>2</sub>O est d'environ 7 sur tout le profil. L'acidité d'échange varie entre 18,2 méq/100g (dans l'horion Ap1) et 12,9 méq/100g (au-delà de 137 cm).

Les pourcentages en matière organique sont de 6,0% dans les horizons Ap et compris entre 1,8 et 2,6% dans le reste du profil. Les pourcentages en azote total et le C/N augmentent avec la profondeur. Ce dernier passe de 9 en surface à 15 (entre 57 et 82 cm) et 19 (dans le dernier horizon). Ce qui pourrait être attribuer, soit à une mauvaise minéralisation de la matière organique, ou soit à une abondance de débris organiques en profondeur.

La CEC est d'environ 51,5 méq/100g jusqu'à 82 cm et de 42,5 méq/100g au-delà. Ces valeurs, en moyennes élevées par rapport à celles observées dans les autres profils, sont à lier aux pourcentages importants d'argile.

Les taux de saturation en bases sont compris entre 60,8 et 76,7%, et son comparables avec ceux obtenus pour le profil précédent. Le complexe d'échange est dominé par le calcium, suivi par l'acidité d'échange.

Comme dans les 5 autres profils, les plus fortes quantités en phosphore total (179,1 et 163,7 mg/100g) et disponible (11,5 et 0,9 mg/100g) sont observées dans les horizons Ap, en rapport avec les plus fortes teneurs en matière organique, observées dans ces horizons.

## 5.4. CLASSIFICATION DES SOLS

Nous tentons de classer les 6 sols étudiés selon les systèmes américain (Soil Taxonomy de 1994) et WRB (1994 et 1998). Il s'agit bien d'une tentative étant donné l'impossibilité, vu le temps imparti, de réaliser toutes les analyses de laboratoire dont les résultats interviennent comme critères (cf. chapitre 2) à vérifier dans ces systèmes. Les critères dont nous disposons sont l'épaisseur, le pourcentage d'argile, la capacité de rétention des phosphates, et ceux concernant les teneurs en fer et aluminium extraits à l'oxalate.

### 5.4.1. Identification des horizons de diagnostic

Les horizons de diagnostics identifiés ainsi que leur épaisseur sont donnés dans le tableau 6 (ci-contre).

#### 1. Présence d'un horizon (ou épipédon) mollique ou umbrique

L'épipédon mollique est défini par sa morphologie, sans tenir compte des processus évolutifs ni de l'écologie. On peut résumer ses propriétés comme suit : horizon de surface bien structuré, épais, sombre car coloré par une quantité appréciable de matière organique (> 1%) et dont le taux de saturation en bases est supérieur à 50%.

Les horizons de surface des profils 5, 3, 6, 2 et 4 répondent à ces critères. Ils sont donc qualifiés de molliques. L'horizon de surface du profil 1 ne peut-être qualifié de mollique puisqu'il présente un taux de saturation en bases inférieur à 50%. Dans ce cas, il est dit umbrique.

#### 2. Présence de propriétés andiques, d'un horizon andique ou vitrique

Pour faire partie des Andisols de la Soil Taxonomy de 1994 ou 1998, un sol doit contenir moins de 25% de carbone organique total et présenter des propriétés andiques sur au moins 36 de ces 60 premiers cm du sol. Tous nos profils ont moins de 25% de carbone organique total et présentent des propriétés andiques (d'après les critères dont nous disposons). Ce sont donc tous des Andisols.

La Soil Taxonomy fait la différence entre les Andisols peu évolués, riches en verre, et aux propriétés allophaniques peu marquées, et les Andisols plus évolués (cf. point 2 des critères repris au chapitre 2).

Les propriétés présentés par nos profils les rangent parmi les Andisols peu évolués. Néanmoins, le profil 6 présente un horizon (le talpetate) entre 22 et 77 cm, qui montre une capacité de rétention des phosphates supérieure ou égale à 85%, mais en même temps une réaction nulle au test de détection des allophanes. Pour ce profil, nous nous garderons de trancher et dirons tous simplement qu'il possède des propriétés andiques.

Capoen (2001) a qualifié les Andosols peu évolués, et aux propriétés allophaniques peu marquées d'«Andisols 2 », par opposition aux Andosols plus évolués (plus allophaniques), qu'il appelle «Andisols 1 ». Le même mode de nomenclature est repris dans le tableau 7.

En ce qui concerne la WRB, pour faire partie des Andosols, un sol doit posséder un horizon andique ou vitrique débutant à moins de 25 cm de la surface du sol, et ne pas présenter d'autres horizons de diagnostics à part les types histique, fulvique, mélanique, mollique, umbrique, ochrique, durique ou cambique (cf. chapitre 2).

Tous nos profils présentent des horizons de diagnostic de type vitrique. Pour les mêmes raisons que ci-dessus, l'horizon "talpetateux" du profil 6 pourrait être de type andique. Nous mettrons ce qualificatif entre parenthèses dans le tableau 6.

#### 5.4.2. Classification selon la Soil Taxonomy de 1998 et la WRB de 1998

Le régime d'humidité intervient souvent comme critère à vérifier dans la classification américaine. Nous concernant, tous nos profils répondent au régime d'humidité ustique. C'est à dire qu'il y a une déficience d'eau (certaines parties du profil sont sèches pendant au moins 90 jours sur l'année), mais les conditions restent favorables pendant la période de culture (Soil Survey Staff, 1985 ; Buol et *al.*, 1980 cités par Capoen, 2001).

##### 1. Profil 1

La progression dans la clef de la Soil Taxonomy classe ce profil dans le sous-ordre des ustands (Andisols présentant un régime d'humidité ustique). Ce sous-ordre présente deux groupes : les durustands et les haplustands. Ce profil n'est pas un durustand puisqu'il ne présente pas d'horizon induré. C'est donc un haplustand qui présente un épipédon humique. Il fait donc partie du sous-groupe des **humic haplustands**.

