

# RAPPORT SCIENTIFIQUE FINAL

## SCIENTIFIC FINAL REPORT

Numéro de contrat : ERB TS3\*CT93 0252  
*Contract number:*

TITRE Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine (Chili, Equateur, Mexique).

*Title :* *Restoration and conservation of indurated and unfertile volcanic soils in Latine America (Chile, Ecuador, Mexico).*

CHEF DE PROJET : Paul Quantin  
*Project leader :*

INSTITUTION-HOTE Institut Français de Recherche Scientifique pour le  
*Host-institution :* Développement en Coopération (ORSTOM)

ADRESSE : 213, rue La Fayette  
*Address :* 75480 Paris Cedex 10, France.

TELEPHONE : + 33.(0)1.48.03.77.77

FAX : + 33.(0)1.48.03.08.29

### PAYS/INSTITUTIONS

ASSOCIES : Justus Liebig Universität, Giessen, Tropeninstitut Bodenkunde  
*Associated countries* und Bodenerhaltung. Schott Strasse 2  
*/ Institutions :* 35390 Giessen, Allemagne.

Co-Contractant : Telephone : + 49.641.99.12.725 - Fax : 49.641.99.12.729

Sous-Contractant : Mexique : Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas de Montecillo 56230 Texcoco, Estado de Mexico, Mexique. Universidad Autónoma de Tlaxcala, Secretaria de Investigación Científica. Apdo Post 19, CP 90070, Tlaxcala, Mexique.

Equateur : Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas CP A 4607, Quito, Equateur.

Chili : Universidad Austral de Chile, Valdivia, Facultad de Ciencias Forestales, CP 853, Valdivia, Chili.

MOTS-CLÉ : Sols volcaniques indurés ; tepetates du Mexique ; cangahua d'Equateur ; andosols du Chili ; caractérisation et genèse ; cartographie ; télédétection ; fertilité potentielle ; facteurs physiques et chimiques ; dynamique de matière organique et azote ; inoculation de micro-organismes symbiotiques ; expérimentation agronomique et productivité ; fertilisation biologique, minérale et organique ; analyse socio-économique ; coût de la réhabilitation en sol ; rentabilité ; reforestation ; érosivité des pluies ; ruissellement et érosion sous pluie naturelle ; érodibilité de cangahua ; tepetate ou andosol cultivé ; évolution état physique de surface ; ruissellement et érosion sous pluie simulée.

*Key words :* *Indurated volcanic soils ; tepetates of Mexico ; cangahua of Ecuador ; andosols of Chile ; features genesis ; mapping ; remote sensing ; potential fertility ; physical and chemical factors ; dynamics of organic matter and nitrogen ; inoculation of symbiotic microorganisms ; agronomical experimentation and productivity ; microbiological, mineral and organic fertilizing ; socio-economical analysis ; cost of soil restoration ; rentability ; reforestation ; rainfall erosivity ; runoff and soil loss under natural rainfall ; érodibility of cultivated cangahua, tepetate or andosol ; evolution of superficial physical compartment ; runoff and erosion under simulated rainfall.*

**REGENERATION ET CONSERVATION DES SOLS  
VOLCANIQUES INDURES ET STERILES D'AMERIQUE LATINE  
(CHILI, EQUATEUR, MEXIQUE).**

Rapport scientifique final

Paul Quantin



30 juin 1997

18 SEP. 1997

Union Européenne

Contrat UE/ORSTOM-U.J.L. Giessen n° TS3\*CT93 0252

Ø 68 ERDSOL  
QUA

2 ex FA1  
H200082134  
Non Num

F



010053522

# TABLE DES MATIÈRES

## INTRODUCTION

<b>1. Objectifs de la recherche.</b>	1
<b>2. Méthodologie.</b>	1
2.1 Caractérisation, genèse et géographie	1
2.1.1. Tepetates mexicains.	1
2.1.2. Cangahua d'Equateur.	1
2.2. Facteurs de fertilité potentielle.	2
2.2.1. Cangahua d'Equateur de type duripan calcique.	2
2.2.2. Tepetates mexicain de type fragipan.	2
2.3. Expérimentation agronomique et productivité.	2
2.3.1. Tepetate mexicain de type fragipan.	2
2.3.2. Cangahua d'Equateur de type duripan calcique.	2
2.4. Analyse socio-économique de la réhabilitation agricole et du reboisement.	3
2.4.1. Tepetate mexicain.	3
2.4.2. Cangahua d'Equateur.	3
2.4.3. Travaux de reboisement, méthodes et coûts, au Mexique et en Equateur.	3
2.5. Erodibilité et conservation des sols volcaniques indurés cultivés.	3
2.5.1. Erodibilité des tepetates mexicain de type fragipan.	3
2.5.2. Erodibilité de la cangahua d'Equateur de type duripan calcique.	3
2.5.3. Erodibilité des andosols du Sud-Chili.	4
<b>3. Equipes de recherche.</b>	4
3.1. Mexique I: Groupe C.P. Montecillo - ORSTOM.	4
3.1.1. Institution concernées.	4
3.1.2. Participants.	4
3.2. Mexique II: Groupe U.A. Tlaxcala - U.J.L. Giessen.	5
3.2.1. Institution concernées.	5
3.2.2. Participants.	5
3.3. Equateur.	5
3.3.1. Institution concernées.	6
3.3.2. Participants.	6
3.4. Chili.	7
3.4.1. Institution concernées.	7
3.4.2. Participants.	7
<b>4. Présentation des résultats.</b>	7
<b>5. Troisième symposium "Sols volcaniques indurés d'Amérique latine".</b>	8

## CHAPITRE I

### CARACTÉRISATION, GENÈSE ET GÉOGRAPHIE DES SOLS VOLCANIQUES A HORIZONS INDURES.

<b>1. Tepetates du haut-plateau central Mexicain.</b>	9
1.1. Les travaux antérieurs de typologie, cartographie et genèse des tepetates.	11
1.2. Les travaux récents concernant la genèse des tepetates de type fragipan.	11
1.3. Actualisation et extension de la carte des tepetates par un Système d'Information Géographique (S.I.G.) et par télédétection.	15

<b>2. Cangahua de la vallée Interandine d'Équateur.</b>	15
2.1. Caractérisation et genèse.	16
2.1.1. Matériau d'étude : toposéquence de sols et échantillons de cangahua.	16
2.1.2. Méthodes d'analyse.	17
2.1.2.1. Analyse des constituants	17
2.1.2.2. Analyse des propriétés.	17
2.1.2.3. Datations.	18
2.1.3. Résultats majeurs.	18
2.1.3.1. Distribution des sols et horizons indurés en séquence topoclimatique.	18
2.1.3.2. Profil stratigraphique et matériau originel des sols à cangahua.	20
2.1.3.3. La cangahua du bas-piémont sur l'ensemble de la vallée interandine.	23
2.1.3.4. Genèse de la cangahua.	25
2.2. Propriétés de la cangahua supérieure.	27
2.2.1. Cangahua supérieure du bas-piémont, de type duripan calcique.	27
2.2.1.1. Propriétés physiques.	27
2.2.1.2. Propriétés chimiques.	29
2.2.2. Cangahua de mi-versant de type fragipan.	30
2.2.2.1. Propriétés physiques.	30
2.2.2.2. Propriétés chimiques.	30
2.3. Géographie et cartographie.	31
2.3.1. Milieu physique.	31
2.3.1.1. Géomorphologie et localisation des sols à cangahua.	31
2.3.1.2. Géologie : les projections pyroclastiques.	31
2.3.1.3. Le climat	31
2.3.1.4. Végétation et cultures.	35
2.3.1.5. Les sols et la cangahua.	36
2.3.2. Cartographie des sols à cangahua.	38
2.3.2.1. Motivation.	38
2.3.2.2. Méthodologie.	38
2.3.2.3. Les unités cartographiques.	38
2.3.2.4. Superficie des sols à cangahua et de la cangahua affleurante	41
2.3.3. L'érosion et la récupération des sols érodés.	41
2.3.3.1. Importance de l'érosion.	41
2.3.3.2. La récupération des sols a cangahua érodés.	41
2.4. Évaluation spatiale et multi-temporelle des affleurements de cangahua par imagerie S.P.O.T.	42
2.4.1 Objectifs.	42
2.4.2. Matériel et conditions d'étude.	42
2.4.3. Méthode de traitement.	43
2.4.4. Résultats.	44
2.4.4.1 Étude multi-temporelle.	44
2.4.4.2. La cartographie régionale.	46
2.4.5. Conclusions.	47
<b>Bibliographie</b>	49

## CHAPITRE II

### FACTEURS DE FERTILITÉ POTENTIELLE DES HORIZONS INDURES CULTIVES (Physique, chimiques et biologiques)

<b>1. Tepetate mexicains</b>	51
1.1. Propriétés physiques de tepetates cultivés.	51
1.1.1. Conductivité hydraulique, porosité et stabilité.	51
1.1.1.1. Conductivité hydraulique.	51
1.1.1.2. Porosité totale.	52

1.1.1.3. Humidité du sol.	52
1.1.1.4. Stabilité des agrégats.	52
1.1.2. Enracinement.	52
1.1.2.1. Observation du profil racinaire.	53
1.1.2.2. Mesure de la biomasse racinaire.	53
1.2. Propriétés chimiques.	54
1.2.1. Niveau nutritionnel des tepetates.	54
1.2.1.1. Tepetates non cultivés.	54
1.2.1.2. Tepetates cultivés.	55
1.2.2. Dynamique de la matière organique et de l'azote en tepetates cultivés.	57
1.2.2.1. Apports en N de la biomasse	57
1.2.2.2. Azote minéralisable, labile et stable	58
1.2.2.3. Minéralisation des résidus végétaux	59
1.3. Activité microbienne et symbiotique	59
1.3.1. Biomasse microbienne, évaluation et dynamique	59
1.3.2. Comparaison du tepetate initial et de sols cultivés	60
1.3.3. Évolution du carbone de la biomasse microbienne en tepetates cultivés	60
1.4. Activité microbienne et inoculation de symbiotes	61
1.4.1. Bactéries fixatrices d'azote	61
1.4.1.1. Expérimentation au champ	61
1.4.1.2. Expérimentation en serre	63
1.4.2. Endomycorhizes favorisant la nutrition du phosphore	64
1.4.2.1. Expérimentation en serre	64
1.4.2.2. Expérimentation au champ	65
1.4.3. Synergie de Rhizobium et Glomus sur tepetate cultivé	66
<b>2. Cangahua d'Équateur</b>	67
2.1. Facteurs physiques et chimiques de fertilité	67
2.1.1. Facteurs physiques	67
2.1.2. Facteurs chimiques	67
2.2. Expérimentation en vase de végétation ; éléments limitants	68
<b>Bibliographie.</b>	70

## CHAPITRE III

### EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE ET PRODUCTIVITE

<b>1. Objectifs, station et méthodes.</b>	71
<b>2. Cas des tepetates mexicains, de type fragipan.</b>	72
2.1. Station de Hueyotlipan.	72
2.1.1. Impact du nombre d'années de culture.	72
2.1.2. Rotation culturale et impact du précédent cultural sur la production de blé (4 <sup>e</sup> année).	73
2.1.3. Facteur stationnel amont-aval de la terrasse sur la production.	74
2.1.4. Impact de la fertilisation biologique, minérale ou organique sur la production du maïs associé à la fève (5 <sup>e</sup> année).	74
2.1.4.1. Impact sur le rendement du maïs (Var. Cañuela).	74
2.1.4.2. Impact sur le rendement de la fève.	75
2.1.4.3. Impact global sur le rendement maïs + fève.	76
2.1.4.4. Impact sur le rendement de 4 variétés de maïs, associées à la fève.	76
2.1.4.5. Impact sur le développement et les composantes du rendement du maïs et de la fève.	77
2.2. Station de Tlalpan : impact du labour traditionnel et du labour minimum sur la production du maïs, en 6 <sup>e</sup> année de culture.	79

2.3. Station de San Miguel Tlaixpan.	79
2.3.1. Impact de la fertilisation biologique, minérale et organique en 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> année de culture du tepetate.	79
2.3.1.1. Culture de blé en 1995 (1 <sup>re</sup> année).	79
2.3.1.2. Culture d'avoine en 1995 (1 <sup>re</sup> année).	80
2.3.1.3. Culture de maïs et fève associés en 1996 (2 <sup>e</sup> année).	80
2.3.2. Expérimentation de façons et rotations culturales, sur terrasses de mesures de l'érosion.	81
2.3.2.1. Station et protocoles expérimentaux.	82
2.3.2.2. Résultats.	83
2.3.3. Expérimentation en petites parcelles de diverses plantes et rotations culturales sur tepetates.	91
<b>3. Cas de la cangahua d'Equateur, de type duripan calcique.</b>	<b>92</b>
3.1. Stations de La Tola et Cangahua.	92
3.1.1. Protocole expérimental.	92
3.1.1.1. Les différents traitements.	93
3.1.1.2. Les différentes plantes cultivées.	93
3.1.1.3. Les paramètres évalués.	93
3.1.2. Résultats	94
3.1.2.1. Avoine fourragère.	94
3.1.2.2. Haricot.	94
3.1.2.3. Orge.	94
3.1.2.4. Maïs.	95
3.1.2.5. Conclusions.	95
3.2. Station de Licto.	95
3.2.1. Essai 1 Comparaison de différents apports de matière organique	95
3.2.1.1. Avoine fourragère.	96
3.2.1.2. Petits-pois.	96
3.2.1.3. Orge.	96
3.2.2. Essai 2 - Comparaison de différentes préparations des terrasses.	97
<b>Bibliographie.</b>	<b>98</b>

## CHAPITRE IV

### ANALYSE SOCIO ÉCONOMIQUE

<b>1. Motivation, objectifs.</b>	<b>99</b>
<b>2. Travaux réalisés et méthodes.</b>	<b>99</b>
2.1. Caractérisation du milieu rural.	99
2.2. Coûts de réhabilitation.	100
<b>3. Résultats et interprétation.</b>	<b>101</b>
3.1. Analyse des Systèmes Economiques Familiaux.	101
3.1.1. Au Mexique.	101
3.1.1.1. Typologie.	101
3.1.1.2. Le tepetate : une ressource souvent mal utilisée.	102
3.1.1.3. La productivité : identique sur tepetate et sol agricole après quelques années.	102
3.1.1.4. Les coûts de production.	103
3.1.1.5. La rentabilité.	104
3.1.2. En Equateur.	105
3.1.2.1. Enquête générale.	105
3.1.2.2. Les enquêtes détaillées.	109
3.1.2.3. Conclusion.	111

3.2. Coût de la réhabilitation.	112
3.2.1. Méthodes de réhabilitation des sols volcaniques indurés.	112
3.2.1.1. Mise en culture.	112
3.2.1.2. La reforestation des sols volcaniques indurés et érodés.	113
3.2.2. Coûts des travaux.	114
3.2.2.1. Cas de la mise en culture.	114
3.2.2.2. Cas de la reforestation.	115
<b>Conclusion.</b>	114
<b>Bibliographie.</b>	116

## CHAPITRE V

### ERODIBILITÉ ET CONSERVATION DES MATÉRIAUX INDURÉS DE SOLS VOLCANIQUES CULTIVÉS

<b>1. Objectifs, stations et méthodes.</b>	119
<b>2. Érodibilité des tepetates de type fragipan, du Mexique.</b>	120
2.1. Installation et protocoles expérimentaux.	120
121.1. Station de San Miguel Tlaixpan, Texcoco (Mexico).	120
2.1.1.1. Installations et méthodes de mesure	120
2.1.1.2. Traitement des données.	120
2.1.1.3. Protocoles expérimentaux.	123
2.1.2. Station de El Carmen et de Tlalpan (Tlaxcala).	124
2.1.2.1. La station d'El Carmen.	124
2.1.2.2. La station de Tlalpan.	125
2.2. Données climatique sur la station de San Miguel Tlaixpan.en 1996.	125
2.3. Régime des pluies et érosivité.	126
2.3.1. Station de san miguel Tlaixpan (Texcoco).	126
2.3.1.1. Distribution des pluies.	127
2.3.1.2. Hauteur et fréquence annuelle des pluies.	128
2.3.1.3. Intensité et fréquence annuelle.	128
2.3.1.4. Energie cinétique et fréquence annuelle des pluies.	128
2.3.1.5. Erosivité annuelle des pluies (coefficient r)	129
2.3.1.6. Relation entre distribution mensuelle de hauteur de pluie, énergie cinétique totale	129
2.3.2. Stations de El Carmen et de Tlalpan (Tlaxcala)	130
2.3.2.1. Pluie et érosivité à El Carmen (Tlaxcala)	130
2.3.2.2. Pluie et érosivité à Tlalpan (Tlaxcala)	130
2.4. Ruissellement et érosion.	131
2.4.1. Station de San Miguel Tlaixpan (Texcoco).	131
2.4.1.1. Parcelles de type Wicksmeier.	131
2.4.1.2. Terrasses de type paysan.	134
2.4.2. Stations de El Carmen et Tlalpan (Tlaxcala)	141
2.4.2.1. Parcelles de type Wischmeier.	142
<b>3. La cangahua d'Equateur de type duripan-calcique.</b>	143
3.1. Les stations et la méthodologie.	143
3.1.1. La station de La Tola	143
3.1.2. La station de Cangahua .	144
3.2. Les résultats.	144
3.2.1. Régime des pluies et érosivité.	144
3.2.1.1. Station de La Tola.	144
3.2.1.2. Station de Cangahua.	145

3.2.2. Ruissellement et érosion.	146
3.2.2.1. La station de La Tola.	146
3.2.2.2. La station de Cangahua	147
3.2.3. Observation des états de surface, du ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées.	151
3.2.3.1. Motivation.	151
3.2.3.2. Méthodes.	151
3.2.3.3. Résultats.	151
3.3. Conclusions.	153
<b>4. Erodibilité des andosols des Andes du Sud-Chili.</b>	155
4.1. Station, appareils et méthodes.	155
4.2. Résultats.	155
4.2.1. Pluie, ruissellement et érosion.	155
4.2.2. Pertes de nutriments dans les eaux de ruissellement.	156
4.3. Conclusion.	157
<b>Bibliographie.</b>	158

## CONCLUSIONS

<b>1. Caractérisation, genèse et géographie des sols volcaniques à horizons indurés.</b>	161
1.1. Tepetates de type fragipan du haut-plateau central mexicain.	161
1.1.1. Caractérisation et genèse.	161
1.1.2. Cartographie.	161
1.2. Cangahua de la vallée interandine d'Equateur.	161
1.2.1. Caractérisation et genèse.	161
1.2.2. Propriétés.	162
1.2.3. Géographie et cartographie.	162
1.2.3.1. Cartographie.	162
1.2.3.2. Evaluation spatiale et multitemporelle des affleurements de cangahua, par traitement d'images SPOT.	163
<b>2. Facteurs de fertilité potentielle des horizons indurés cultivés.</b>	163
2.1. Cangahua d'Equateur de type duripan calcique.	163
2.2. Tepetate mexicain de type fragipan.	164
2.2.1. Evolution des propriétés physiques.	164
2.2.2. Développement des racines.	164
2.2.3. Etat nutritionnel des tepetates cultivés.	165
2.2.4. Dynamique de la matière organique et de l'azote.	165
2.2.5. Evaluation et dynamique de la biomasse microbienne.	165
2.2.6. Inoculation de bactéries fixatrices d'azote.	165
2.2.7. Inoculation d'endomycorhizes.	166
<b>3. Expérimentation agronomique et productivité.</b>	166
3.1. Cas des tepetates mexicains de type fragipan.	167
3.1.1. Impact du nombre d'années de culture, en station expérimentale.	167
3.1.2. Impact du précédent cultural sur la production de blé en 4 <sup>e</sup> année de culture, station de Hueyotlipan.	167
3.1.3. Impact du facteur stationnel sur une terrasse de tepetate cultivé.	168
3.1.4. Impact du labour traditionnel et du labour minimum sur la production de maïs, station de Tlalpan en 6 <sup>e</sup> année de culture	168
3.1.5. Impact de la fertilisation biologique, minérale ou organique sur la production de maïs + fève en 5 <sup>e</sup> année de culture, station de Hueyotlipan.	168

3.1.6. Impact de la fertilisation biologique, minérale ou organique, sur la production de blé et avoine en 1 <sup>re</sup> année, de maïs + fève en 2 <sup>e</sup> année de culture, à San Miguel Tlaixpan.	169
3.1.7. Expérimentation sur terrasses de dimension paysanne (pour la mesure de l'érosion) d'une rotation (1993-1996) et de différentes façons culturales, station de San Miguel Tlaixpan.	170
3.1.8. Expérimentation en petites parcelles de différents systèmes de culture, station de San culture, station de Hueyotlipan.	171
3.2. Cas de la cangahua d'Equateur, de type duripan calcique.	171
3.2.1. Stations de La Tola et Cangahua.	171
3.2.2. Station de Licto.	172
<b>4. Analyse socio-économique de la réhabilitation des sols volcaniques indurés.</b>	172
<b>5. Erodibilité et conservation des sols volcaniques indurés cultivés.</b>	174
5.1. Erodibilité des tepetates de type fragipan du Mexique.	174
5.1.1. Régime des pluies et érosivité.	174
5.1.2. Ruissellement et érosion.	175
5.1.2.1. Station de San Miguel Tlaixpan, parcelle de type Wischmeier.	175
5.1.2.2. Station de San Miguel Tlaixpan, terrasses "paysannes".	175
5.1.2.3. Stations de El Carmen et Tlalpan, parcelles de type Wischmeier.	176
5.1.2.4. Station de Tlalpan, terrasses "paysannes".	176
5.2. Erodibilité de la cangahua d'Equateur de type duripan calcique.	177
5.2.1. Régime des pluies et érosivité.	177
5.2.2. Ruissellement et érosion sous pluie naturelle.	177
5.2.3. Observations sous pluies simulées.	177
5.3. Erodibilité des andosols des Andes du Sud-Chili.	178

# INTRODUCTION

## 1. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.

Cette étude a pour but de déterminer les conditions durables de la réhabilitation en sol agricole des horizons indurés de sols volcaniques mis à nu par l'érosion anthropique. Il s'agit des tepetates du haut plateau central mexicain et de la cangahua de la vallée interandine d'Équateur. Les principaux thèmes sont les suivants :

1 - Caractérisation, genèse et cartographie des sols volcaniques à horizons indurés ; afin de connaître leur origine, leurs propriétés et leur extension.

2 - Facteurs de fertilité potentielle des horizons indurés cultivés ; physiques, chimiques, de la matière organique et de l'azote, de l'activité microbienne et de l'inoculation de micro-organismes symbiotiques.

3 - Expérimentation agronomique et productivité ; efficacité de la fertilisation minérale ou organique et de micro-organismes symbiotiques ; essais de plantes, rotation de plantes et façons culturales adaptées.

4 - Analyse socio-économique de la réhabilitation agricole (ou forestière) des sols volcaniques indurés ; étude des systèmes économiques familiaux ; coût de la réhabilitation ; coût de la production et rentabilité ; coût de la reforestation.

5 - Erodibilité et conservation des sols volcaniques indurés ; érosivité des pluies ; mesure de ruissellement et de l'érosion sur les matériaux volcaniques indurés soumis à différents traitements culturels et modes de conservation anti-érosifs.

Au Chili, l'étude a un but restreint : déterminer l'aptitude à l'érosion des andosols forestiers utilisés pour l'agriculture et le pâturage. Il s'agit du problème de l'extension de l'agriculture aux hauts versants des Andes, après l'abandon des piémonts érodés.

## 2. METHODOLOGIE.

### 2.1. CARACTERISATION, GENESE ET GEOGRAPHIE.

#### 2.1.1. Tepetates mexicains.

Analyse approfondie de la cimentation : chimie, minéralogie, microscopie électronique et microanalyse sur lames mince et ultra mince.

Extraction de la carte des tepetates d'une partie de la vallée de Mexico, Tlaxcala et Toluca, par analyse d'images LANDSAT, modélisation, élaboration d'un S.I.G. de données du milieu naturel et socio-économiques.

#### 2.1.2. Cangahua d'Équateur.

Observation d'une climo-toposéquence de sols à cangahua ; stratigraphie des matériaux volcaniques originels ; distribution spatiale et variation de la cangahua.

Caractérisation chimique, minéralogique, physique et pétrographique.

Cartographie : actualisation de la carte des sols à cangahua de la vallée interandine ; analyse spatiale et multitemporelle des affleurements de cangahua à partir d'images SPOT ; évaluation de la surface et de son extension par suite de l'érosion anthropique.

## **2.2. FACTEURS DE FERTILITE POTENTIELLE.**

### **2.2.1. Tepetates mexicain de type fragipan.**

Évolution des propriétés du tepetate cultivé ; conductivité hydraulique ; mesures d'indices de stabilité structurale (vitesse de percolation sur cylindre d'agrégat) ; observation de profils racinaires.

État nutritionnel des tepetates cultivés de différents âges : détermination chimique des nutriments.

Dynamique de la matière organique et de l'azote de tepetates cultivés de différents âges : évaluation de biomasse végétale, du taux de minéralisation de la matière organique et de l'azote.

Évaluation et dynamique de la biomasse microbienne : comptage de populations ; détermination du carbone de cette biomasse.

Inoculation de micro-organismes symbiotiques spécifiques , fixateurs d'azote des genres *Rhizobium* et *Azospirillum* : comptage et mesure d'activité de la nitrogénase : endomycorhizes du genre *Glomus* ; essai sur diverses plantes en fonction d'apports de fertilisants organiques ou minéraux.

### **2.2.2. Cangahua d'Équateur de type duripan calcique.**

Critères physiques et chimiques limitants ou favorables.

Détermination en vase de végétation des éléments chimiques manquants.

## **2.3. EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE ET PRODUCTIVITE.**

### **2.3.1. Tepetate mexicain de type fragipan.**

Impact du nombre d'années de culture sur la productivité, en station expérimentale (1991 à 1995).

Impact du précédent cultural sur la productivité : précédent légumineuse ou blé sur le blé.

Impact du facteur stationnel : amont / aval d'une terrasse.

Impact du labour traditionnel avec buttage / labour minimum sur la productivité du maïs ; station mixte à Tlalpan pour mesure de l'érosion et de productivité.

Impact de la fertilisation biologique (inoculation de symbiote), organique ou minérale sur la productivité, en 1<sup>re</sup>, 2<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> années de culture.

Expérimentation sur terrasses de dimension paysanne (500 à 1 000 m<sup>2</sup>), d'une rotation culturale et de façons culturales : station mixte à San Miguel Tlaixpan servant pour la mesure de l'érosion de la productivité.

Expérimentation en petites parcelles de différentes plantes et systèmes de culture.

### **2.3.2. Cangahua d'Équateur de type duripan calcique.**

Expérimentation en 2 stations : La Tola en climat subhumide et Cangahua en climat subaride, sur petites terrasses paysannes (100 m<sup>2</sup>) de rotation culturale (2 cycles annuels) et de la fertilisation organique ou minérale, ainsi que l'irrigation d'appoint.

Suivi d'une expérimentation en communauté paysanne (Licto) de la fertilisation organique ou minérale et du mode de préparation de la cangahua cultivée.

## **2.4. ANALYSE SOCIO-ECONOMIQUE DE LA REHABILITATION AGRICOLE ET DU REBOISEMENT.**

### **2.4.1. Tepetate mexicain.**

Enquêtes dans 4 communautés paysannes représentatives des états de Tlaxcala, Mexico, Jalisco et Michoacan et de la communauté de Tlalpan (Tlaxcala): étude des systèmes de production, des systèmes économiques familiaux, des coûts des travaux, des revenus propres et extérieurs, rentabilité, incidence des tepetates dans la gestion agro-économique.

### **2.4.2. Cangahua d'Equateur.**

Enquête régionale, des parties nord et sud de la vallée interandine présentant des sols à cangahua : systèmes économiques et familiaux, critères sociaux, culturels et économiques ; productions et revenus, part de la cangahua dans l'agriculture.

Enquête détaillée de deux communautés paysannes (Cangahua, Bolivar) de la région Nord : systèmes économiques familiaux, critères socio-économiques et culturels ; impact de la cangahua, coût des travaux de réhabilitation et de la production ; revenus propres et extérieurs, rentabilité.

### **2.4.3. Travaux de reboisement, méthodes et coûts (Mexique, Equateur).**

Collecte d'informations ; évaluation des surfaces.

## **2.5. ERODIBILITE ET CONSERVATION DES SOLS VOLCANIQUES INDURES CULTIVES.**

### **2.5.1. Erodibilité des tepetates mexicain de type fragipan.**

Mesure de ruissellement et de l'érosion sous pluie naturelle:

En parcelles de référence de type Wischmeier:

A S. Miguel Tlaixpan : étude approfondie des facteurs de ruissellement et d'érosion

A Tlalpan : en parcelles de référence de type Wischmeier, sur les 3 stations : comparaison du tepetate naturel et du tepetate cultivé à nu ou planté ;

En terrasses de type paysan (500 à 1 500 m<sup>2</sup>)

A San Miguel Tlaixpan : impact d'une rotation et de diverses façons culturales sur tepetate (5 terrasses) + sol naturel + tepetate naturel (de 1993 à 1996) ; suivi des états de surface et de la couverture végétale ; suivi agronomique.

A Tlalpan : impact du labour traditionnel avec buttage, et du labour minium avec ou sans couvert végétal intercalaire, en culture de maïs (3 terrasses, de 1995 à 1996).

### **2.5.2. Erodibilité de la cangahua d'Equateur de type duripan calcique.**

Deux stations : La Tola en climat subhumide ; Cangahua en climat subaride.

Traitements : 4 parcelles de 100 m<sup>2</sup> ; 3 terrasses en pente 15% cultivées en avoine ; une de référence ; une avec préculture irriguée ; une avec muret filtrant aval ; 1 terrasse en pente 2%.

Mesures : intensité et érosivité des pluies ; ruissellement et érosion ; en 2 années (1994-1995 et 1995-1996), sous pluie naturelle.

Sous pluie simulée, à La Tola, en parcelles de 1 m<sup>2</sup>, sous divers traitements de préparation (agrégats fins, moyens, grossiers) et plusieurs pentes : mesure de ruissellement, érosion, charge solide, états de surface.

### **2.5.3. Erodibilité des andosols du Sud-Chili.**

Station de Pallahuínte, Valdivia ; sur forte pente (28%) et sous fortes pluies (4 m/an) : mesure du ruissellement et de l'érosion sur 6 parcelles de cultures avec bandes d'arrêt enherbées et sur 2 parcelles de prairie (de 100 m<sup>2</sup>).

## **3. EQUIPES DE RECHERCHE.**

### **3.1. MEXIQUE I : GROUPE C.P. MONTECILLO - ORSTOM.**

#### **3.1.1. Instituts concernés.**

Colegio de Postgraduado en Ciencias Agropecuarias, Montecillo, Edomex.  
Director general : Dr Angel Lagunes-Tejeda ; Instituto de Recursos Naturales y del Ambiente:  
Dr. Benjamin Peña.

ORSTOM : Département MAA, Directeur : Dr Guy Hainnaux - UR 35 ;  
Responsable : Dr Christian Feller ; Département TOA, Directeur : Dr Pierre Soler ; U.R. 12 ;  
Responsable : Dr J.P. Muller.

#### **3.1.2. Participants.**

##### ***France, ORSTOM.***

Coordinateur général : Paul Quantin.

Coordinateur au Mexique : Christian Prat.

Collaboration ORSTOM (temps partiel): Jean-Louis Janeau, Patrick Raous, Hélène Niel-Lubes, Nathalie Rouche, Jacques Bertaux, Georges de Noni, Nadine Dessay, Marc Lointier.

Collaboration CNEARC (temps partiel): Isabelle Touzard, Michel Brocher.

Collaboration d'ingénieurs stagiaires français :

ENITHP : Boun-Tien Ly.

CNEARC: Boun-Tien Ly, Isabelle Lepigeon, Garance Faugère et Jean-Louis Alexandre.

ISTOM: Yann Leroux et Marc Lauffer.

Université Toulouse Le Mirail : Alice Servenay.

Formation d'une doctorante mexicaine en France :

Université Nancy, Resp. A. Herbillon et P. Quantin: Claudia Hidalgo

Collaboration d'ingénieurs mexicains contractuels :

Alfonso Marquez, Aurelio Baez et Eduardo Zapata et à temps partiel : Elsa Huerta M. et Brígida Valdes Chorra.

Collaboration du personnel du Laboratoire et de Terrain de Fertilité des sols et de Physique des sols du CP.

Collaboration d'étudiants stagiaires mexicains:

UNAM : Alfonso Marquez, Aurelio Baez, Eduardo Zapata et à temps partiel : Elsa Huerta M., Brígida Valdes Chorra.

CP: Angel Rugama Urrutia (Nicaraguayen) et Maria Eugenia Miranda (à temps partiel).

### ***Mexique, CP.***

Coordinateur du programme: Dr Jose Luis Oropeza M.

Collaboration par thèmes :

Hydrophysique : Dr J. L. Oropeza.

Collaborateurs : Jose Donald Rios Berber, Personnel du Laboratoire et de Terrain de la section de Physique des sols.

Collaboration d'étudiants stagiaires : Elsa Huerta M., Mauricio Mazariegos C., José Salazar L., Pedro Rivera R. et Maria Alcalá de Jesús.

Fertilité des sols : Dr Jorge Etchevers.

Collaborateurs : Personnel du Laboratoire et de Terrain de la section de Fertilité des sols.

Collaboration d'étudiants stagiaires : Hortensia Brito V., Antonio Perez O., Marilu Vargas I., Ulises López N., Alvaro Gutiérrez B.

Microbiologie des sols : Dr Ronald Ferrera C.

Collaborateurs : M.C. Andres Ortiz C., Nieves Rodríguez M, Personnel du Laboratoire et de Terrain de la section de Microbiologie des sols.

Collaboration d'étudiants stagiaires : Julian Delgadillo M., Alberto Flores G., Patricia Gonzalez R. et Salustio Santamaria R.