Selon la WRB, ce profil est un **umbric vitric Andosol**, puisque son épipédon est de type umbrique et qu'il présente un horizon diagnostique de type vitrique (entre 10 et 42 cm).

##### 2. Profil 5

Selon la Soil Taxonomy, c'est un **humic haplustand** (cf. profil 1).

Dans la WRB, ce profil présente un horizon vitrique entre 0-51 cm et un horizon de diagnostic de surface de type mollique. Il est donc qualifié de **mollic vitric Andosol**.

##### 3. Profil 3, 2 et 4

Comme les profils 1 et 5, ces trois profils font partie des **humic haplustand** de la Soil Taxonomy.

Selon la WRB, ce sont des **mollic vitric Andosols**.

##### 4. Profil 6

Ce profil présente un talpetate entre 0-50 cm de profondeur, qui le classe parmi les **lithic haplustand** de la Soil Taxonomy.

Dans la WRB, nous dirons que c'est un **mollic vitric Andosol**, qui se rapproche néanmoins des mollic andic Andosols. Par ailleurs, il présente entre 0-100 cm de profondeur

un horizon durique (le talpetate). Ce troisième qualificatif est mis entre parenthèses dans le tableau 6.



---

## CHAPITRE 6

### SYNTHESE

---

Dans un premier temps, nous synthétiserons l'étude des profils de manière globale, sous l'angle des paramètres de laboratoire, en confrontant ces derniers, s'il y a lieu, aux observations de terrain (un tableau reprenant l'ensemble des résultats d'analyses des 6 profils, avec un ordre de présentation sud-nord et est-ouest, se trouve en annexe 4).

Dans un second temps, nous réaliserons un diagnostic agropédologique en essayant de faire ressortir les potentialités et l'état de fertilité de chaque secteur, défini au chapitre 5.

### 6.1. Synthèse pédo-paysagère

#### 6.1.1. Les paramètres physiques

##### 6.1.1.1. L'humidité résiduelle

Les plus forts pourcentages en humidité résiduelle (entre 6 et 10%) sont observés dans le nord et à l'ouest.

D'après Shoji et *al.* (1993), la rétention en eau dans les Andosols s'opère au niveau des méso et micropores qui se trouvent à l'intérieur des agrégats stables dont la formation est liée à la matière organique et aux matériaux non cristallins, notamment les allophanes. Nous concernant, nous n'observons pas de relation directe entre ces deux constituants et l'humidité résiduelle.

##### 6.1.1.2. L'analyse granulométrique

Les textures dominantes sont les types limon sableux et sable limoneux. Cependant, nous constatons comme lors des sondages, que les textures sont de plus en plus de type limon (surtout en surface) lorsqu'on se déplace du sud vers le nord et/ou de l'est vers l'ouest.

On pourrait y voir, soit un stade d'altération un peu plus poussé du côté des falaises (à l'ouest) et au nord, soit un gradient granulométrique dans les types de matériaux déposés.

Au Nicaragua, un système de dénomination de la texture sur base du toucher est courant et justifie les textures reconnues sur le terrain, essentiellement de type limon sableux et sable limoneux. Dans ce système, ces deux textures limon sableux et sable limoneux sont désignées par l'expression *franco arenoso*, expression retrouvée régulièrement dans le carnet de description de la carte des sols du « Catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua ».

La texture *franco arenoso* est une texture intermédiaire entre la texture *franco* (franche, loamy), définie par Duchaufour (2001) comme étant une texture équilibrée,

correspondant à l'«optimum » (25 % d'argile, 30 à 35 % de limon et 40 à 45 % de sables) favorable aux cultures, et la texture *arenoso* (sableuse).

## 6.1.2. Les paramètres physico-chimiques et chimiques

### 6.1.2.1. L'acidité : pH et acidité d'échange

Les sols sont dans l'ensemble peu acides à neutres (pH H<sub>2</sub>O compris entre 5,4 et 7,9). Les pH les plus bas (< à 6) sont observés dans le sud et en altitude (455 m). Ils sont compris entre 6,5 et 7 dans le nord. On ne note pas de différence d'acidité entre l'est et l'ouest (en comparant les profils 3 et 6 ou les profils 2 et 4).

Cette acidité légèrement plus poussée des sols du secteur sud pourrait s'expliquer par leur plus grande désaturation en bases au niveau des horizons supérieurs (à cause des précipitations plus importantes en altitude), à laquelle vient se surimposer l'effet des fumées volcaniques. En effet, c'est le secteur le plus exposé aux gaz du volcan. D'après Richter et *al.* (2001), les gaz provenant du volcan Masaya sont très riches en HCl et SO<sub>2</sub>.

Dans tous les profils, l'acidité d'échange diminue avec la profondeur (le pH avoisine 7 en profondeur). Ceci peut s'expliquer par la richesse en bases des substrats volcaniques.

### 6.1.2.2. Le carbone organique total (COT) et C/N

Les teneurs en COT les plus élevées (entre 3,3 et 3,7 %) sont observées dans les secteurs sud (cf. profil 1) et nord (cf. profil 4).

Dans un même profil, ce paramètre montre fort logiquement une décroissance avec la profondeur. Néanmoins, jusqu'à plus d'un mètre de profondeur, on peut observer des valeurs supérieures au pourcent, sans pour autant que cette présence de matière organique se traduise par une couleur foncée. Ces constatations sont habituelles dans les sols volcaniques et peuvent s'expliquer par la complexation mutuelle entre la matière organique et les allophanes (cf. chapitre 2).

Le rapport C/N varie partout entre 9 et 10 en surface et peut être supérieur à 15 en profondeur. Ce rapport relativement élevé en profondeur pourrait être lié à la présence de débris organiques (racines, tiges, ...) et à la teneur décroissante d'azote en profondeur.

### 6.1.2.3. La CEC

Les capacités d'échange cationique sont comprises entre 13 et 59 méq/100g. Les valeurs les plus élevées (>30 méq/100g) sont observés pour les profils du nord et de l'ouest (6, 2 et 4).