Agronomie et socio-économie : Dr Hermilio Navarro.

Collaboration d'étudiants stagiaires : Diego Flores S., Antonia Perez O. et Salvador Muñoz A.

### ***Mexique, UNAM.***

Caractérisation et distribution des tepetates : Dr Prat Christian, Dra Klaudia Oleschko et Dr Valentino Sorani.

Collaborateurs : Dr. Roman Alvarez et Ing. Eduardo Gonzalez.

Collaboration d'une étudiante stagiaire française : Alice Servenay.

Collaboration au thème agronomique : Dr D. Flores, Dr C. Prat, Dr. J. Etchevers.

Collaboration d'étudiants stagiaires: Alma Velazquez, Lucy Mora (Colombienne), Otilio Acevedo.

## **3.2. MEXIQUE II : GROUPE U.A. TLAXCALA - U.J.L. GIESSEN.**

### **3.2.1. Instituts concernés.**

Universidad Autonoma de Tlaxcala, Secretaria de Investigación Científica, responsable : Dr Rolando Romero, remplacé en 1996 par Ing. René Grada-Yautentzi.

Autres institutions de Tlaxcala coopérant : COPLADET, MATET, SARH.

Universität Justus Liebig, Giessen. Président : Prof. Heinz Bauer, Tropeninstitut, Bodenkunde und Bodenerhaltung : Prof. Peter Felix Henningsen.

### **3.2.2. Participants.**

#### ***Allemagne.***

Coordinateur du Tropeninstitut : Dr Gerd Werner.

Coordinateur à Tlaxcala : MC. Ulrich Fechter.

Collaboration d'étudiants stagiaires allemands : A. Grohs, B. Schöch, A. Pfisterer

### ***Mexique, Etat de Tlaxcala.***

Coordinateur à la UAT : Ulrich Fechter.

Collaboration d'étudiants stagiaires: Gustavo F. Flores-García, Primo Muñoz-Tecozahuatzi, Francisco Tehozol-Ixtlapale, Andrea Vera Reyes et Hipólito Muñoz-Nava.

## **3.3. EQUATEUR**

### **3.3.1. Instituts concernés.**

Universidad Central del Ecuador (UCE), Rector : Dr. Tiberio Jurado.

Facultad de Ciencias Agrícolas, Decano : Ing. Alberto Ortega.

Escuela de Ingeniería Agrónoma, Dir. : Ing. Mario Lalama.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), Rector : Dr. Julio Terán Dutali S.J puis Dr. Hernan Andrade S.J.

Facultad de Ciencias Humanas, Decano : Lic. Milton Benítez.

Depto. de Ciencias Geográficas y Estudios Ambientales, Dir. : Dr. Juan Hidalgo.

ORSTOM : Département MAA, UR 35, Responsable : Christian Feller ;  
Département SUD, UR 5C, Responsable : Pierre Gondard ; Département TOA, VOLCAL,  
UR 12, Responsable : J.P. Muller.

### **3.3.2. Participants.**

#### ***France - ORSTOM.***

Coordinateur général : Paul Quantin.

Coordinateur en Equateur : Claude Zebrowski.

Collaboration en France : Georges de Noni, Marc Viennot, Pierre Gondard, Nadine Dessay, Régine Chaume.

Collaboration en Equateur : Jean-Louis Janeau et Pascal Podwojewski.

Collaboration d'étudiants stagiaires français :

CNEARC puis CSN ORSTOM: Pierre Gasselin.

INA PG : Véronique Legeait et Joël Coudray.

Université Paris XII (DEA): Yann Leroux.

Université Paris VI (MC) : Alice Servenay.

Montpellier III (MC): Jean-François Faure.

Nancy I (Dr): Jérôme Poulenard.

#### ***Equateur.***

Coordinateur : German Trujillo (MAG).

UCE : J. Flor (responsable agronomie et érosion), M. Lalama (agronomie).

PUCE : A. Vicuna (responsable socio-économie).

MAG : Edmundo Custode, C. Lopez.

Collaboration d'étudiants stagiaires équatoriens :

UCE: J. Arias, L. Ordoñez, G. Cisneros, M. Lluminquina et L. Hernandez.

PUCE: O. Mayorga, S. Vasquez, G. Sánchez, D. Erazo.

CESA (Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas): E. Suarez.

Caractérisation et géographie des sols à cangahua : C. Zebrowski, P. Quantin et R. Chaume.

Collaboration: P. Podwojewski, G. De Noni, M. Viennot et N. Dessay.

Collaboration d'étudiants stagiaires: J. Poulencard, A. Servenay et J-F Faure.

Fertilité: G. Trujillo et C. Zebrowski

Collaboration : J. Flor, M. Lalama, E. Custode, J. Arias, M. Lluminguina, L. Hernandez, E. Suarez.

Erosion : G. Trujillo, E. Custode et J. Flor.

Collaboration : J. Arias, M. Lluminguina, L. Hernandez, G. de Noni et M. Viennot, J.L. Janeau.

Collaboration d'étudiants stagiaires: Y. Leroux.

Socio-économie : A. Vicuña (PUCE), G. Trujillo et C. Zebrowski.

Collaboration d'étudiants stagiaires : Etudiants PUCE (enquêtes au niveau national) ; Pierre Gasselín, Véronique Legeait et Joël Coudray (enquêtes détaillées).

### **3.4. CHILI**

#### **3.4.1. Instituts concernés**

Universidad Austral de Chile, Valdivia, Facultad Forestal, Responsable : Professor Rubén Peñazola.

Universität Justus Liebig, Giessen, Président : Prof. Heinz Bauer.

Tropeninstitut, Bodenkunde und Bodenerhaltung, Responsable : Prof. émérite Wolfgang Moll.

#### **3.4.2. Participants**

##### *Allemagne*

Coordinateur du Tropeninstitut : Prof. Wolfgang Moll (Le Professeur W. Moll est malheureusement décédé le 14/11/96).

##### *Chili, Valdivia*

Coordinateur de la Universidad Austral de Valdivia : Prof. Ruben Peñazola.

Collaboration de chercheurs : Prof. Renato Gutiérrez-Milán, Dr. Carlos Dyarzun, Prof. Anton Huber, Dr Carlos Oyarzún et Ing. R. Sanzana.

### **4. PRESENTATION DES RESULTATS.**

La présentation des résultats et des conclusions a été faite en cinq chapitres.

Chapitre I : Caractérisation, genèse et géographie

Chapitre II : Facteurs de fertilité potentielle

Chapitre III : Expérimentation agronomique et productivité

Chapitre IV : Analyse socio-économique de la réhabilitation agricole et du reboisement

Chapitre V : Erodibilité et conservation des sols volcaniques indurés cultivés.

Conclusions.

## **5. TROISIEME SYMPOSIUM : SOLS VOLCANIQUES INDURES D'AMERIQUE LATINE**

Du 6 au 13 décembre 1996, s'est déroulé à Quito, le 3<sup>e</sup> symposium "Sols volcaniques indurés d'Amérique latine". Il a été organisé localement en 6 mois de travail intensif par C. Zebrowski, avec la participation du chef de projet, P. Quantin à Paris, comme coordinateur du programme européen ; de G. Trujillo, coordinateur équatorien à Quito ; H. Navarro et C. Prat coordinateurs à México et G. Werner, coordinateur de l'Université J. Liebig à Giessen. L'Union Européenne et l'ORSTOM ont appuyé financièrement cette réunion.

Inauguré par les autorités équatoriennes, cette réunion a été l'occasion de réunir près de 70 chercheurs, responsables des politiques agricoles et techniciens du développement, appartenant à des organismes gouvernementaux et non gouvernementaux venant de l'Allemagne, du Chili, de la Colombie, de l'Equateur, de la France, du Japon et du Mexique. Le symposium a comporté successivement 2 journées de terrain, 1 journée d'inauguration, 3 journées en 6 ateliers, et 2 journées de terrain.

Conçu essentiellement comme un atelier de travail pluridisciplinaire, les réunions ont mis à contribution tous les participants du programme de l'Union Européenne et quelques personnes extérieures intéressées par la même problématique. 62 communications (exposées en poster) et 7 conférences plénières ont été présentées. Il s'agissait de faire le bilan des connaissances après ces années d'études portant sur les sols volcaniques indurés (génèse, potentialités agronomiques, environnement socio-économique), de confronter les résultats et dégager des axes de futures recherches et les conditions de mise en valeur de ces sols. Cet échange approfondi a donné lieu à un ensemble de recommandations, qui associées à l'ensemble des présentations sont en cours de publication.

## CHAPITRE I

### CARACTÉRISATION, GENÈSE ET GÉOGRAPHIE DES SOLS VOLCANIQUES A HORIZONS INDURES.

En Amérique Latine sur les piémonts et hauts plateaux des sierras volcaniques, l'érosion a fait apparaître de vastes étendues d'horizons indurés et stériles. Leur nom et leur typologie varie d'une région à l'autre, du Mexique au Chili. Il s'agit notamment de "tepetates" au Mexique et de la "cangahua" en Équateur. Au Mexique, tepetate désigne à la base d'un sol cultivé une couche à consistance de pierre, mais ce nom recouvre diverses formations d'origine volcanique pyroclastique : certaines sont des tufs altérés, soit faiblement cimentées et friables, à consistance de "fragipan", soit plus fortement cimentées par de la silice et du calcaire, à consistance de "duripan" (Quantin et al., 1992) ; d'autres sont des horizons de sols argileux altérés et silicifiés, à consistance de duripan (Rossignol et al., 1992, Dubrœucq, 1992). Notre étude expérimentale s'est limitée au tepetate de type fragipan, qui peut être assez facilement habilité en sol agricole. En Équateur, Cangahua signifie sol stérile ; il s'agit aussi d'une couche dure à la base d'un sol ; pour la plupart ce sont des tufs altérés ; certains en amont sont friables, d'autres en aval sont un peu cimentés de silice et calcaire, et sont durs.

Au Mexique, la connaissance des tepetates était déjà bien avancée à l'origine de ce deuxième programme de l'Union Européenne (Quantin et al., 1992). Leur étude a été seulement complétée. En Équateur, la caractérisation de la cangahua était encore imprécise en 1993 ; son étude a donc été reprise dans le cadre de ce programme.

#### 1. TEPETATES DU HAUT-PLATEAU CENTRAL MEXICAIN.

Sur le haut-plateau central mexicain les tepetates apparaissent sur les piémonts et plateaux qui entourent les sierras volcaniques récentes, notamment la Sierra Nevada, la Malinche et divers volcans des régions de Tlaxcala et de la Vallée de Mexico. Ce sont des horizons indurés de sols volcaniques complexes, formés de plusieurs séries de dépôts pyroclastiques. L'érosion les fait apparaître en surface puis la dessiccation à l'air augmente leur dureté, laissant à nu un matériau quasi imperméable et stérile.

Au moins quatre séries de dépôts pyroclastiques récents sont observés sous le sol actuel (Fig. 1, Quantin et al., 1992). Ils ont été numérotés T1, T2a, T2b et T3 (d'après Miehlich 1984, T2 a été subdivisé suite à nos travaux). Ils recouvrent une paléo-altérite argileuse de lave andésitique ou dacitique. A chaque série, notamment T2a, T2b et T3, correspond un paléosol comportant un sol meuble et à sa base un horizon plus dur qui est l'altérite d'un tuf rhyolitique ou rhyodacitique.

Suivant une séquence topo-climatique (Fig. 2) d'amont vers l'aval du piémont occidental de la Sierra Nevada, d'un climat subhumide à subaride : le tuf est d'abord altéré et très friable entre 2 800 et 2 600 m d'altitude ; puis un peu silicifié et induré et à propriété de fragipan (dur à l'état sec, friable et plastique à l'état humide) entre 2 600 et 2 400 m ; enfin silicifié et carbonaté, toujours dur, à propriété de duripan et d'horizon pétrocalcique entre 2 400 et 2 250 m d'altitude. La même séquence se retrouve sur le versant oriental de la Sierra et les hauts plateaux de Tlaxcala.

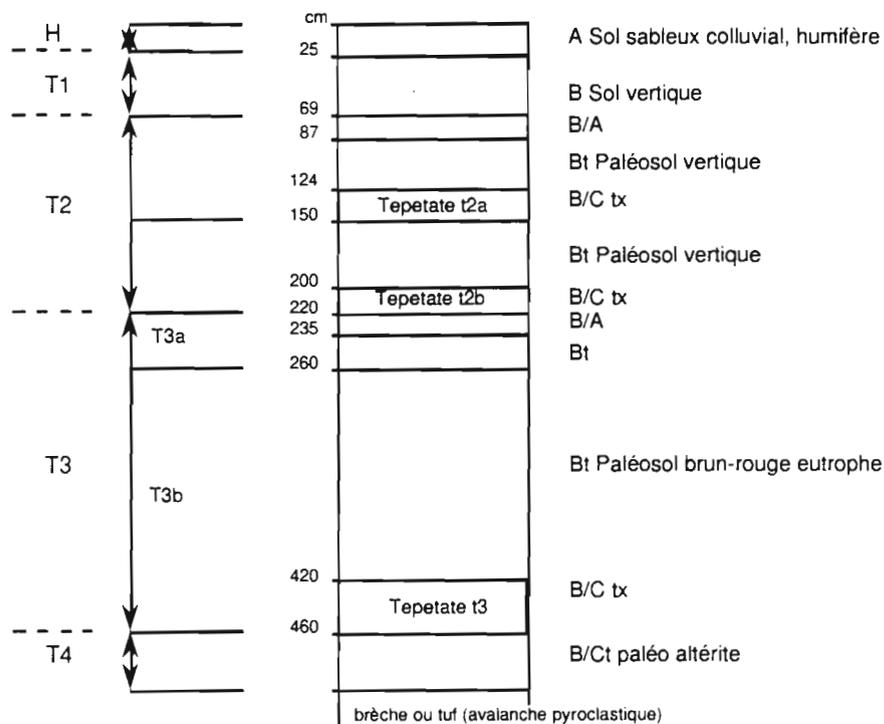


Figure 1. Stratigraphie des dépôts pyroclastiques (Texcoco).

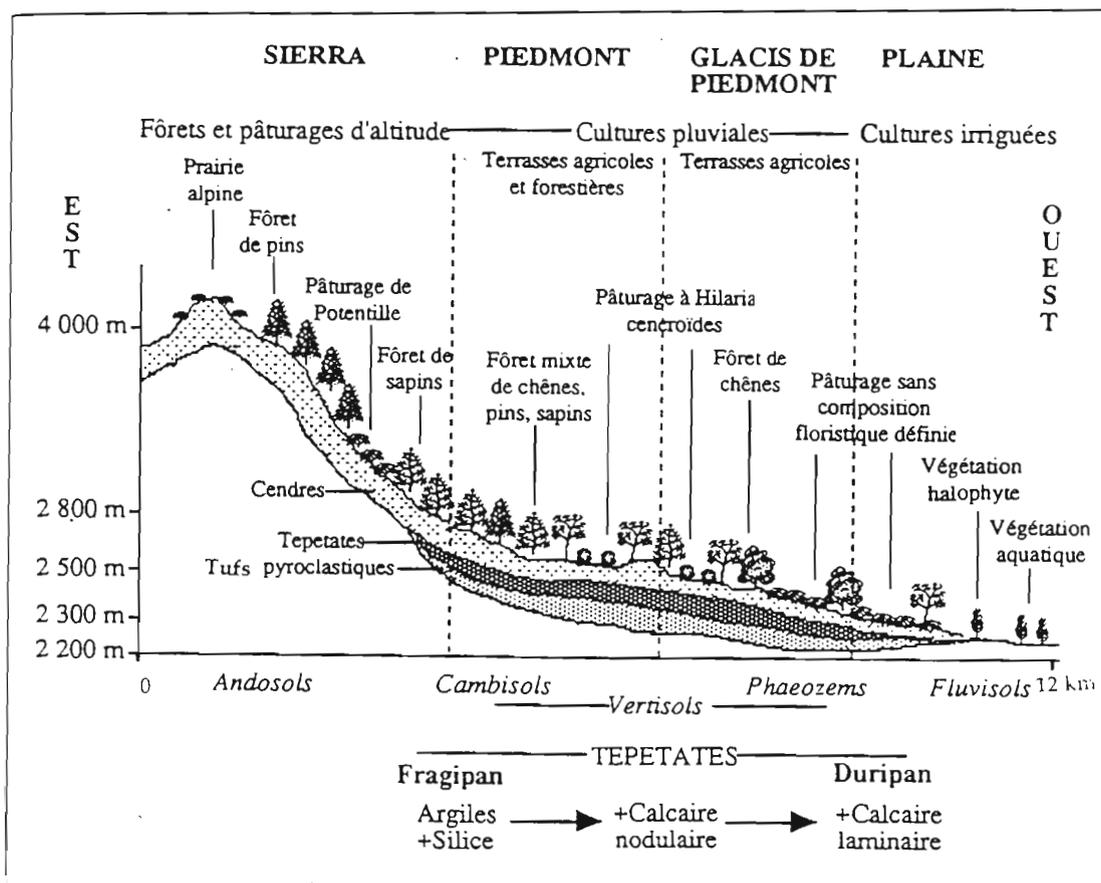


Figure 2. Toposéquence de la partie orientale de la vallée de Mexico (Prat, 1996 d'après Quantin, 1992 et González, 1993).

L'âge des sols successifs est d'au moins 22 000 ans (22 Ka BP) pour la série T3, 12 à 20 Ka pour les deux séries T2a et T2b, 7 à 8 Ka pour T1 et moins de 4 Ka pour le sol actuel (Quantin et al., 1992). Ces sols sont donc jeunes et leur matériau originel est semi altéré ; ils sont riches en minéraux et verres volcaniques, donc en réserves minérales ; leur taux d'argile varie de 15 à 54% .

Les contraintes majeures des horizons de tepetate sont, outre leur caractère massif, dur et peu perméable, leur carence en matière organique et en conséquence en azote et phosphore "assimilable" ; d'où leur stérilité à l'état naturel. L'absence de matière organique dans le tepetate, sinon en traces, montre qu'il ne s'agissait pas d'un sol biologiquement actif, mais d'un horizon minéral à la base d'un sol. Cependant ce matériau convenablement ameubli et fertilisé en N et P est par sa teneur suffisante en argile, qui a une forte capacité d'adsorption de l'eau, de l'humus et des cations échangeables (surtout Ca, Mg et K), apte à devenir rapidement un sol agricole fertile (Quantin et al., 1992).

### **1.1. LES TRAVAUX ANTERIEURS DE TYPOLOGIE, CARTOGRAPHIE ET GENESE DES TEPETATES.**

Dans le cadre du premier programme de l'Union Européenne (1989-92, contrat TS2-A212C), nous avons caractérisé les divers types de tepetates des régions de Mexico et Tlaxcala et cartographié leur distribution (Peña et Zebrowski, 1992 ; Werner, 1992). Puis nous avons choisi d'étudier en détail et d'expérimenter surtout les tepetates de type fragipan des séries T2 et T3. Ceux-ci sont les plus étendus en surface et les plus aptes à une réhabilitation agricole.

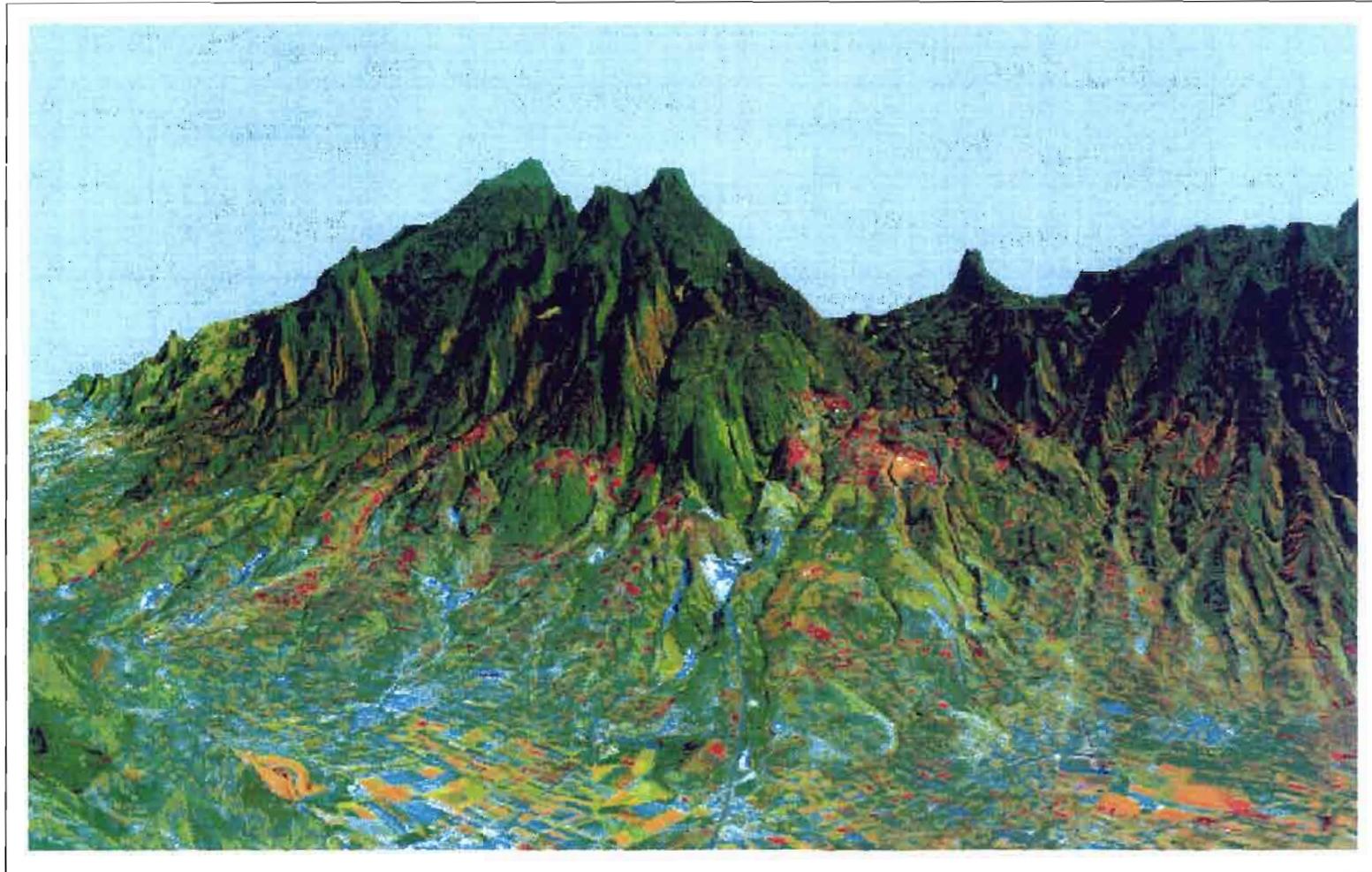
Ils apparaissent en régime climatique ustic et mesic, c'est à dire en climat tempéré variant de subhumide (P = 800 mm) à subaride (P = 600 mm), avec 4 à 6 mois de saison sèche.

Les études antérieures (Quantin et al., 1992 et 1993) avaient permis d'établir un assez bon modèle, stratigraphique et pédogénétique quant à l'origine des matériaux volcaniques et la genèse des tepetates de type fragipan. Il restait cependant des incertitudes et une certaine polémique entre les tenants de dépôts éoliens de type loess (redistribués par le vent), altérés en sol et cimentés par de la silice (Hessmann, 1992), ou par des argiles illuviées (Oleschko, 1992) ; et ceux partisans d'un tuf pyroclastique fin (cendre consolidée) altéré à la base d'un sol, faiblement silicifié et à propriété de fragipan (Hidalgo et al., 1992, Quantin et al., 1992).

### **1.2. LES TRAVAUX RECENTS CONCERNANT LA GENESE DES TEPETATES DE TYPE FRAGIPAN.**

Dans le cadre du deuxième programme de l'Union Européenne de 1993 à 1995, une étude détaillée et approfondie de J. Bertaux, C. Hidalgo et P. Quantin a permis de lever cette ambiguïté. Il s'agit d'une observation détaillée de la distribution stratigraphique des tepetates sur le site de notre station expérimentale de San Miguel Tlaxpan (Texcoco, Mexico). Celle-ci a été suivie d'une observation microscopique et d'une analyse des argiles en spectrométrie infrarouge et diffraction de rayons X, puis d'une analyse sur des micro-prélèvements non perturbés en microscopie électronique par transmission en haute résolution, pour déterminer l'organisation in situ des argiles et de la silice dans la matrice et les revêtements argileux.

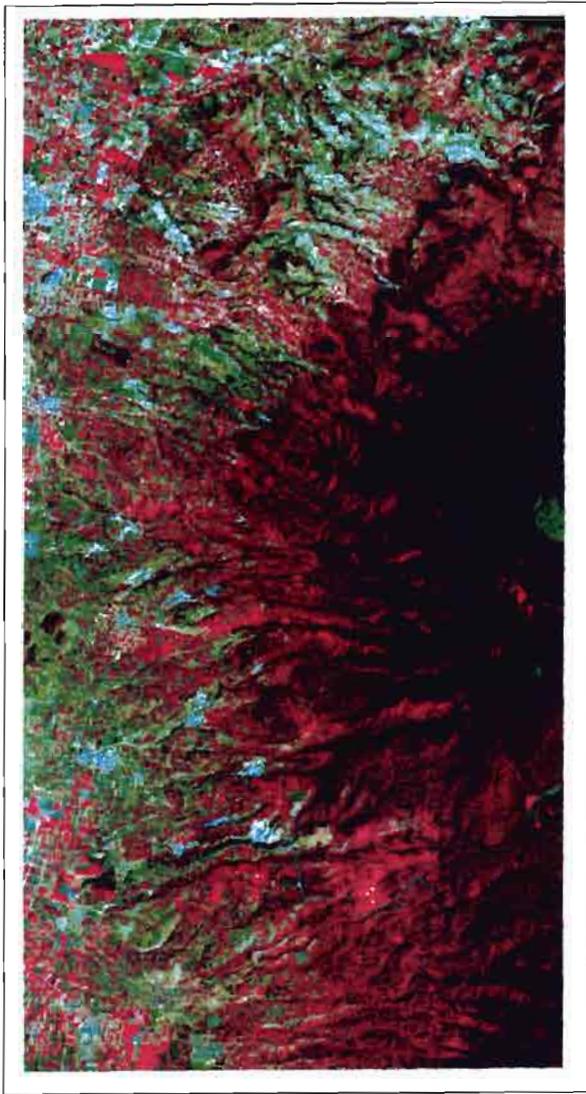
Ces observations confirment que les tepetates de cette région sont bien le produit d'altération d'un tuf pyroclastique, dont il reste des témoins quasi inaltérés à leur base (Bertaux et Quantin, 1994). L'accumulation locale de silice non cristalline (gel, opale) entre les argiles est bien due à un processus pédologique (Hidalgo, Bertaux et Quantin, 1995). Mais la consistance ferme du fragipan n'est pas seulement conséquente de la silicification ou de la redistribution des argiles. Elle est liée surtout à une micro-organisation particulière des minéraux argileux, orientés en couches parallèles, avec un arrangement face à face qui assure une forte cohésion à l'état sec, ou une certaine plasticité à l'état humide. L'intercalation ténue et discontinue de silice non cristalline peut contribuer à l'induration à l'état sec, mais d'une manière réversible (Hidalgo, 1995; Hidalgo, Quantin et Elsass, 1996). Cette micro-organisation parallèle des argiles est probablement conséquente d'une structure microlaminée



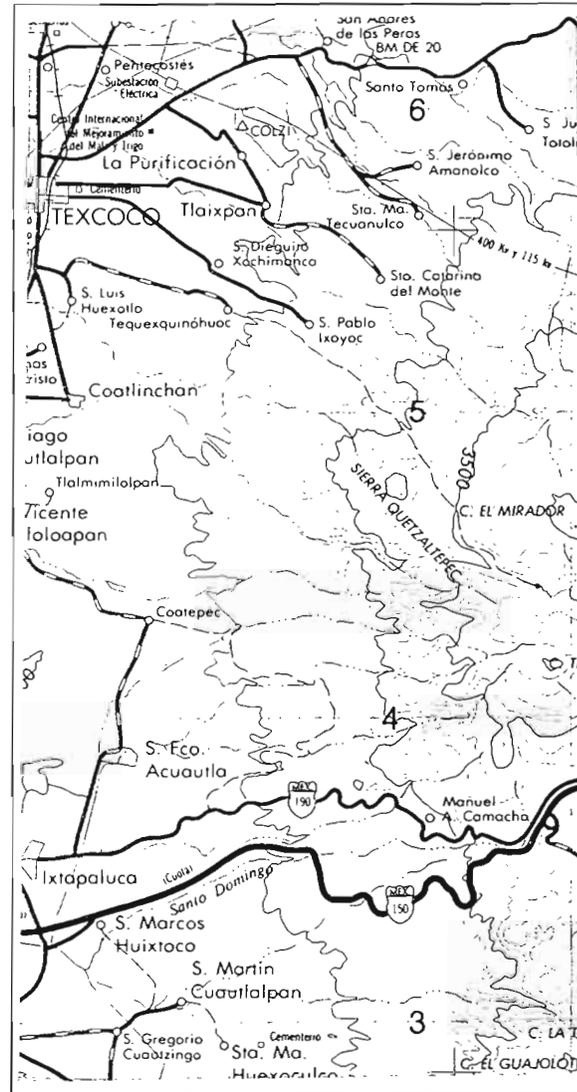
**Figure 3 : Vue en trois dimensions du mont Tlaloc Telapon (El Mirador) versant occidental : composition colorée 453 d'une image Landsat TM sur le MNT.**

Sur cette reconstitution en trois dimensions dont le relief a été accentué trois fois, on distingue très aisément le début de la vallée de Mexico avec son fond très plat et régulier occupé par un parcellaire agricole très dense. Les sommets accidentés sont incisés de grands talwegs réguliers. Ceux-ci se prolongent dans le piémont. Au niveau de la rupture de pente liée à la limite du domaine structural de la montagne et du domaine de glacis d'accumulation et dépôts des matériaux volcaniques, marqué par une concavité, ces talwegs se transforment en ravins profonds. Arrivés dans la vallée ils ne disparaissent pas nécessairement (photo 2).

a - Composition colorée 4-3-2



b - Carte topographique de l'INEGI



c - Composition colorée 4-5-3

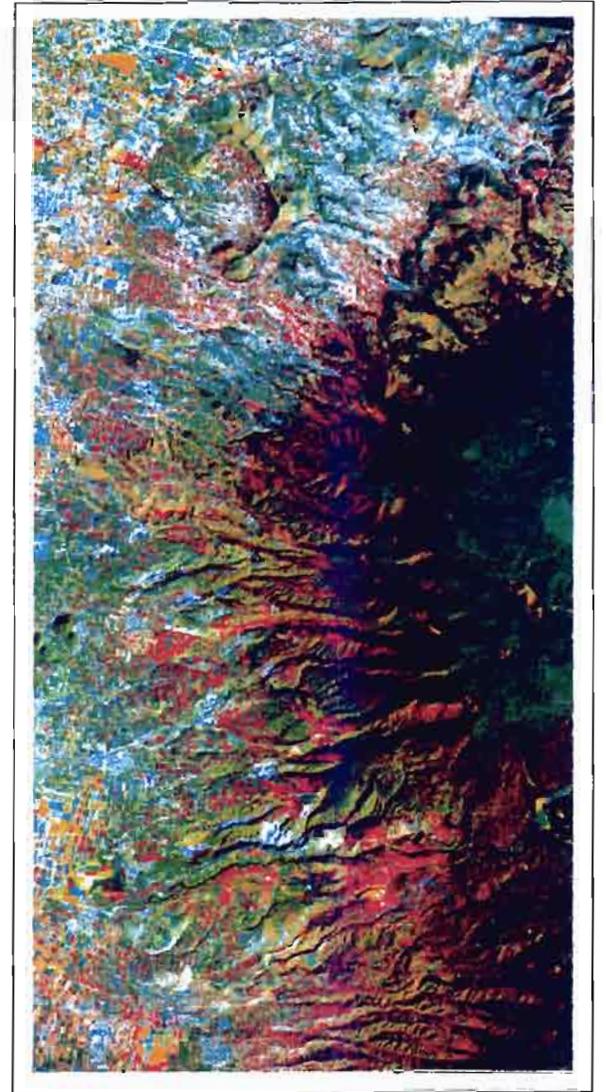


Figure 3 Extraction 1 : Sierra Nevada occidentale au 1/250 000.