Dans l'ensemble, nous constatons une corrélation positive entre la CEC et les pourcentages en matière organique et argile.

Colmet-Daage et *al.* (1970a) obtiennent sur les sols à allophanes fortement hydratés de la côte Pacifique du Nicaragua, des CEC entre 60 et 100 méq/100 g. Ils concluent que ces

valeurs élevées sont à attribuer à l'état d'hydratation de ces sols et à leur richesse en allophanes.

La CEC mesurée sur les fractions argileuses montre des valeurs de même ordre de grandeur (entre 71 et 87 méq/100g). Ce qui voudrait dire que nous avons affaire au même type d'argile. Les valeurs obtenues s'apparentent à celles des smectites.

Les valeurs de la CEC rapportée à 100g d'argile sont plus élevées, probablement en raison du rôle joué par d'autres constituants sur les propriétés d'échange.

#### **6.1.2.4. Les bases échangeables et le taux de saturation en bases**

Le calcium est le cation dominant le complexe d'échange, sauf pour le profil 1 où ce dernier est dominé en surface (dans les horizons Ap) par l'acidité d'échange. Rappelons que l'acidité d'échange n'a pas été mesurée mais calculée par différence (CEC – bases). Le potassium et le sodium montrent de très faibles teneurs. Celles du potassium sont rarement supérieures à 0,1 méq/100g et celles du sodium sont toujours inférieures à 0,5 méq/100 g.

Les taux de saturation en bases sont partout supérieurs à 60% sauf pour les horizons Ap du profil 1, pour lesquels on observe d'ailleurs les pH les plus bas (5,4).

Les profils situés dans le sud (profils 1 et 5) et à l'est (Profils 3 et 2) montrent une sursaturation en profondeur. Cette relative richesse en bases est à attribuer au caractère basique des débris pyroclastiques (de nature basaltique) sur lesquels se sont formés les sols (Weyl, 1961 cité par Colmet-Daage, 1970a).

#### **6.1.2.5. Le phosphore**

Les teneurs les plus élevées en phosphore total sont observées dans les horizons Ap. Cette constatation nous montre ici le lien qui existe entre le phosphore total et la matière organique. Seul le fractionnement du phosphore (détermination des parts organique et minérale) pourrait confirmer cette hypothèse.

Les capacités de rétention des phosphates (exprimées en pourcentages d'ions phosphates retenus) sont généralement supérieurs à 50% dans le nord et à l'ouest, alors qu'elles sont le plus souvent inférieures à 40 % dans le sud et à l'est.

Pour la majeure partie des échantillons analysés, les quantités en phosphore disponible sont généralement inférieures à 1mg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g de terre sèche. Les plus fortes valeurs sont observées en surface. La teneur la plus élevée est observée en surface du profil 4 (dans le nord), creusé dans l'exploitation la plus large et la plus intensifiée parmi toutes celles visitées.

Nous n'observons pas de lien direct entre la présence d'allophanes et la disponibilité du phosphore. Par exemple, l'horizon Ap du profil 1, qui montre une présence marquée en allophanes, affiche l'une des plus fortes (6,9 mg/100g) teneurs en phosphore disponible. Cependant, n'oublions pas que l'adsorption des phosphates par les allophanes est fonction de la nature de ces substances. Comme nous l'avons déjà dit au chapitre 2 (point 2.3.2.4.), Cloos, Herbillon et Echeverra (cités par Quantin, 1972) ont montré que les allophanes plus riches en alumine manifestent une plus forte adsorption des phosphates, tandis que les allophanes plus riches en silice eux, manifestent une plus faible adsorption des phosphates.

### 6.1.2.6. Le test de détection des allophanes (test de Fieldes et Perrot)

Le tableau 5 (au point 5.2.2.) reprend une échelle réalisée pour ce test.

Le test s'avère positif surtout pour le profil 1 qui montre des niveaux jusqu'à 8 (apparition de la couleur rose foncée dans la minute). Les profils 3 et 2 creusés respectivement du côté de la caldeira du volcan Masaya et sur les sols alluviaux au nord ne montrent pas de coloration.

Ces observations peuvent être expliquées. Pour le profil 1, l'abondance d'allophanes peut être attribuée au bon drainage des sols (à cause des pentes). Pour le profil 3, on peut y voir une jeunesse des sols (formés sur coulées de lave) et/ou leur rajeunissement fréquent, à cause de la proximité du volcan Masaya, et pour le profil 2 un stade d'altération plus poussé des minéraux à organisation cristalline à courte distance (passage du stade allophane au stade imogolite).

### 6.1.3.2. Les éléments totaux

Les processus d'altération et de pédogenèse qui agissent sur des matériaux parentaux essentiellement des pyroclastes dans notre cas, en conditions tropicales humides, entraînent une diminution des contenus en minéraux primaires et une augmentation des teneurs en argile. L'altération des minéraux primaires sous conditions humides implique l'accumulation d'aluminium et de fer, étant donné leur faible mobilité. Par contre, la silice et les cations alcalins et alcalino-terreux, dont le calcium et le sodium sont les plus mobiles, sont facilement lixiviés (Shoji *et al.*, 1993).

On constate du sud vers le nord une légère augmentation des teneurs en fer (Fe) alors que celles en aluminium (Al) restent relativement homogènes. Quand aux teneurs en bases (Ca, Mg, K, Na), dans l'ensemble, elles diminuent, sauf celles du potassium (K) qui restent relativement homogènes. Par ailleurs, au sein d'un même profil, les teneurs en Fe et Al restent également assez homogènes. L'ensemble de ces constatations est incompatible avec l'existence d'un gradient spatial d'altération sud-nord ou est-ouest, comme nous l'avions souvent supposé précédemment.

Concernant les éléments traces métalliques, nous obtenons pour le Cu des teneurs (entre 139 et 260 ppm) largement supérieures aux teneurs habituelles (2-20 ppm et 20-30 ppm) observées respectivement dans les sols français (Baize, 1997) et dans certains sols agricoles du monde (Alloway, 1990). Pour le Ni et le Zn, nous nous situons respectivement dans les gammes de teneurs habituelles (2-60 ppm) et d'anomalies naturelles modérées (100-250 ppm), observées par Baize (1997) dans les sols français.

### 6.1.3.3. Les extractions du fer et de l'aluminium au pyrophosphate et à l'oxalate acide

L'extraction au pyrophosphate fournit la part du fer et de l'aluminium liés à la matière organique et se traduit surtout dans les horizons de surface (où on observe généralement les plus forts pourcentages, entre 0,07 et 0,33).

Les teneurs en fer et aluminium extraits à l'acide oxalate sont un indicateur de l'état d'altération. Les teneurs en Al<sub>o</sub> (Al extrait à l'oxalate acide) sont plus élevées dans le sud que dans le nord, tandis que pour le Fe<sub>o</sub> c'est le contraire.

Les rapports  $Al_p/Al_o$  et  $Fe_p/Fe_o$  sont partout inférieurs à 0,5. Ce qui catégorise nos Andosols parmi les allophaniques (possédant des horizons silandiques).

## 6.2. Synthèse des potentialités agropédologiques par secteur

Sur base des observations réalisées lors des sondages et des résultats découlant de la caractérisation des profils pédologiques, nous procédons à une synthèse des potentialités agropédologiques des 3 secteurs constituant notre zone d'étude.

### 6.2.1. Secteur sud (unités 1 et 2)

Ce secteur présente un relief très escarpé (alternance d'interfluves peu larges et parcelles étroites), avec des pentes généralement comprises entre 50 et 70%. C'est le secteur le plus affecté par les gaz des volcans. De ce fait, les sols y sont essentiellement occupés par des cultures résistantes à ces émanations (l'ananas et la pitahaya). Par ailleurs, l'ananas y est cultivé dans un but de réduire l'érosion des sols.

Ce secteur est représenté par les sondages réalisés sur la toposéquence 1 et par les profils 1 et 5. Rappelons que le profil 5 (situé sur la toposéquence 2) a été creusé quasi à la limite entre le secteur sud et le centre. Nous avons cependant décidé de le rattacher au secteur sud, étant donné les similitudes analytiques qu'il montre avec le profil 1.

D'après la légende de la carte des sols et nos observations de terrain, les sols de ce secteur dérivent de cendres volcaniques récentes et de scories.

Ils sont dans l'ensemble profonds (> 120 cm), sauf ceux sur versant à très forte pente (cf. sondage n°5). Leur charge en éléments grossiers est rarement supérieure à 50%. Leur texture varie entre le limon sableux et le sable limoneux.

Les sols sont légèrement acides (pH de 5,4 à 6) en surface et neutres en profondeur (pH aux environs de 7).

La présence d'allophanes est marquée dans ce secteur, surtout à l'est. Les teneurs en matière organique sont comprises entre 3 et 6% dans les horizons supérieurs, et font partie des plus élevées de la zone d'étude. Les rapports C/N observés indiquent une bonne minéralisation de la matière organique, malgré l'altitude élevée.

Les CEC (comprises entre 17,68 et 28,69) sont parmi les plus faibles de la zone d'étude. Les horizons de surface du profil 1, comparés aux autres profils, sont les plus désaturés en bases.

En surface, les sols sont bien fournis en phosphore total (jusqu'à 189,8 mg/100g) et disponible (6,9 mg/100 g), comparés aux deux autres secteurs.

### 6.2.2. Secteur centre (unité 3)

Ce secteur est caractérisé par un paysage moins escarpé (alternance d'interfluves plats et larges et talwegs également plus larges) et légèrement ondulé. Il est majoritairement occupée par la culture d'ananas, surtout sur les interfluves et versants, et par quelques musacées et de la végétation naturelle dans les vallons.

Ce secteur est représenté par les sondages réalisés sur les toposéquences 2 et 3, et par les profils 3 et 6. Le profil 3 caractérise le côté caldeira, et le 6 le côté sierras.

D'après la légende de la carte des sols et nos observations de terrains, les sols dérivent de coulées de lave, cendres (encore à l'état brut du côté de la caldeira) et débris pyroclastiques scoriacés. Ce sont des alluvions et colluvions respectivement dans les vallons étroits, et à la base des pentes.

Les sols sont moins profonds au centre (cf. sondage n°18) et à l'ouest (profil 6). La charge en éléments grossiers est généralement inférieure à 15%. Vers le nord, elle augmente en profondeur (entre 15 et 50%). La texture reste dominée par les ensembles limon sableux et sable limoneux, mais devient un peu plus de type limon à l'ouest (profil 6).

Les sols sont moins acides que dans le secteur sud (pH H<sub>2</sub>O varie entre 6,4 en surface et 7,9 en profondeur). La présence d'allophanes n'est quasiment plus marquée, même sur les échantillons de sondage. Les teneurs en matière organique les moins élevées (valeur maximale de 4,6%) en surface sont rencontrées dans ce secteur. Les teneurs maximales en matière organique sont de 4,6% (profil 6) tandis qu'elles atteignent les 6% dans les 2 autres secteurs. Les C/N sont de 10 en surface et indiquent une bonne minéralisation de la matière organique.

Les CEC sont par contre un peu plus élevées que dans le secteur sud. Du côté des sierras, on observe des valeurs jusqu'à 59,1 méq/100g, tandis que vers la caldeira elles se rapprochent plus de celles observées dans le secteur sud (entre 16,8 et 25,7 méq/100g). Les taux de saturation en bases sont parmi les plus importants (66% en surface et plus de 100% en profondeur).

Par contre, les teneurs maximales en phosphore total (122,6 mg/100g) et disponible (3,4 mg/100g) les moins élevées sont observées dans ce secteur.

### 6.2.3. Secteur nord (unité 4)

Ce secteur se dégage des deux premiers par son caractère plat. C'est certainement ce qui expliquerait son occupation variée. En plus des cultures rencontrés dans les secteurs précédents, on note la présence du maïs, du riz, du haricot et de légumes.