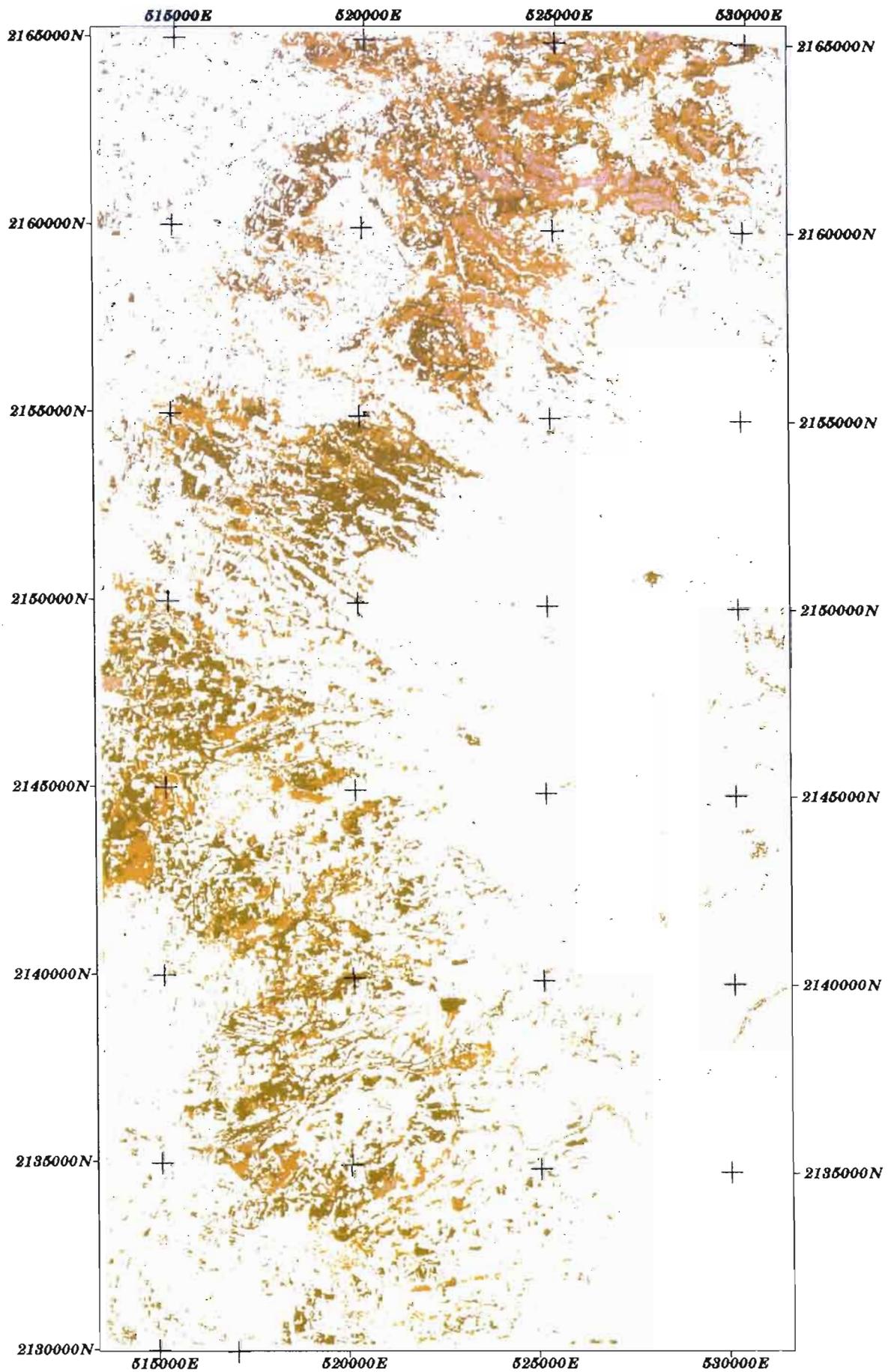


Figure 3c. Tepetates affleurants (beige), discontinus (orange) et sous-jacents (marron).  
Sierra Nevada occidentale (Servenay, 1997).

du tuf originel (flux pyroclastique). Elle ne s'observe pas dans les horizons meubles du sol (dépôt de pluie de cendres), sauf localement dans les argilanes microlaminés.

Une nouvelle observation microscopique de Poetsch et Arikas (1996), sur les tepetates des trois stations expérimentales de la région de Tlaxcala, a confirmé la silicification pédogénétique de ces matériaux sous diverses formes d'opale, ainsi que la présence de phytolithes siliceux déjà observée par Hessmann (1992), puis Hidalgo, Bertaux et Quantin (1995). Cette présence peut être due à la pénétration biologique (racines et animaux) dans le tuf, ou à un résidu (du sol précédent) mêlé aux cendres volcaniques lors de l'émission de "nuées ardentes". La question n'est pas résolue.

### **1.3. ACTUALISATION ET EXTENSION DE LA CARTE DES TEPETATES PAR UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (S.I.G.) ET PAR TELEDETECTION.**

Il s'agit d'une expérience faite en 1996 en marge de ce programme, pour élaborer une méthode de cartographie des tepetates et de leur impact agricole, qui permette d'extrapoler nos résultats à l'ensemble du haut plateau central mexicain.

Alice Servenay et Christian Prat de l'ORSTOM, V. Sorani et E. González de l'Université Nationale Autonome de Mexico (UNAM) ont tout d'abord traité un ensemble de cartes à 1/250 000 (topographie, climat, roches, sols, utilisation des sols, forêts) sur une bande de 60 000 km<sup>2</sup> entre Tlaxcala et Morelia (Servenay et al., 1996). Suivant un modèle d'occurrence des tepetates défini à partir de nos études antérieures (Peña et Zebrowski, 1992), ils ont établi une carte potentielle des tepetates. Puis ils ont interprété quelques zones témoins d'images satellites (Landsat T.M.) à l'aide de calages sur le terrain et de nos cartes antérieures, pour établir une carte des affleurements de tepetates. Ils ont ensuite comparé les deux (Fig. 3a, b, c). Ils se proposent ainsi d'évaluer les superficies de tepetate affleurant et en tepetate "potentiel" (susceptible d'apparaître par érosion). Cette information du milieu naturel pourrait être comparée avec celle du milieu humain agricole, de manière à proposer un plan d'aménagement agricole durable de ces régions (Servenay, 1997).

## **2. CANGAHUA DE LA VALLÉE INTERANDINE D'ÉQUATEUR.**

Le mot quechua "cangahua" dans les pays andins d'Amérique du Sud signifie "terre dure et stérile" (Custode et al., 1992). Il s'agit de couches dures qui apparaissent souvent à la surface des terres cultivées après érosion du sol superficiel. Ce nom est largement utilisé depuis la Colombie jusqu'au Chili, et particulièrement en Équateur. Il désigne une large variété de matériaux fins, consolidés ou cimentés : sédiments, grès, tufs pyroclastiques, sols de cendres volcaniques indurés.

En Équateur les affleurements de cangahua sont observés surtout dans les formations volcaniques pyroclastiques du Quaternaire récent de la Vallée interandine, entre les deux Sierras orientale et occidentale des Andes. Ils s'étendent depuis la Colombie au Nord (0° 48'N) jusqu'à la région de Chunchi au Sud (2° 17'S) (Zebrowski, 1996). La cangahua affleure surtout sur les piémonts des Sierras et des appareils volcaniques, entre 2 200 et 3 200 m d'altitude (Custode et al., 1992), en climat tempéré subaride et subhumide. Cette relation topo-climatique a amené certains pédologues à l'idée d'horizons indurés de sols volcaniques. Mais Vera et López (1992) ont reconnu et classé cinq types de formation de cangahua, à savoir : de retombée de cendre volcanique consolidée (tuf), de coulée boueuse (lahar), de coulée pyroclastique (tuf), "pédogénique" (sol induré de cendre volcanique), "mixte colluvial" (sédiment consolidé de cendres et sols).

En Équateur tous les auteurs s'accordent sur la formation de la cangahua à partir d'un matériau volcanique pyroclastique fin (Vera et Lopez, 1992 ; Hall et Beate, 1991 ; Custode et al., 1992 ; Winckell et Zebrowski, 1993). Il observent qu'il s'agit de dépôts du Quaternaire récent. Cependant les cangahuas affleurantes ou sub-affleurantes ne se sont développées que sur des formations antérieures à l'Holocène : de 11 000 à plus de 49 000 BP (Vera et López, 1992 ; Winckell et Zebrowski, 1992). Elles sont recouvertes par les cendres récentes

(Holocène) et se sont déposées puis altérées en climat différent de l'actuel. C'est pourquoi certains auteurs pensent qu'une période antérieure plus aride aurait favorisé la cimentation des cendres altérées par de la silice et/ou du calcaire (Winckell et Zebrowski, 1992 ; Hall et Mothes, 1996), mais cela n'a pas été démontré. En revanche, l'altération des cendres ou tufs volcaniques augmente suivant un gradient topo-climatique altitudinal vers l'amont des versants ; tandis que l'induration s'accroît vers l'aval, où en bas des piémonts la cangahua est généralement recouverte d'une croûte calcaire, voire fortement imprégnée de calcite.

En réalité sur le terrain il est souvent difficile de distinguer un tuf volcanique altéré (horizon C), à la base ou dans un profil de sol, d'un horizon de sol induré du seul fait de la pédogenèse (horizon Bm, Bx ou Cm, Cx). Les formations volcaniques et volcano-sédimentaires sont complexes étant constituées de dépôts (voire séries de dépôts) successifs sur lesquels alternativement s'est appliquée la pédogenèse. Il y a généralement au moins deux, sinon plusieurs horizons indurés de matériau et d'âge différents. En outre les conditions de climat et de pédogenèse ont varié d'un dépôt à l'autre et d'un lieu à l'autre.

La définition de la cangahua était jusque là différente suivant les auteurs : pour les paysans une couche plus compacte, plus dure et stérile sous le sol superficiel (aussi bien un paléosol qu'un tuf volcanique) ; pour les géologues l'ensemble d'un dépôt pyroclastique comportant une couche dure sous le sol actuel, mis en place lors d'une éruption volcanique (tuf) ou de cendre volcanique remaniée par un processus éolien ou colluvial (Vera et López, 1992 ; Hall et Mothes, 1996) ; pour les pédologues un horizon plus compact et plus dur que le sol superficiel, généralement dans un paléosol, dont la cimentation (silice, calcaire) et l'induration étaient attribués uniquement à la pédogenèse. Cette ambiguïté a posé un problème pour la caractérisation et la cartographie.

Mais une première reconnaissance avant le début du programme nous a révélé une forte similitude entre cangahua et tepetate. Nous avons donc restreint la définition de la cangahua à des horizons C de dépôts pyroclastiques fins consolidés et plus ou moins indurés (lors du dépôt puis de la pédogenèse) ; il s'agit de matériaux massifs, altérés et contenant très peu de matière organique. Pour préciser la typologie, la distribution spatio-temporelle, l'origine et la genèse de la cangahua, nous avons repris l'observation et la caractérisation des sols d'une climo-toposéquence près de Bolivar (Carchi), au Nord de l'Équateur, ainsi que divers échantillons de la cangahua supérieure d'autres régions d'Équateur (Quantin et Zebrowski, 1996). La cartographie des sols à cangahua était ancienne, basée sur une définition et des données imprécises ; en outre l'érosion a fait apparaître de nouvelles surfaces indurées. C'est pourquoi la cartographie a été actualisée : soit à partir des cartes anciennes et de vérifications de terrain (Zebrowski, 1996), soit à partir d'images SPOT de 1986 et de 1994 (de Noni, Viennot et al., 1996), ou de photographies aériennes anciennes de 1956 et récentes de 1990 et 1993 (Gasselín, 1995), et bien sûr d'observations de terrain.

## **2.1. CARACTERISATION ET GENESE.**

### **2.1.1. Matériau d'étude: toposéquence de sols et échantillons de cangahua.**

Il ne s'agit pas d'une étude exhaustive de la cangahua, mais seulement de certains horizons indurés proches de la surface, qui apparaissent après érosion et sur lesquels se pratique la réhabilitation agricole. Nous savions au Mexique que la distribution des propriétés des sols et de leurs formations indurées est ordonnée suivant une toposéquence climatique (Quantin et al., 1992). Pour le confirmer en Équateur nous avons observé une toposéquence de sols à cangahua dans la province de Carchi (Nord de l'Équateur), suivant le transect Bolivar-El Angel-Paramo de Tulcan, entre 2 600 et 3 500 m d'altitude (Fig. 4). Sept profils (série QZ 1 à 7) ont été étudiés (Quantin et Zebrowski, 1996). Mais en haut de cette séquence il n'y a pas d'horizons indurés ; pour compléter nous avons observé un autre profil (PAR) ayant deux horizons de tuf altéré, sur le paramo voisin de Pimampiro. En outre nous avons étudié quelques échantillons de la cangahua superficielle d'autres régions, près de nos stations expérimentales, à savoir : à Cangahua (CAN et CIN, alt. 2 800 m), près de Cayambe et à La Tola (TOL, alt. 2 500 m), près de Tumbaco et Quito dans la province de Pinchincha ; à Ambatillo (AMB, alt. 3 300 m), près d'Ambato, province de Tungurahua ; à Licto (LIC, alt. 2 800 m) près de Riobamba, province de Chimborazo.

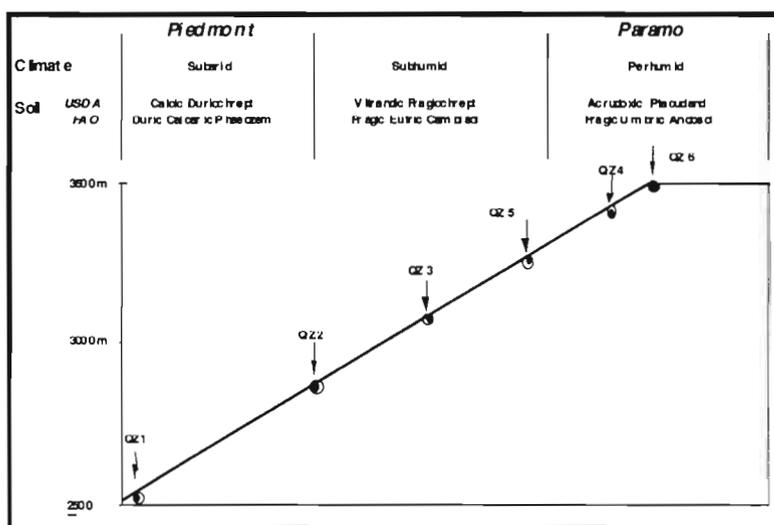


Figure 4. Climo-Toposéquence de Bolivar - Los Andes (Tulcan).

## 2.1.2. Méthodes d'analyse

### 2.1.2.1. Analyse des constituants

#### A. Chimie.

L'analyse chimique des éléments majeurs sur un extrait "triacide" a permis de déterminer séparément la composition de la phase soluble correspondant au produit altéré, puis la phase insoluble des minéraux primaires. La première renseigne sur le type et le degré d'altération en relation avec le climat, la deuxième sur le type de matériau volcanique originel. Une analyse chimique sélective par la soude diluée (0,5 M à 25 et à 50°C), l'oxalate d'ammonium (à l'obscurité) et le pyrophosphate de sodium, a permis d'évaluer diverses formes non cristallines ou mal cristallisées de silice, fer, aluminium et allophane.

#### B. Minéralogie.

La composition minéralogique a été déterminée par diffraction de rayons X sur poudre du matériau global pour l'ensemble des minéraux, puis sur l'extrait argileux orienté et soumis à divers traitements pour déterminer les minéraux argileux.

#### C. Sédimentologie.

La composition du sédiment volcanique a été déterminée par analyse de la distribution de taille des particules et par la quantification des minéraux lourds observés au microscope.

#### D. Pétrographie.

Des lames minces des échantillons d'horizons indurés et de quelques horizons de sol ont été observées au microscope optique pour déterminer la composition du squelette minéral, caractériser la composition et l'organisation de la matrice et des traits pédologiques et biologiques.

### 2.1.2.2. Analyse des propriétés

Nous avons analysé la granulométrie, le pH (eau, KCl, NaF), carbone et azote totaux, la capacité d'échange cationique (CEC au pH du sol) et les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na).

Nous disposons par ailleurs sur d'autres échantillons de cangahua de quelques mesures de densité apparente et porosité, dureté et stabilité à l'eau (après traitement acide et soude), phosphore assimilable (Olsen).

### 2.1.2.3. *Datations*

Nous avons obtenu la datation de deux encroûtements calcaires par dosage de  $^{14}\text{C}$  sur deux échantillons de la cangahua supérieure de la région de Bolivar.

### 2.1.3. *Résultats majeurs*

#### 2.1.3.1. *Distribution des sols et horizons indurés en séquence topoclimatique.*

Les versants "internes" des deux sierras orientale et occidentale, dans la vallée interandine, du moins dans la région au nord de Quito, manifestent de larges surfaces de "planèzes" disséquées par des ravines profondes (quebradas). Elles forment un piémont, soit au bord des hauts plateaux du paramo situés à plus de 3 500 m d'altitude, soit sur le versant inférieur des grands appareils volcaniques qui dominent les cordillères. C'est sur l'une de ces formes, au pied du paramo de Tulcan que se situe la toposéquence de Bolivar-Los Andes vers El Angel et le haut plateau de Tulcan (au nord de Bolivar) ; celui-ci se situe entre 3 500 et 3 800 m d'altitude et il est dominé par les volcans actifs de Chiles et Cumbal sur la sierra occidentale vers 4 700 m d'altitude. Le versant observé se situe entre 2 400 et 3 500 m d'altitude. C'est sur la partie inférieure, entre 2 400 et 3 200 m d'altitude, en forme de planèze à pente de 20 à 30%, que se présentent de larges superficies de cangahua mise à nu par l'érosion. Le haut du versant a une pente plus accentuée de 30 à plus de 50%. Sur cet amont les formations consolidées de tuf sont profondément enterrées sous les sols, voire ont disparu sur le haut plateau par suite de l'ultime érosion périglaciaire (antérieure à l'Holocène). Elles sont cependant encore visibles sur le paramo de Pimampiro vers 3 700 m d'altitude, à l'est de Bolivar sur la sierra orientale (où nous avons étudié le profil PAR).