Ce secteur est représenté par les sondages réalisés sur la toposéquence 4, et par les profils 2 (côté est) et 4 (côté ouest).

D'après la légende de la carte des sols et nos observations de terrain, ces sols dérivent d'alluvions et de colluvions anciens de cendres volcaniques provenant des crêtes du sud.

Les sols sont dans l'ensemble profonds (même si la légende de la carte des sols parle de sols peu profonds, correspondant à la série Esquipulas, à l'ouest). La texture est devenue plus fine (limon et limon argileux) dans les horizons supérieurs, par rapport aux deux autres secteurs.

Les sols sont légèrement acides en surface, du côté de la caldeira, et pratiquement neutres ailleurs.

Comme dans le secteur précédent, la présence d'allophanes est peu marquée. Les teneurs en matière organique sont parmi les plus élevées (entre 1,8 et 6%). Les C/N observés dans les horizons supérieurs sont synonymes de bonne minéralisation de la matière organique.

Les CEC, comprises entre 32,5 et 54,0 méq/100g sont environ deux fois plus importantes que celles observées dans le secteur sud et à l'est du secteur centre. De même, les taux de saturation en bases les plus importants sont observés dans ce secteur.

Les teneurs en phosphore total (entre 92,0 et 179,1 mg/100g) sont parmi les plus élevées de la zone d'étude. Cependant, c'est là qu'on observe la plus forte teneur en phosphore disponible (11,5 mg/100g) en surface.

#### **6.2.4. Conclusion sur les potentialités et l'état de fertilité**

De cette étude, il ressort que les sols du secteur sud sont profonds, légèrement acides en surface et neutres en profondeur, riches en allophanes et en matière organique. Ceux du secteur centre sont moins profonds à l'ouest et au centre, peu acides en surface et neutres en profondeur. Leur capacité d'échange est relativement élevé du côté des sierras, mais comparables à celles du secteur sud du côté de la caldeira. Dans le secteur nord, les sols sont également profonds, peu acides en surface à l'est et neutres ailleurs. Ils montrent les CEC les plus élevées.

Le secteur nord est donc celui qui montre les potentialités les plus élevées (cf. CEC). A l'opposé, c'est le secteur sud qui présente les potentialités les plus faibles, malgré la présence marquée d'allophanes, et des teneurs en matière organique parmi les plus élevées. Le secteur centre quant à lui, est partagé en deux. Sa partie (est) montre des potentialités qui se rattachent à celles du secteur sud, tandis que sa partie (ouest) se rapproche plus du secteur nord.

D'après les paramètres de fertilité (pH, teneurs en bases échangeables, taux de saturation, matière organique, phosphore, etc.), le secteur nord (unité 4) est également le plus fertile. Les sols les plus pauvres s'avèrent être ceux du sud. Par ailleurs, le relief fortement escarpé de ce secteur rend la mise en valeur des terres encore plus difficile.

Le secteur centre montre un état de fertilité intermédiaire entre les secteurs sud et nord. Comme pour les potentialités, la partie est du secteur centre est à rattacher au sud, tandis que l'ouest montre de fortes ressemblance avec le nord.



*In fine*, nous observons donc un gradient de potentialité et de fertilité sud-nord et est-ouest, en rapport avec l'aplanissement du relief et l'éloignement par rapport au volcan Masaya. Ce qui expliquerait l'intensification et la diversification agricole dans le secteur nord.

### **6.2.5. Tableau de synthèse**

Le tableau 7 présente de manière synthétique, certains paramètres servant à l'évaluation des potentialités agropédologiques, et montrant un contraste entre les différentes unités. La présentation sous forme de tableau a l'avantage de donner une vision globale de l'information présentée.

Tableau 7: Synthèse des potentialités agropédologiques par secteur et unité.

Secteur	Unité	Lithologie	Forme dominante du relief	Occupation	Observation	Paramètres analytiques									Potentialité agricole	Contraintes
						Profondeur (cm)	Couleur Munsell	Charge (%)	Texture	pH eau <sup>*</sup>	COT (%)	C/N	CEC méq/100g	Taux de saturation %		
Sud	Unité 1	Cendres volcaniques récentes et scories	bombé et escarpé	Ananas, Pitahaya	S 4"	>= 120	10 YR - 7,5 YR	0 - 50	SL - LS	5,4 - 6,4	2,5 - 3,0	5,8 - 8,1	15,7	17,1	+	Légère acidité de surface Pentes Crêtes Fumées du volcan
	Unité 2	Cendres volcaniques récentes et scories	alternance de crêtes et talwegs avec des pentes généralement comprises entre 30 et 75%	Ananas, Café, arbres fruitiers	S 5 à S 9, P 1, P 5	>= 85	10 YR - 7,5 YR - 2,5 YR	0 - 15	LS - SL	5,4 - 6,5 - 7,0	0,4 - 3,7	8,6 - 9,7 (Ap) 6,4 - 11,5 (prof.)	25,4 - 28,7 (Ap) 12,7 - 23,4 (prof.)	31,7 - 66,6 (Ap) >= 68,0 (prof.)	++	Légère acidité de surface Pentes Crêtes Fumées du volcan
Centre	Unité 3	Alluvions et colluvions de cendres et scories, et Coulées de lave (à l'est)	Ondulé (alternance de longs interfluvies plats avec des talwegs larges)	Ananas, musacées	S 10 à S 21, P 3, P 6	>= 25 cm	10 YR - 7,5 YR	0 - 50	LS - SL (est) L - LA (ouest)	6,0 - 7,0	0,6 - 2,7 (0-100 cm) < = 0,7 (> 100 cm)	10,0 (Ap) 8,9 - 12,5 (prof.)	25,7 - 47,7 (Ap) 16,8 - 59,1 (prof.)	66,1 - 90,7 (Ap) >= 47,9 (prof.)	+++	-
Nord	Unité 4	Alluvions et colluvions anciens de cendres volcaniques	Plat	Ananas, maïs, haricot, légumes, pitahaya	S 22 à S 26, P 2, P 4	>= 70 cm	10 YR - 7,5 YR	< 15% (H sup.) 15-50% (H inf.)	L - LA (H sup.) LS - SL (H inf.)	6,5 - 7,0	0,9 - 3,5 (0-70 cm) <= 1,1% (> 80 cm)	9,2 - 11,9 (Ap) 11,3 - 19,1 (prof.)	38,5 - 51,6 (Ap) 32,5 - 54,0 (prof.)	64,7 - 78,8 (Ap) >= 60,8 (prof.)	+++	-