#### *A. Succession climatique .*

La séquence observée de Los Andes à Tulcan présente *une succession climatique* de l'aval vers l'amont (Fig. 5) que l'on peut schématiquement subdiviser en trois zones principales :

- 2 400 à 2 800 m : climat subaride, caractérisé par un régime ustic - isothermic (Soil Taxonomy, 1994), une saison sèche de 4 à 6 mois et une pluviosité de 500 à 800 mm/an. C'était la région agricole intensive ; elle est actuellement largement érodée et désertifiée.

- 2 800 à 3 400 m : climat subaride, caractérisé par une transition de régime ustic à udic et isomésic, une saison sèche de 3 à 4 mois et une pluviosité de 800 à 1 200 mm/an. C'est la région agricole et pastorale traditionnelle (indienne) ; elle n'est que partiellement érodée.

- 3 400 à 3 800 m : climat humide à perhumide, caractérisé par un régime udic-perudic et isomésic (limite à isofrigid), une nébulosité diurne fréquente et une pluviosité de 1 200 à 1 500 mm/an, ainsi que des gels fréquents, de très fortes variations diurnes de température et d'insolation. C'est la zone du matorral (maquis boisé) en haut versant et du paramo (prairie) sur le haut plateau ; elle est en partie pâturée et dégradée.

#### *B. Les sols et leurs propriétés varient suivant la séquence climatique .*

Les sols et leurs propriétés varient suivant la séquence climatique de l'aval vers l'amont, que l'on peut schématiquement subdiviser en trois zones :

- 2 400 à 2 800 m : les sols à horizon induré "duric" et "calcaric", proche de la surface ou en surface, à propriétés mixtes d'horizon "petrocalcic" (calcaire) et de "duripan" (silicifié) d'après la légende FAO, 1990. Cet horizon très dur à l'état sec demeure dur à l'état humide. Le sol supérieur quand il est conservé est riche en minéraux et verres volcaniques très peu altérés ; mais il ne contient que très peu d'allophe, il a des propriétés "vitrandic" (riche en verres volcaniques, WRB Soil Resources 1994, Soil Taxonomy 1994), mais n'est pas un

andosol ; sa texture sablo-limoneuse l'apparente aux régosols ; mais éventuellement sa couleur foncée et sa saturation en bases caractéristiques de l'horizon "mollic" (ST) l'apparentent aussi aux sols isohumiques de la classification française de 1967 (CF), ou mollisols (ST), ou phaeozems (FAO), des régions semi-arides. Il est proposé de classer le sol ainsi : - dans la Soil Taxonomy (ST) soit vitrandic-calcic Durustoll, soit vitrandic-calcic Durochrept (présence ou non d'horizon mollic) - dans la légende FAO soit duri-calcaric Phaeozem soit mollic ou rendzic Leptosol (présence ou non d'horizon mollic).

- 2 800 à 3 400 m : les sols à horizon induré "fragic", situé généralement à plus de 50 cm de la surface. Cet horizon induré est dur à l'état sec mais friable et plastique à l'état humide, c'est un "fragipan" (FAO). Le sol humifère supérieur proche de la surface est encore riche en sables de minéraux et verres volcaniques peu altérés ; il a des propriétés "andic" (ST), mais ne contient pas assez d'allophane pour être un andosol ; il a aussi souvent des propriétés "mollic" (couleur très foncée, teneur élevée en bases). Entre l'horizon humifère et le fragipan, le sol est plus argileux mais ne contient que peu d'allophane. A nouveau, bien que le climat soit plus humide, les sols sont apparentés aux mollisols (ST) et aux phaeozems (FAO). La différence majeure est dans l'horizon induré ainsi que dans le développement du sol supérieur. Il est proposé de classer le sol ainsi : - dans la Soil Taxonomy (ST) andic-fragic Haplustoll ou andic Fragiochrept (présence ou non d'horizon mollic) - dans la légende FAO andi-fragic Phaeozem ou andi-fragic eutric Cambisol (présence ou non d'horizon mollic).

- 3 400 à 3 800 m : les sols sont toujours typiquement des andosols. La présence d'horizon induré n'est pas constante et toujours à plus de 50 cm (voir plus d'un mètre) de la surface ; il s'agit d'un dépôt de cendre consolidée ou de tuf, altéré hydraté et très friable. Dans la majeure partie du sol depuis la surface la fraction argileuse est riche en allophane (10 à 20% du sol sec), le sol est acide (pH 5 à 6) et fortement désaturé en bases (taux < 10%). La partie supérieure du sol, sur plusieurs décimètres voire un mètre et plus, est noire et très humifère. Cependant près de la surface le sol est plus sableux et plus acide (pH < 5) ; il contient peu d'allophane, mais surtout des complexes organiques - aluminiques. En outre dans sa majeure partie le sol a une capacité de rétention en eau au champ très élevée (> 100% du poids sec à 100°C), donc des propriétés de sol "perhydraté" (CF) ou "hydric" (ST). Il s'agit d'andosol désaturé perhydraté (CF), que l'on peut classer ainsi : - dans la Soil Taxonomy (ST) acrudoxic-hydric Placudand ou acrudoxic-hydric Melanudand (suivant présence ou non de fragipan) - dans la légende FAO umbric Andosol - dans le nouveau référentiel de la FAO (WRB Soil Resources 1994) hydraulic ou hydric Andosol (suivant présence ou non d'horizon acide aluminique).

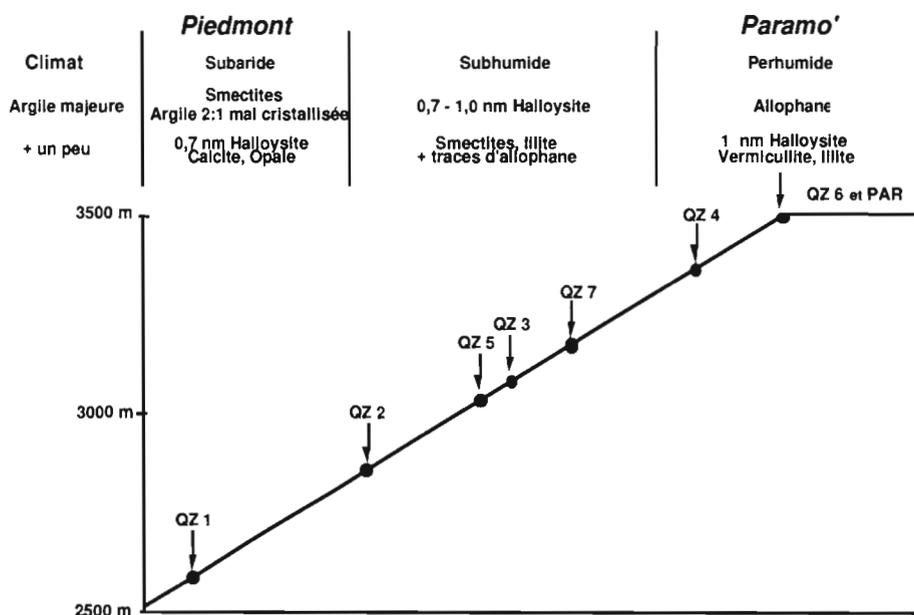


Figure 5 : Climo-toposéquence des minéraux argileux dans les horizons de cangahua et tuf de Bolivar - Los Andes (Tulcan).

Les constituants argileux et organiques des sols, et en conséquence leurs propriétés varient donc suivant un gradient climatique altitudinal (Fig. 5). En climat semi aride à l'aval prédominent des argiles gonflantes et riches en silice de type smectites et interstratifiés halloysite-smectites mal cristallisés ; à mi-versant en climat subhumide prédomine l'halloysite (de composition chimique proche de la kaolinite) ; en climat perhumide à l'amont prédominent l'allophane (aluminosilicate paracrystallin très alumineux) et les complexes organiques de l'aluminium (Quantin et Zebrowski, 1996). Les horizons consolidés, durs ou friables, présentent la même variation des minéraux argileux que l'ensemble du sol où ils se situent. En outre varient leur dureté et la nature de leur ciment ; ils sont plus durs et plus ou moins calcaires et silicifiés en bas piémont, plus friables non calcaires et non silicifiés en mi-versant, très friables à l'amont (quand ils sont présents).

Cette séquence altitudinale est donc analogue à celle des sols à tepetate et andosols observée sur les piémonts des sierras volcaniques du Haut-Plateau Central Mexicain (Quantin et al., 1992). Cependant, aussi bien en Équateur qu'au Mexique des variations latérales du sol supérieur et des horizons consolidés sont observées dans une même zone climatique altitudinale, suivant l'âge, la nature et l'épaisseur des dépôts pyroclastiques. Mais dans chaque zone les propriétés des horizons consolidés demeurent semblables. La cangahua du bas-piémont se distingue toujours par sa dureté de celles du mi-versant et de l'amont, plus friables.

### 2.1.3.2. Profil stratigraphique et matériau originel des sols à cangahua.

A chacun des profils étudiés de la séquence, une analyse détaillée de la composition chimique, minéralogique et pétrographique des différents horizons a permis de reconstituer une série stratigraphique de dépôts pyroclastiques, de composition et d'âge différents. Il est ainsi possible de distinguer une succession de sols et paléosols où s'insèrent notamment les horizons consolidés (cangahua, tuf). Nous prendrons comme modèle le premier profil (QZ1) à l'aval de la séquence de Bolivar, le mieux étudié ; puis lui comparerons les autres profils vers l'amont afin de faire apparaître les parentés ou diversités dans l'origine et la succession des dépôts.

#### A. Profil QZ1 du bas-piémont de Bolivar-Los Andes.

Il s'agit d'un sol complexe et polygénique (Duchaufour, 1988) qui s'est formé dans plusieurs séries de dépôts pyroclastiques, la pédogenèse alternant entre les dépôts volcaniques. Une série de dépôts correspond à un, deux ou plusieurs dépôts (horizons) de même composition magmatique émis probablement à peu de temps d'intervalle pendant le même cycle éruptif.

Nous avons distingué une série d'horizons (Fig. 6). En première observation le profil pourrait se décomposer en trois parties principales depuis la surface : le sol supérieur composé de 3 horizons A, A/B et Cx (ponceux, consolidé) ; puis un paléosol supérieur composé de 4 horizons A/B, B, K et Ckm (cangahua supérieure encroûtée de calcaire) ; enfin un paléosol inférieur composé de 3 horizons B, B/C et Cm (cangahua inférieure non ou très peu calcaire).

Tableau 1. Composition (%) des 5 séries de matériaux pyroclastiques du profil QZ1.

Série	Roche	SiO <sub>2</sub>	Ki	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub>	Minéraux lourds			
						Ho	Hy	Au	Bi
1	rhyodacite	72.7	8.5	1.1	3.7	-	-	-	-
2	dacite claire	68.3	7.0	1.4	5.1	80	11	3	1
3	trachyte alcalin sodique	63.9	6.0	2.2	8.3	-	-	-	-
4	rhyodacite	72.1	8.0	1.6	3.4	50	31	12	0
5	dacite claire	68.9	7.2	1.7	4.9	65	26	6	0

Ki = SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol. Minéraux lourds, en % des minéraux lourds.

Ho = hornblende ; Hy = Hypersthène ; Au = Augite ; Bi = Biotite.

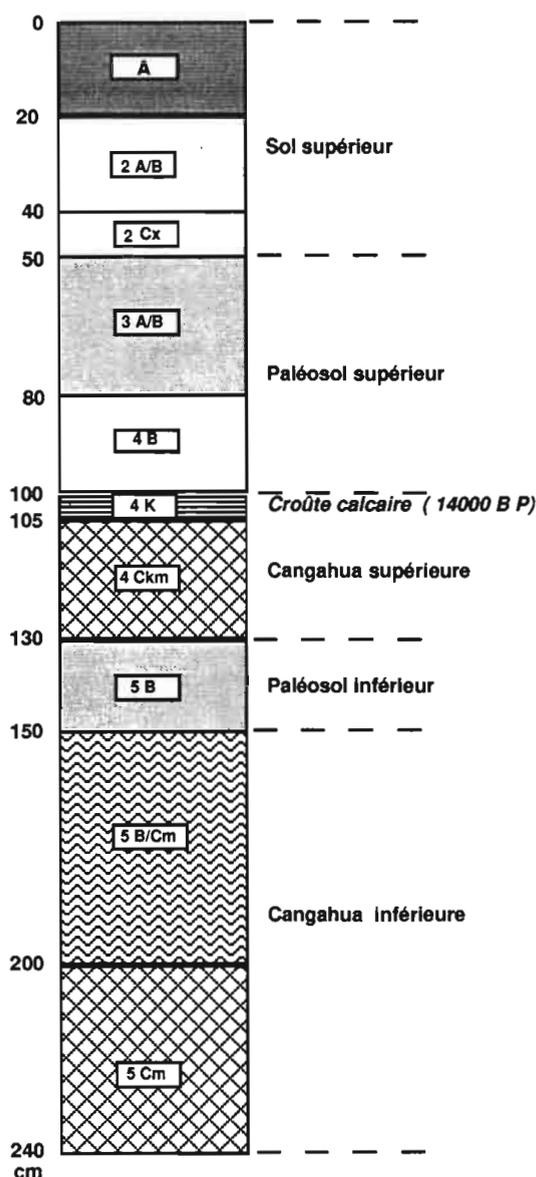


Figure 6 : Profil schématique de sol à cangahua QZ1 du bas piedmont Bolivar Los Andes.

En réalité la composition chimique (verres et minéraux inaltérés) et minéralogique (diffraction R.X., argiles, minéraux lourds) des différents horizons nous a conduit à distinguer cinq séries probables de dépôts pyroclastiques, que nous avons numérotées de 1 à 5 (Tab. 1). Les matériaux originels peuvent être apparentés à plusieurs roches volcaniques, notamment dacites et rhyodacites, dont quelques caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1.

Ces matériaux ont des teneurs élevées en oxydes de Si (64-74%), Al (14-18%), Ca (4-5%), Na (3-8%), mais relativement faibles en oxydes de Fe (1.3 - 2%), Mg (1.2 - 1.6%) et K (1-2.2%).

Ils sont constitués essentiellement de verres dacitiques ou rhyolitiques de feldspaths, de hornblende verte (sodique) et d'un peu ou de traces de pyroxènes et de biotite. Parmi les feldspaths prédominent largement les plagioclases de type labrador et andésine, surtout dans les dacites ; mais les rhyodacites et rhyolites contiennent un peu de feldspaths potassiques et sodiques de type anorthose et sanidine. Parmi les minéraux lourds la hornblende prédomine largement (50-80%) ; Elle est accompagnée d'un peu d'hypersthène (10-30%) et de traces d'augite et de biotite. Ces matériaux ont aussi une part notable de magnétite titanifère. Les rhyodacites et rhyolites contiennent un peu ou des traces de quartz et de cristobalite.

Les deux cangahuas proviennent donc de deux séries éruptives différentes et de deux paléosols successifs. Le matériau pyroclastique de la cangahua supérieure est rhyodacitique

(SiO<sub>2</sub> = 74,2%, Ki = 8,2) et peu alcalin (K<sub>2</sub>O = 1,3%, Na<sub>2</sub>O = 2,4%) ; celui de la cangahua inférieure est dacitique (SiO<sub>2</sub> = 68,3%, Ki = 7,0) et plus alcalin (K<sub>2</sub>O = 1,9%, Na<sub>2</sub>O = 5,1%). En outre la cangahua supérieure est fortement encroûtée de calcite (52% de CaCO<sub>3</sub>) ; la cangahua inférieure ne contient que des traces de calcaire (1 à 2%). Toutes les deux sont peu altérées et contiennent moins de 10% d'argile. Elles sont un peu silicifiées par de l'opale non cristalline (1 à 3% de SiO<sub>2</sub>), mais la cangahua inférieure est un peu plus silicifiée que la supérieure (Quantin et Zebrowski, 1996).

Le sol supérieur est lui aussi complexe, formé d'au moins deux séries de dépôts : de cendres rhyodacitiques près de la surface, puis de cendres et ponces dacitiques. En dessous, le premier paléosol vient de cendres de trachyte alcalin sodique.

### *B. Datation des séries de dépôts et des cangahuas.*

Tous les auteurs s'accordent à dater les formations à cangahua de plus de 10 000 ans BP (Hall et Mothes, 1996 ; Winckell, Zebrowski et Delaune, 1993), c'est à dire avant l'Holocène. Winckell et al., distinguent les formations pyroclastiques "récentes", de l'Holocène, essentiellement des retombées de cendres, des formations pyroclastiques "anciennes" qui incluent les cangahuas. Précisément à El Angel, près de Bolivar, ils datent vers 11 600 ans BP (before present time), la base des dépôts de cendres récentes et ils évaluent à au moins 42 000 ans BP la base des cendres anciennes à cangahua.

Hall et Mothes (1996) ont établi une colonne stratigraphique de près de 20 couches de cangahua, rassemblées en 11 groupes (A à K), sur une période de 500 à 10 Ka (Ka=1 000 ans) BP. Les deux séries de cangahua de Bolivar-Los Andes peuvent être rattachées au groupe K. Celui-ci comporte 3 cangahuas intercalées entre des lapilli ponceux datés de 21, 31 et entre 37 et 40 Ka. La cangahua supérieure se situe entre 21 et 10 Ka, la seconde entre 21 et 31 Ka, la troisième entre 31 et 40 Ka. Près de Bolivar au Sud de Tulcan, Braun (1977) a daté 33 Ka la base de la cangahua inférieure. Nous avons daté à environ 14 Ka, l'encroûtement calcaire au sommet de la cangahua supérieure de Bolivar. L'âge du dépôt originel de cette cangahua se situe entre 14 et 21 Ka, probablement vers 20 Ka ; celui de la cangahua inférieure entre 21 et 33 Ka, probablement 30 Ka.

Quant aux formations récentes de cendres, selon des datations de Winckell et al (1993), le dépôt supérieur se situe vraisemblablement entre 2 000 et 500 ans BP, le deuxième entre 2 000 et 4 000 BP, le troisième entre 4 000 et 11 000 BP.

Il y a une similitude remarquable quoique étonnante, entre le profil stratigraphique de sols à cangahua de Bolivar-Los Andes et celui des sols à tepetate de la région de Mexico (Fig. 1), tant pour la succession des séries de dépôts pyroclastiques que pour l'âge des formations indurées inférieures et supérieures. Ceci suggère des conditions analogues de formation.

### *C. Ensemble des profils de la séquence Los Andes-Tulcan ; comparaison des séries de matériau originel.*

A partir de la composition chimique des minéraux inaltérés et de quelques analyses de minéraux lourds (en cours d'achèvement), nous avons essayé de classer les différentes séries de dépôts pyroclastiques dans chaque profil (Tab. 2), afin d'observer leur distribution dans la séquence topographique.

Les deux premières séries du sol supérieur sont toujours présentes. La troisième série, moins siliceuse et plus alcaline que les autres, n'est pas toujours présente : soit le dépôt est aléatoire, soit sa présence n'a pas été bien observée. Les quatrième et cinquième séries correspondant aux cangahuas supérieure et inférieure ne sont certainement présentes que dans les profils 1 et 2, en bas du piémont. Il n'est pas possible d'affirmer que les formations consolidées du tuf altéré situées à mi-versant (profils 5 et 7) et en amont (profils 4 et 6) appartiennent à l'une ou l'autre des deux séries de dépôt à cangahua, car leur composition diffère un peu. En amont, sur le rebord du paramo, les cendres anciennes sont plus riches en Mg et Fe et s'apparentent à des dacites, alors qu'en piémont il s'agit de dacites claires. L'origine des cendres est probablement différente. A mi-versant le profil 5 ne présente pas de

dépôt correspondant à la quatrième série. Ce dépôt pourrait être un tuf correspondant à la cinquième (cangahua inférieure) De plus, on note à sa base un tuf rhyolitique (6<sup>e</sup> série) qui n'a pas été observé ailleurs.

Tableau 2. Composition des séries de matériaux de l'ensemble des profils présentés successivement de l'aval (1) vers l'amont (6) du versant.

Profil N°	Série pyro.	Roche type	SiO <sub>2</sub> %	Ki	Minéraux lourds % M.L.				Horizon consolidé type
					Ho	Hy	Au	Bi	
1	1	RD	72,7	8.5					Cangahua sup. calcaire Cangahua inférieure
	2	D	68.3	7.0	80	11	3	1	
	3	T	63.9	6.0					
	4	RD	72.1	8.0	50	31	12	0	
	5	D	68.9	7.2	65	26	6	0	
2	1	nd							Tuf altéré fragipan Tuf altéré fragipan
	2	D	68.6	6.9	86	9	2	0.5	
	np								
	4	RD	72.0	8.0	65	14	10	3	
3*	3	L	61.0	5.2					Cinérite altérée, friable
5	1	RD	72.8	8.9					Cinérite altéré, friable Tuf altéré fragipan Tuf altéré, dur
	2	D	67.7	6.5					
	3	D	64.3	5.8					
	np								
	5?	D	69.4	7.6					
	6	R	80.0	12.8					
7	1	RD	74.2	9.5					Tuf altéré fragipan
	2	D	67.0	6.3					
	np								
	4?	RD	72.3	10.6					
4	1	RD	72.8	8.9					Tuf altéré, friable
	2	D	67.7	6.7					
	np								
	4?	RD/D <sub>1</sub>	70.0	8.8					
6	1	RD	76.6	10.8					Tuf altéré, friable
	2	D	69.2	7.2	96	2	0.5	0	
	3	D	64.2	5.7	53	27	15	0	
	4?	D <sub>1</sub>	69.5	8.4	48	36	14	0	
	5?	D <sub>1</sub>	68.3	8.2	98	T	0	0	

3\* horizon isolé - Série np : non présentée - Ki : SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol. 4 ? et 5 ? : apparemment supposé à série 4 ou 5  
Roche type = D : dacite claire - RD : rhyodacite - R : rhyolite - T : trachyte alcalin sodique - L : latite - D<sub>1</sub> : dacite  
Minéraux = Ho : hornblende - Hy : hypersthène - Au : augite - Bi : biotite

En conclusion il y a bien une succession de quatre ou cinq séries de dépôts pyroclastiques, alternativement rhyodacitiques et dacitiques, sur l'ensemble du versant. Seules les deux premières des cendres dites "récentes" constituant le sol supérieur semblent également réparties sur l'ensemble de la séquence. La troisième série semble plus aléatoire et variable, bien qu'elle s'observe de l'amont à l'aval du versant, mais discontinue. Faute de repère stratigraphique précis il n'a pas été possible de déterminer la continuité ou non des dépôts des séries 4 et 5 des cendres dites "anciennes". Il aurait fallu une observation détaillée. Cependant les analyses montrent que probablement l'origine des dépôts a varié, surtout à l'amont de la séquence.

### **2.1.3.3. La cangahua du bas-piémont sur l'ensemble de la vallée interandine ; variations du matériau originel et des constituants secondaires.**

#### **A. Le matériau originel.**

Sur le bas-piémont de Bolivar nous avons observé que le matériau originel de la cangahua supérieure est rhyodacitique, celui de la cangahua inférieure dacitique. Nous avons comparé des échantillons de la cangahua supérieure du piémont d'autres régions d'Equateur en conditions d'altitude (2 500 à 3 000 m) et de climat (semi-aride) semblables, près de

Cayambe (Cangahua), Tumbaco (La Tola, Ilalo), Ambato (Ambatillo) et Riobamba (Licto). Leur composition est peu variable, de type dacite claire (Tab. 3). Elle se rapproche de celle de la cangahua inférieure de Bolivar ; mais elle est un peu moins siliceuse et un peu plus calcique, magnésienne et ferrifère. Effectivement la microscopie et la minéralogie y révèlent la présence en mélange avec le matériau dacitique d'un peu de verres et laves basaltiques à labrador, augite et olivine. Ce matériau basaltique est plus abondant dans les échantillons de Cangahua et d'Ambatillo que dans ceux de la Tola et de Licto. Il y a donc eu une variation du matériau originel des cangahuas en relation avec les foyers éruptifs les plus proches, comme le remarquent Hall et Mothes (1996).

Tableau 3. Composition chimique et minéraux lourds de différentes cangahua.

Site	Roche type	Oxydes en % du poids anhydre								Minéraux lourds en % de M. L.				
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ki	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ho	Hy	Au	Ol	Bi
Bolivar - Los Andes														
- Cangahua supérieure	RD	74.2	14.6	8.2	1.7	4.3	1.5	1.3	2.4	50	31	12	0	0
- Cangahua inférieure	D	68.3	16.5	7.0	1.7	4.8	1.5	1.9	5.1	65	26	6	0	0
Cangahua - Cayambe														
- Station	D	63.9	18.3	5.9	2.6	7.0	1.9	1.7	4.2	28	5	49	6	1
- Cayambe	D	65.1	17.6	6.3	2.5	6.0	2.0	1.8	4.9					
Tumbaco - Ilalo														
- Station La Tola	D	67.1	16.9	6.7	2.2	5.5	1.7	1.7	4.7					
- Ilalo	D	65.3	17.6	6.3	2.2	5.8	1.9	1.8	5.0					
Ambatillo - Ambato	D	65.0	17.3	6.4	3.6	6.4	1.7	1.8	3.8	17	16	43	5	0
Licto - Riobamba	D	67.0	16.9	6.7	2.8	5.5	2.1	1.6	3.7					

Roche type = RD : rhyodacite - D : dacite claire Ki = SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol.

Minéraux lourds = Ho : hornblende - Hy : hypersthène - Au : augite et aegyrine - Ol : olivine - Bi : biotite

### B. Les constituants minéraux secondaires.

Cette variation est régionale et stratigraphique. Il n'existe probablement pas dans l'ensemble de la Vallée interandine une couche homogène de cangahua de même composition et de même âge, c'est à dire d'une même série éruptive, comme les séries de tepetates observées dans la région de Mexico et de Tlaxcala au Mexique. Cependant, à part la région de Bolivar, il est remarquable que la composition de la cangahua est peu variable de Cayambe à Riobamba.

Le matériau originel des cangahuas est peu altéré. Presque tous les minéraux et une large part des verres volcaniques sont inaltérés. Le taux de produit extrait par le réactif triacide, essentiellement les produits d'altération, varie de 25 à 35% (carbonates déduits). Le taux d'argile extractible varie de 6 à 15% ; exceptionnellement il peut atteindre 25% du matériau global. Ce produit est très siliceux. Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est de : 5,9 dans la cangahua supérieure et 5,7 dans la cangahua inférieure de Bolivar ; 4,6 à 4,8 dans celles de Cangahua et Cayambe ; 4,4 à 4,8 dans celles de Tumbaco-La Tola ; 4,5 dans celle d'Ambatillo ; 5,1 dans de Licto. Il s'agit d'un mélange d'argiles et d'un peu de silice, auquel s'ajoute éventuellement de la calcite.

Les minéraux argileux paraissent plutôt "désordonnés" en diffraction de rayons X. Il s'agit surtout d'une smectite (argile gonflante de type beidellite ferrifère et un peu magnésienne d'après sa composition chimique). Elle est assez nette dans les échantillons de Bolivar et du site de Cangahua, moins à Ambatillo, mal cristallisée à Licto. Il s'y ajoute un peu d'halloysite (0,7 mm) à Bolivar, Cangahua et Licto ; mais pas à Ambatillo. Il y a sans doute des traces d'allophane, au plus 0,2 à 0,3% du sol d'après l'analyse chimique sélective.

De la silice libre est présente en petite quantité. Il y a des traces de cristobalite (d'après RX), visible surtout dans la cangahua inférieure de Bolívar. Il y a nettement de la silice non cristalline (d'après l'analyse chimique sélective) : sous forme de gel (0,1 à 0,3%) et surtout d'opale (1 à 3% du sol). Elle est deux fois plus abondante dans la cangahua inférieure de Bolívar que dans la cangahua supérieure.

De la calcite est souvent présente en traces (1 à 3% du sol), dispersée dans les pores de la cangahua. Mais elle peut atteindre 40 à plus de 50% de matériau dans les encroûtements à la surface de la cangahua supérieure dans tous les cas observés, sauf Ambatillo.

#### **2.1.3.4. Genèse de la cangahua.**

Nous ne traitons que des formations supérieures à cangahua, datées entre 1 100 à 40 000 ans BP (groupe K de Hall et Mothes, 1996) ; celles qui apparaissent en surface après érosion du sol actuel. Les différentes études de ces matériaux, de Bolívar à Riobamba, ont montré qu'il proviennent probablement de dépôts de cendre volcanique consolidée ; mais aussi que leurs propriétés sont dépendantes de conditions climatiques. Leur formation serait due à un processus successivement vulcanologique puis pédologique.

##### *A. Influence du matériau originel et du mode de dépôt.*

###### A.1. Apports de la sédimentologie.

A partir de l'analyse granulométrique des sols et formations consolidées de la séquence de Bolívar et de diverses cangahuas d'Équateur, nous pouvons préciser le type de dépôt pyroclastique de ces formations. Sauf rares exceptions dans le sol supérieur, les courbes de fréquence de taille des particules montrent très clairement pour les matériaux les moins altérés, cendre, tuf et cangahua, une répartition bimodale, principalement de sable fin avec une médiane entre 150 et 200  $\mu\text{m}$ , et secondairement de limon fin avec une médiane entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ . Dans le matériau plus altéré (sol) de la même série de dépôt s'ajoute un mode d'argile centré vers 1  $\mu\text{m}$ , qui se développe aux dépens de celui de limon fin, donc par suite de l'altération des particules fines essentiellement de verres volcaniques. D'après les courbes de fréquence il apparaît une parenté évidente entre la cangahua ou le tuf peu altéré et l'horizon de sol meuble situé au-dessus ; ils proviennent de la même série éruptive.

Ce type de courbe de fréquence et de taille de particules caractérise des dépôts pyroclastiques de type nuée ardente et chute de cendre associée. Il suggère pour les formations à cangahua des éruptions très fortement explosives de type plinien, ultraplinien et phréatoplinien (Fisher et Schmincke, 1984). Selon Cas et Wright (1988), Lirer et al. (1996) ce type de distribution peut caractériser des éruptions phréatomagmatiques telles que celles observées lors des éruptions de la Soufrière de Saint Vincent (Caraïbes, 1979) ou de l'éruption célèbre du Vésuve (79 après J.C). Ces dépôts se signalent en outre par des formations de cinérite accrétonnée. Nous en avons observé dans les formations à cangahua des sites de Cangahua, Ambatillo et près de Licto ; en outre celles-ci présentent des verres basaltiques altérés en palagonite de couleur orange, signe également d'hydromagmatisme. Ces dépôts comportent fréquemment à leur base des formations consolidées, cinérites ou tufs, comme nous en avons observé au Nicaragua près du Volcan Masaya (Prat, 1991 ; Prat et Quantin, 1992) et dans les formations à tepetate du Centre Mexique (Quantin et al., 1992). Une cendre non consolidée de la même éruption peut recouvrir le dépôt consolidé ; son altération plus rapide formera un sol.

Ce type de distribution de particules ne caractérise pas un dépôt éolien de type loess, contrairement à l'hypothèse de divers auteurs, notamment de Miehl (1984) pour l'origine des tepetates, ou de Sauer (1971) pour celle de la cangahua. Car il n'y a pas ou très peu de limon grossier, entre 30 et 60  $\mu\text{m}$ , fraction qui abonde habituellement dans un loess (Pye, 1987). En outre les variations observées dans les séries de dépôts sont liées à la diversité régionale des foyers éruptifs (Hall et Mothes, 1996), non à un processus éolien.

### A.2. Apports de la pétrographie.

La microscopie révèle dans les horizons consolidés (cangahua, tuf) l'abondance du squelette minéral inaltéré ou peu altéré. Celui-ci paraît demeuré à sa place dans le dépôt pyroclastique initial, au sein de la matrice (distribution "porphyrique"), sans remaniement ni sédimentaire ni pédologique. Et surtout la matrice conserve la "texture" dense et massive, quoique microporeuse, d'un tuf. L'impact de la pédogenèse est limité à l'altération météorique des particules fines (< 10 µm) de verre, à une certaine fragmentation de la matrice par des fissures, une pénétration en tubes de racines et d'animaux, ainsi qu'en une accumulation d'argile, de calcite et de silice dans les pores. Près de Bolivar, Cangahua, Tumbaco et Licto, cet impact pédologique secondaire semble plus développé dans la cangahua supérieure, au contact du sol, que dans la cangahua inférieure.

### A.3. Absence de carbone organique.

La cangahua, du moins à sa base (et sauf pollution locale par des racines ou animaux), et les tufs altérés ne contiennent que des traces de carbone organique. Il est connu que les nuées ardentes de forte puissance brûlent et érodent la végétation et le sol superficiel (Cas et Wright, 1988). La très faible teneur en carbone organique de la cangahua implique donc qu'il ne s'agit pas d'un horizon de sol induré à posteriori, mais plus vraisemblablement d'un dépôt consolidé qui s'est altéré ensuite à la base d'un sol.

C'est également le cas des formations semblables de tepetate des régions de Mexico et Tlaxcala (Quantin et al., 1992), où cependant des phytolithes ont été observés (Hessmann, 1992, Bertaux et al., 1993) ; mais il s'agit probablement d'un résidu minéral de la combustion lors du dépôt des produits végétaux antérieurs, plutôt qu'un apport éolien (selon Hessmann) ou une formation ultérieure dans le sol.

### *B. Influence de la pédogenèse.*

Donc la pédogenèse a produit une altération évidente du tuf, à savoir : formation d'argile, fragmentation (effet gonflement-retrait), pénétration biologique, accumulation éventuelle d'argile, d'opale et de calcite dans les pores.

Mais surtout il y a une relation évidente et constante entre la nature des produits argileux d'altération et sa variation, et une séquence topo-climatique (Fig. 4), à savoir :

- En bas du piémont et climat semi-aride : une prédominance d'argiles riches en silice de type beidellite ou mal cristallisée et une certaine accumulation d'opale et de calcite.
- A mi-versant et en climat semi-humide : une abondance d'halloysite (argile proche de la kaolinite) et une certaine redistribution d'argile et d'oxyde de fer.
- En haut-versant et en climat perhumide : une prédominance d'allophane comme dans le sol actuel, ou éventuellement la présence mixte d'halloysite dans le tuf inférieur, plus ancien.