\* Mesuré au laboratoire

\*\*S 4 = échantillon composite (0-25 cm)

**Légende**

S = Sondage

P = Profil

Prof. = profondeur

Ap = horizon Ap

H sup. = horizons supérieurs

H inf. = horizons inférieurs

< = inférieur ou égal

> = supérieur ou égal

+ = Potentialité la plus faible

+++ = Potentialité la plus élevée

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

L'objectif de ce travail a été de caractériser et d'évaluer la qualité des sols du terroir de Ticuantepe, en vue de leur gestion durable.

La confrontation et l'exploitation des données et documents existants nous ont permis de mieux appréhender le cadre global et particulier de l'étude, et ce pour mieux identifier les principaux facteurs (climat, géologie, géomorphologie, hydrologie) de formation des sols, et mieux cerner leurs propriétés majeures.

L'approche géomorphopédologique nous a ainsi conduit à identifier au sein d'une zone d'étude, représentative du terroir, quatre unités géomorphopédologiques (regroupées en trois secteurs), sur base de la physiographie et de l'occupation des sols.

Les prospections de terrain (sondages à la tarière et description de profils pédologiques) et de laboratoire (caractérisation analytique des échantillons provenant des profils) nous ont permis d'une part, de dégager les tendances pédogénétiques majeures des sols, et d'autre part d'évaluer leurs potentialités agropédologiques.

Il ressort de notre étude que les sols de Ticuantepe sont des Andosols peu évolués, riches en verres mais dont les propriétés allophaniques sont peu marquées. Ils sont développés sur cendres volcaniques et scories sauf à l'extrême est (contigüe à la caldeira du volcan Masaya), où la carte des sols renseigne des sols sur coulées de lave. Au centre et au nord, il s'agit d'alluvions et colluvions de cendres volcaniques respectivement récents et anciens, provenant du sud, plus en altitude. D'après le système de classification de la Soil Taxonomy, ils sont à inclure dans le sous-ordre des ustands, alors qu'ils alternent entre les Andosols umbri-vitrique et molli-vitrique dans le système WRB (World Reference Base, nouveau système de classification de la FAO).

Du point de vue des potentialités agricoles, les sols sont dans l'ensemble profonds, même si dans de rares cas, nous avons rencontré le talpetate (tuf volcanique induré) à quelques centimètres seulement de la surface du sol.

La texture (majoritairement de type limon sableux) s'affine du sud vers le nord et de l'est vers l'ouest. Ceci pourrait être lié au mode de dépôt des particules (les particules les plus fines étant transportées plus loin) depuis les crêtes du sud, et le volcan au sud-est, plutôt qu'à l'existence d'un gradient croissant d'altération spatiale, sud-nord et/ou est-ouest. En effet, les teneurs en éléments totaux ne permettent pas de conclure à l'existence d'un gradient spatial d'altération.

Par ailleurs, les sols sont peu acides en surface dans le sud et en altitude, et pratiquement neutres dans le nord. Cette légère acidité de surface a été expliquée par la forte désaturation en bases des horizons supérieurs à cause des précipitations plus importantes en altitude, auxquelles s'ajoute l'effet du bon drainage des sols, dû aux fortes pentes. L'hypothèse d'acidification par les fumées volcaniques n'a pas été rejetée, mais mérite d'être approfondie, par l'augmentation de la densité d'observation.

Du point de vue des potentialités agropédologiques, le secteur nord, au relief plat, est celui qui en montre les meilleures. Malgré la relativement faible présence d'allophanes, les

CEC y sont les plus élevés, et les taux de saturation les plus importants sont observés dans ce secteur. Les pH des sols sont proches de la neutralité, même en surface. A l'opposé, le secteur sud présente à la fois le relief le plus marqué (alternance de crêtes et petites vallées) et les potentialités agropédologiques les plus médiocres. Entre les deux, le secteur centre, se rattache à la fois au sud (dans sa partie est) et au nord (dans sa partie ouest).

Nous rappelons que ce mémoire trouve une continuité avec celui de Benoît Otte (2002), qui aborde notamment quelques aspects pratiques comme l'étude de la fertilité à la parcelle, quelques réflexions en matières d'aménagement et surtout la mise en place d'un SIG (Système d'Information Géographique) qui a l'avantage de rendre l'information synthétique et thématifiée. Toutefois, nous pouvons déjà considérer qu'une gestion durable des sols du terroir de Ticuantepe, dont l'importance socio-économique est indiscutable pour le Nicaragua, doit être envisagée, en tenant compte des gradients de potentialités identifiés. Il faudrait à tout prix "sauver" les sols plats du nord, quitte à construire sur les crêtes du sud. D'un point de vue environnemental, il faut protéger les ressources aquifères du terroir, qui alimentent à la fois Ticuantepe et une partie de la capitale, Managua. Cette responsabilité incombe à la fois aux habitants et aux autorités locales, qui ont chacun un rôle à jouer dans ce domaine. Notamment, les agriculteurs doivent continuer des pratiques saines (comme c'était le cas pour la plupart) dans leur mode de fertilisation. Elle doit être qualitative et non quantitative. Une prise de conscience en matière de gestion environnementale doit être encouragée par les autorités locales, voire une "éducation environnementale".

Nous pensons que notre travail pourra servir de point de départ dans l'entreprise d'actions concrètes sur le terrain, mais mériterait néanmoins un approfondissement, par la densification des observations; ce qui permettrait sûrement de mieux élucider certains points, comme par exemple l'existence ou non d'un gradient d'évolution des sols sud-nord et/ou est-ouest.

Un autre axe de poursuite de ce travail, parmi d'autres, pourrait être l'étude de la variabilité pédologique au sein d'une même unité cartographique. C'est à dire, voir si en tenant compte par exemple de la différence de relief à l'échelle d'une parcelle, les propriétés des sols diffèrent.

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**


---

- Alloway, B.J., 1990.** *Heavy metals in soils*. Glasgow and London : Blackie. 339p.
- Anonyme, 2002.** *Landscape and climate* [en ligne]. Disponible sur internet : <http://cwr.utoronto.ca/Cultural/fre/Nicaragua/landclim.html>. Consulté le 15 février 2002.
- Baize, D., Girard, M.-C., 1995.** *Référentiel Pédologique*. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). 332p.
- Baize, D., 1997.** *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (FRANCE)*. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Un point sur... 408p.
- Baize, D., 2000.** *Guide des analyses en pédologie*. 2<sup>ème</sup> édition revue et augmentée. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). 257p.
- Baire, S. et Ghuisoland, J., 2001.** *Contribution à l'établissement d'un système de référence sur les sols et leurs occupations en vue de leur gestion durable. Bassin de Wang Jia, Yunnan, Chine*. Mémoire de fin d'études. Gembloux : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 97p.
- Bibliothèque pour la science, 1980.** *La dérive des continents*. La tectonique des plaques. Paris : Belin. 215p.
- Bock, L.** *Cours de Pédologie opérationnelle. Année académique 2000-2001*. Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux : Unité de Géopédologie.
- Bock, L.** *Cours de Complément de Pédologie opérationnelle. Année académique 2000-2001*. Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux : Unité de Géopédologie.
- Calembert, J., 1995.** *Contribution au cours de gestion des sols en régions chaudes*. Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. 28p.
- Capoen, E., 2001.** *Identification pédo-paysagère et caractérisation pédogénétique des sols à caractères andiques de la région de Masaya, Nicaragua*. Mémoire de fin d'études. Gembloux : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 79p.
- Coulon, D., 2001.** *Contribution à l'établissement d'un système de référence sur la fertilité de sols à caractères andiques de la région de Masaya, Nicaragua*. Mémoire de fin d'études. Gembloux : Faculté Universitaires des Sciences Agronomiques de Gembloux. 77p.
- Catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua, 1971.** *Levantamiento de suelos de la region pacifica de Nicaragua. Volumen II. Parte 2: Descripciones de suelos*. Managua: Ministerio de Economia, Industria y Comercio – Ministerio de Agricultura y Ganaderia. pp. 275 à 590.

**Catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua, 1971.** Manual practico para interpretacion de los mapas de suelos. Managua : Ministerio de Agricultura y Ganaderia. Departamento de Suelos y Dasonomia. pp 2 à 39.

**Colinet, G., 1991.** *Identification morphopédologique et évaluation des terres au Fouta-Djallon – Guinée.* Mémoire de fin d'études. Gembloux: Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 97p.

**Colmet-Daage, F., de Kimpe, C., Delaune, M. et al., 1970a.** Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. In ORSTOM, eds. *Les cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, vol. VIII, n°2.* Paris: Masson et Cie. pp.113-169.

**Colmet-Daage, F., de Kimpe, C., Delaune, M. et al., 1970b.** Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. Profils de sols. In ORSTOM, eds. *Les cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, vol. VIII, n°2.* Paris: Masson et Cie. Supplément spécial.

**Driessen, P.M., Dudal, R., 1991.** *The major soils of the world. Lecture notes on their geography, formation, properties and use.* Wageningen: Agricultural university Wageningen. Department of soils science and geology. 310p.

**Duchaufour, P., 2001.** *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement.* 6<sup>ème</sup> édition de l'Abrégé de pédologie. Paris: Dunod. 331p.

**Duchaufour, P., 1997.** Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement. Paris: Masson. 291p.

**FAO-Unesco, 1989.** *Carte mondiale des sols. 1:5.000.000. Légende révisée.* Rome : FAO. 125p.

**FAO-Unesco, 1975a.** *Carte mondiale des sols. 1:5.000.000. Volume I. Légende.* Paris : Unesco. 62p.

**FAO-Unesco, 1975b.** *Soil map of the world. 1:5.000.000. Volume III. Mexico and Central America.* Paris : Unesco. 96p.

FAO-Unesco, 1972. *Carte mondiale des sols. 1:5.000.000.* Paris : Unesco.

**Fenzl, N., 1988.** *Nicaragua: Geografia, Clima, Geologia y hidrogeologia.* Belem, UFPA/INETER/INAN. 62p.

**Guittet, A. et Noisette, H., 2001.** *Entre développement agricole, urbanisation et écotourisme, les enjeux d'une région périurbaine de Managua (Ticuantepe).* Mémoire de DAT (Diplôme d'Agronomie Tropicale). Montpellier: CNEARC. 97.

**Hanotiaux, G., 1985.** *L'analyse du sol.* Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat. Service de la Science du sol. 48p.

**Henao-Toro, M. C., 2002.** *Dynamique d'éléments fertilisants dans des sols dérivés de cendres volcaniques de la zone caféière centrale de Colombie, sous culture de bananier plantain.* Thèse de doctorat. Louvain-la-Neuve : Université catholique de Louvain. 239p.

**INETER, 1983.** *Realizacion de temas cartograficos a partir de la interpretacion de imagenes Landsat. Uso del suelo. Hoja n°7 (ND 16-15, Managua) y hoja n°10 (NC 16-3, Granada).* Managua : Ministerio de Planificacion. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER).

**INETER, 1987.** *Mapa topographico de Nicaragua (1 : 50 000). Regiones III y IV (Departamentos de Managua, Masaya, y Granada) y region IV (Departamentos de Granada, Masaya y Carazo).* Managua : Ministerio de Planificacion. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER).

**INETER, 1995.** *Atlas escolar de Nicaragua. Segunda edicion.* Managua : Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER). Direccion de Geodesia y Cartografia. 31p.

**INETER, 1996.** *Ortofotomapa digital de Nicaragua (1 : 10 000) editado por el Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER), basado en 1996, y generado mediante técnicas fotogramétricas de rectificación a partir del modelo digital del terreno. Indice de hojas adyacentes : 2951-1-01-000 (Los Aguirres), 2952-2-13-000 (Ticuantepe).* Managua (Nicaragua) : Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER).

**INETER, 2001.** *Données météorologiques des stations de Masaya (période 1977-1999) et Ticuantepe (période 1985-1999).* Communication personnelle.

**International Society of Soil Science (ISSS) Working Group Reference Base, 1998.** *World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resource Reports No 84. Keys to Reference Soils Groups of the World.* Rome : FAO-ISSS-ISRIC. 88p.

**IRENA, 1983.** *Cuenca sur del lago de Managua : Análisis, síntesis y propuesta de ordenamiento.* In : *Plan de ordenamiento de la cuenca sur del lago de Managua.* Vol I, II et III. Managua (Nicaragua) : Instituto de Recursos Naturales y del Ambiente (IRENA).

**Klute, A., 1986.** *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2<sup>nd</sup> edition. Madison : American society of agronomy, Soil science society of America. 1188p.

**Lacroix, D., 1997.** *Cours de géologie-géomorphologie.* Gembloux : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Unité de géopédologie. 95p.

**Marin Castillo, E., 1990.** *Estudio agroecologico y su aplicacion al desarrollo productivo agropecuario. Region IV. Informe final.* Managua : Ministerio de Agricultura y Ganaderia. Direccion General de Tecnologia Agropecuaria. 240p.

**Marinozzi, G., 1996.** *Dynamiques d'une agriculture periurbaine au Nicaragua : Typologie des systèmes de production de la région de Ticuantepe (première partie).* Mémoire de fin d'études. Montpellier : CNEARC-ESAT. Disponible sur internet : <http://www.fao.org/sd/frdirect/ltan0013htm>. Consulté le 15 février 2002.

- Mac Keague, J.A., 1976.** *Manual on soil sampling and methods of analysis*. Soil Survey Comitee, Canada, 212p.
- Poulenard, J. et Herbillon, A. J., 2000.** *Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols*. Paris : Compte rendu de l'Académie des Sciences. Sciences de la Terre et des planètes 331 : 651-657.
- Prat, C., 1990.** Relation entre érosion et systèmes de production dans le bassin-versant sud du lac de Managua (Nicaragua). In ORSTOM, eds. *Les cahiers de l'ORSTOM série Pédologie, vol.XXV, n°1-2*. Paris : Masson et Cie. pp171-182.
- Prat, C., 1991.** *Etude du « talpetate », horizon volcanique induré de la région centre-pacifique du Nicaragua. Genèse, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydrodynamique, son rôle dans l'érosion des sols*. Thèse de doctorat. Paris : Université de Paris VI. 350p.
- Parsons Corporation, 1971.** *Soil Survey of The Pacific Region of Nicaragua. Part 1 : Soils, Their Use And Management. Final technical report. Volume II*. Managua : Tax Improvement and Natural Ressources Inventory Project Nicaragua. 292p.
- Parsons Corporation, 1972.** *The geology of western Nicaragua. Final technical report. Volume IV*. Managua : Tax Improvement and Natural Ressources Inventory Project Nicaragua. 221p.
- Quantin, P., 1972.** Les andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. In ORSTOM, eds. *Les cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, vol.X, n°3*. Paris : Masson et Cie. pp.273-301.
- Quantin, P., 1974.** Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical : évolution de la « pédogenèse initiale » en milieu bien drainé, sur roches volcaniques. In ORSTOM, eds. *Les cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, vol.XII, n°1*. Paris : Masson et Cie. pp.3-12.
- Quantin, P., 1992.** Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles Hybrides (Vanuatu). Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. Paris : In ORSTOM eds. 498p.
- Richter D., Erdelyi M., Curl R. F., Tittel F.K., Oppenheimer C., Duffell H. J., Burton M., 2002.** Field measurements of volcanic gases using tunable diode laser based mid-infrared and Fourier transform infrared spectrometers. In Elsevier Science. *Optics an Lasers in Engineering*, 37 (2002).pp171-186.
- Rouanet, G., 1965.** Contribution à l'étude des sols et à leur amélioration dans le département du Carazo (côte Pacifique du Nicaragua). IRAT : Pédologie tropicale. 18p.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R., 1993.** *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*. Developements in Soil Science, 288p.
- Sieffermann, G., 1973.** Les sols de quelques régions volcaniques du cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. In ORSTOM, eds. *Les mémoires ORSTOM – N°66*. Paris : Masson et Cie. 166p.



**Soil Survey Staff, 1975.** *Soil Taxonomy, A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys.* Washington : United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. 754p.

**Soil Survey Staff, 1994.** *Keys to Soil Taxonomy. 6<sup>e</sup> édition.* Washington : United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. 306p.

**Soil Survey Staff, 1998.** *Keys to Soil Taxonomy. Eighth Edition.* Washington : United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 754p.

**Terneus, A., 1990.** *Propriétés physico-chimiques des compartiments horizontaux et verticaux caractéristiques des systèmes sols du périmètre de Lafou (plaine des Timbis, Fouta-Djallon, République de Guinée).* Mémoire de fin d'études. Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. 104p.

## **ANNEXES**

**ANNEXE 1:**  
**Carte des sols du Ministère des Affaires publiques du Nicaragua**  
**(s.d)**

**ANNEXE 2:**  
**Carte de l'occupation des sols de la région Managua-Masaya**  
**(INETER, 1983)**

**ANNEXE 3:**  
**Fiches de description des profils**

**ANNEXE 4:**  
**Synthèse des résultats d'analyses de laboratoire pour les 6 profils**