La plupart des produits d'altération ne sont donc pas hérités du tuf originel ni d'un peu probable dépôt de loess. Ils ont la même composition que l'horizon de sol au-dessus qui provient de la même série de dépôt pyroclastique.

Donc il est évident que les cangahuas étudiées proviennent d'un matériau déjà consolidé, probablement un tuf pyroclastique fin, qui a subi un impact limité de la pédogenèse à la base d'un sol. En effet la pédogenèse, conséquence de l'altération météorique et de l'activité biologique, se développe plus aisément dans les dépôts meubles et perméables de cendre que dans les matériaux consolidés et peu perméables. La formation superposée d'un horizon induré et d'un sol meuble s'explique par une succession lors de chaque série d'éruption pyroclastique de type nuée ardente d'une couche consolidée (de flux phréatomagmatique) et d'une couche meuble (chute de cendres).

De la situation topo-climatique dépendent donc la nature des argiles, le ciment et le degré d'induration de l'horizon induré. Un climat semi-aride en bas piémont a favorisé la consolidation et l'induration par des argiles imprégnées de silice non cristalline et éventuellement intercalées

de calcite. Un climat humide à l'amont a, au contraire, permis une altération plus profonde et développé ainsi la friabilité du tuf initial.

Il est ainsi possible, comme dans le cas des tepetates du Mexique, de distinguer deux types de cangahua, à savoir :

- En bas-piémont en climat semi-aride : un matériau un peu silicifié et dur de type "duripan", souvent encroûté de calcite en surface et dans les fentes, parfois aussi dans sa matrice, que l'on pourrait appeler "duripan calcarique".

- A mi-versant en climat semi-humide : un matériau argilifié, très peu ou non silicifié ni carbonaté, friable à l'état humide et dur à l'état sec, que l'on peut qualifier de fragipan.

Le fait que la cangahua supérieure soit souvent en bas du piémont encroûtée de calcaire, mais pas la cangahua inférieure ni le sol récent, a suggéré qu'elle se serait formée en climat un peu plus aride que la précédente ou que le sol actuel, du moins à sa phase terminale vers 14 000 ans BP (Quantin et Zebrowski, 1996, Winckell et al., 1993).

C'est la cangahua supérieure de type duripan, calcarique ou non, qui est la plus exposée en surface, après érosion à la partie inférieure des piémonts, et sur laquelle a porté notre expérimentation à Cangahua, Tumbaco (La Tola) et Licto.

## **2.2. PROPRIETES DE LA CANGAHUA SUPERIEURE.**

Nous n'avons que peu de données sur les propriétés de la cangahua supérieure. Les données antérieures de Colmet-Daage et al. (1969, 1973) et de Caujolle (1984) sont plutôt imprécises. La plupart des résultats obtenus récemment (De Noni et al 1996) et dans le cadre de ce programme européen concernent le type duripan, calcarique ou non, de la partie inférieure du piémont. Il s'agit du type de cangahua le plus fréquemment cultivé et sur lequel nous avons nos trois stations expérimentales, à Cangahua (Cayambe), La Tola (Tumbaco) et Licto (Riobamba). Nous présenterons aussi quelques données sur le fragipan observé dans le sol en mi-versant.

### **2.2.1. Cangahua supérieure du bas-piémont, de type duripan calcique.**

#### **2.2.1.1. Propriétés physiques.**

##### *A. Couleur.*

La couleur varie du brun sombre (Bolivar, Cangahua) au brun clair (La Tola) sans aucun rapport avec la teneur en carbone organique, toujours très faible.

##### *B. Densité apparente et porosité globale.*

La densité apparente mesurée sur des blocs de cangahua supérieure à Cangahua et à La Tola, est d'environ 1,5 g/cm<sup>3</sup> en moyenne, soit une porosité globale de 42% (densité réelle moyenne de ce type de matériau 2,65).

Une valeur moyenne de densité apparente de 1,7, soit une porosité globale de 34%, avait été mesurée (Caujolle, 1984) sur la cangahua de l'Ilalo, près de La Tola ; mais cette mesure sur prélèvement avec un cylindre est probablement trop élevée à cause de la compaction du matériau. La valeur de 1,5 est comparable à la valeur moyenne de 1,45 mesurée dans les tepetates de la région de Mexico (Quantin et al., 1992).

##### *C. Dureté.*

Des mesures de Caujolle (1984) sur la cangahua de deux sites près de l'Ilalo, avec un pénétromètre, donnent des valeurs en nombre de coups pour pénétrer 6,5 cm du matériau de 30 à 60 pour la partie superficielle un peu altérée, et de 80 pour la partie profonde. Il s'agit probablement du matériau sec qui est donc très dur. D'autres mesures sur des cangahuas peu et très calcaires montrent que la dureté augmente significativement avec la teneur en calcaire.

#### D. Perméabilité.

Les mesures de Caujolle (1984) sur la même cangahua nue, par la méthode de Müntz, avec double cylindre, donnent des valeurs de vitesse d'infiltration très faibles, de 1 à 3 mm/heure. La perméabilité est restreinte par une macroporosité très faible, limitée à des fissures. La très faible accessibilité à l'air et à l'eau de ce matériau, ainsi que la dureté à la pénétration des racines sont les causes premières de la stérilité de la cangahua.

#### E. Granulométrie.

La teneur en argile (Tab. 4) est le plus souvent proche de 10% ; elle varie de 6 à près de 20%. Mais la teneur en limon fin est abondante et la fraction fine inférieure à 20  $\mu\text{m}$  (A + Lf) varie de 25 à 55% ; elle est proche le plus souvent de 30 à 35%. La teneur en sables varie de 35 à 65% ; elle est souvent proche de 50%. La texture est limoneuse ou limono-sableuse. L'abondance de la fraction fine assure une bonne cohésion ; elle procure une micro-porosité importante et une capacité de rétention en eau notable. C'est un facteur positif pour une réhabilitation en sol agricole.

Tableau 4. Granulométrie de cangahuas de type duripan et fragipan, en % sol sec (à 105°C).

Site	A	Lf	Lg	Sf	Sg	A + Lf	Lf/A
Bas-piémont ; duripan							
Bolivar - cangahua supérieure	19.3	36.1	11.3	23.6	9.7	55.4	1.9
- cangahua inférieure	15.8	20.0	5.1	26.3	32.8	35.8	1.3
Cangahua	6.9	18.2	9.4	25.1	40.3	25.1	2.6
Cayambe	12.5	27.0	9.7	27.6	23.1	39.5	2.2
La Tola	6.7	30.1	10.8	35.2	17.1	36.8	4.5
Ilalo	7.9	22.3	10.1	28.3	31.4	30.2	2.8
Licto	11.8	35.5	10.8	18.2	22.1	47.3	3.0
Mi-versant ; fragipan							
Bolivar - 2 - 4	14.5	23.8	5.7	18.9	37.1	38.3	1.6
- 5	21.1	23.1	8.7	24.2	22.9	44.2	1.1
- 6	13.7	27.2	10.9	34.2	13.8	40.9	2.0
Bolivar -5 - 4	17.2	15.2	5.1	31.4	31.0	32.4	0.9
- 6	23.6	40.7	6.3	19.1	10.3	64.3	1.7

A : < 2  $\mu\text{m}$  - Lf : 2-20  $\mu\text{m}$  - Lg : 20-50  $\mu\text{m}$  - Sf : 50-200  $\mu\text{m}$  - Sg : 200 à 2 000  $\mu\text{m}$

#### F. Capacité de rétention en eau.

La capacité de rétention en eau au champ mesurée sur la cangahua de l'Ilalo, proche de La Tola, (Caujolle 1984) varie de 19 à 21% (en poids de sol sec à 105°C). Après défonçage et fragmentation cette capacité s'élève à près de 24%. C'est un facteur favorable pour la réhabilitation d'un sol agricole fertile.

#### G. Stabilité structurale.

La stabilité à l'eau des agrégats supérieurs à 2 mm a été mesurée avant et après les traitements par HCl pour dissoudre le ciment calcaire, puis par NaOH pour dissoudre le ciment siliceux, sur : une cangahua peu calcaire de la région de Cayambe ; une cangahua peu calcaire et une autre très calcaire de la région de Tumbaco (Tab. 7).

La cangahua peu calcaire est instable à l'eau. Son instabilité augmente après traitement acide et dissolution du calcaire ; elle est quasi totale après dissolution de la silice non cristalline

par la soude. Son comportement est intermédiaire entre celui d'un duripan et d'un fragipan. Cette instabilité est la cause première de l'érodibilité, lorsque la cangahua est travaillée.

La cangahua très calcaire est instable à l'eau. Elle demeure partiellement stable après les traitements acide et soude. Il s'agit bien d'un duripan, particulièrement dur, qui nécessiterait un traitement prolongé pour devenir friable. Ce matériau est résistant à l'érosion.

Tableau 5. Stabilité à l'eau d'agrégats > 2 mm, en % de sol sec à 105°C.

Echantillon	Eau	HCl	NaOH
Cayambe, peu calcaire	30 - 50	5 - 14	0 - 2
Tumbaco, peu calcaire	20 - 50	15 - 40	0 - 5
Tumbaco, très calcaire	90 - 95	60 - 65	55 - 60

### 2.2.1.2. Propriétés chimiques.

#### A. Calcaire.

Le taux de calcaire est de 40 à près de 60% dans la partie supérieure encroûtée de la cangahua de Bolivar et de Cangahua, 15 à 20% dans celle de l'Ilalo, mais seulement 1 à 2% dans la masse de la cangahua supérieure et de la cangahua inférieure.

#### B. pH (eau).

Le pH varie de 7,8 à 8,9 selon la teneur en calcaire : à Bolivar 8,6 dans la cangahua supérieure très calcaire, 8,3 dans la cangahua inférieure peu calcaire ; à Cayambe et Cangahua de 8,4 à 8,6 ; à l'Ilalo de 8,2 en profondeur à 8,9 en surface ; près de La Tola 7,8 dans la cangahua non calcaire et 8,3 dans celle encroûtée de calcaire.

#### C. Carbone et azote.

Le taux de C organique est très faible. Sauf pollution superficielle, il varie de 0,1 à 0,2% du sol : à Bolivar 0,17 dans la cangahua supérieure, 0,14 à 0,19 dans la cangahua inférieure ; à La Tola 0,19 ; à l'Ilalo 0,11. Mais ce taux peut être augmenté et varier de 0,2 à 0,5% dans la cangahua supérieure qui a été travaillée avec une certaine incorporation du sol résiduel pour nos stations expérimentales de Cangahua, La Tola et Licto.

Le taux d'azote total, sans pollution superficielle, varie de 0,01 à 0,03%. Dans la cangahua cultivée il atteint de 0,04 à 0,06%. La carence en azote est la deuxième cause de la stérilité de la cangahua.

#### D. Phosphore "assimilable".

Le taux de P extrait par la méthode Olsen est inférieur à 10 ppm dans la cangahua non cultivée. C'est un critère de déficience majeure en phosphore disponible pour la plante et c'est le troisième facteur de stérilité de la cangahua. Ce taux augmente à 20 ppm et plus dans la cangahua travaillée pour notre expérimentation à La Tola et à Cangahua, sans atteindre cependant un niveau suffisant. Le phosphore minéral provenant de l'apatite représente 0,2 à 0,3% (en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) du sol ; mais il est trop lentement soluble pour être disponible à la nutrition des plantes.

#### E. Capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables.

Les données antérieures sont aléatoires et peu fiables. La CEC mesurée par extraction avec l'acétate d'ammonium a été largement surestimée (+ 50%) si on la compare à un extrait au pH du sol (cobaltihexamine ou chlorure de barium) ; les taux de Ca et Mg échangeables sont aussi souvent surestimés en présence de bicarbonates dans ces matériaux. Nous n'avons retenu que quelques résultats obtenus par échange au pH du sol.

La CEC varie de 16 me/100 g (cmol<sup>+</sup>/kg) dans la cangahua supérieure de La Tola et de l'Ilalo à 22 me/100 g dans la cangahua supérieure de Bolivar et du site de Cangahua, et à 17 me/100 g dans la cangahua inférieure de Bolivar (Tab.6).

Le taux de Ca échangeable en me/100 g varie de 9 à La Tola, à 14 dans la cangahua supérieure de Bolivar et du site de Cangahua et à 7 dans la cangahua inférieure de Bolivar. Le taux de Mg échangeable varie de 5,7 à La Tola, à 5,5 à Bolivar et à 7,3 à Cangahua. Le taux de K échangeable varie de 0,4 à La Tola à 1,5 à Bolivar et 1,6 sur le site de Cangahua. Le taux de Na échangeable varie de 0,5 à La Tola, à 0,6 à Bolivar et 0,3 sur le site de Cangahua.

Les valeurs de capacité d'échange cationique sont relativement élevées en comparaison du taux d'argile ; elles équivalent à environ 1 me par gramme d'argile (caractéristique d'argiles de type smectite à haute charge). Elles assurent une bonne capacité de rétention des bases échangeables utiles à la nutrition des plantes, notamment en calcium, magnésium et potassium. Il y a un bon équilibre du rapport Ca/Mg et K/Ca + Mg. Le taux de K varie sensiblement, mais sans atteindre le seuil de déficience pour la nutrition des plantes. C'est un facteur favorable pour la productivité potentielle de la cangahua cultivée.

Tab. 6. CEC et bases échangeables de cangahuas de type duripan et fragipan en me/100 g de sol.

Sites	CEC	Ca	Mg	K	Na	S	S/T
<b>Bas-piémont ; duripan</b>							
Bolivar - cangahua supérieure	21.8	14.2	5.5	1.5	0.6	21.8	100
- cangahua inférieure	17.5	6.8	6.3	1.7	2.4	17.2	98
Cangahua	22.0	14.2	7.3	1.6	0.3	23.4	100
La Tola	16.2	9.1	5.7	0.4	0.5	15.7	97
<b>Mi-versant ; fragipan</b>							
Bolivar. 2 - 4	8.6	5.5	2.2	0.4	0.3	8.4	97
Bolivar. 5 - 5	10.8	5.8	3.0	0.5	0.2	9.5	88

S : Somme des bases - T : CEC - S/T : taux de saturation en bases %

## 2.2.2. Cangahua de mi-versant de type fragipan.

### 2.2.2.1. Propriétés physiques.

Ce type de cangahua, recouverte par une épaisse couche de sol, est toujours friable, dans son état naturel. Sa dureté est variable. Il est également massif, peu perméable et peu pénétré par les racines. Sa texture (Tab. 4) est limoneuse à limono-sableuse. Il contient de 14 à 24% d'argile et 32 à 64% de fraction fine inférieure à 20 µm. Cette texture n'est pas significativement différente de celle de la cangahua du bas-piémont.

### 2.2.2.2. Propriétés chimiques.

La cangahua de mi-versant ne contient pas de calcaire, pas ou très peu de silice non cristalline. Le pH varie de 6,6 à 7,1. Les taux de carbone organique et d'azote total, respectivement de 0,11 à 24% et de 0,01 à 0,02% sont très faibles. Il y a carence en azote. Le taux de phosphore assimilable est probablement faible. La capacité d'échange cationique varie de 8 à 11 me/100 g (Tab. 6). Cette valeur est deux à trois fois plus faible que dans la cangahua du bas-piémont, en raison du type d'argile l'halloysite dont les propriétés de charge sont bien inférieures à celles des smectites. Mais le taux de saturation en bases échangeables demeure élevé et proche de 90%. En conséquence les teneurs en Ca, Mg et K échangeables, respectivement de 5,6, 2,3 et 0,4-0,5 me/100 g demeurent assez élevées pour assurer une bonne fertilité potentielle. Les deux facteurs limitants sont la carence en azote et la déficience en phosphore assimilable.

## 2.3. GEOGRAPHIE ET CARTOGRAPHIE.

Cette partie de l'étude a été réalisée et rédigée par C. Zebrowski. Après une introduction sur le milieu physique, elle présente une nouvelle cartographie des sols à cangahua, puis une évaluation de l'extension des affleurements de cangahua par érosion des sols au cours des trente dernières années ainsi que des surfaces réhabilitées pour l'agriculture ou reboisées.

### 2.3.1. Milieu physique.

#### 2.3.1.1. Géomorphologie et localisation des sols à cangahua.

L'Equateur est traversé du Nord au Sud par la Cordillère des Andes, barrière montagneuse constituée par une "armature" de roches anciennes, volcano-sédimentaires et métamorphiques (Fig.7). Dans sa partie septentrionale ce substrat est couronné par deux alignements parallèles de volcans dont l'altitude culmine entre 4 300 et 6 300 m et qui sont à l'origine des nombreuses projections pyroclastiques qui couvrent le tiers du pays. Les sols volcaniques indurés ne se trouvent que dans la partie septentrionale du bassin inter-andin (Fig.8), entre Tulcan (0° 48' nord) et Chunchi (2° 17' sud). Le fond du bassin, relativement plat, se situe à une altitude comprise entre 2 200 et 2 500 m. Il est parfois entaillé de profondes vallées dont l'altitude peut s'abaisser à 1 600 m. Les versants orientaux et occidentaux, de part et d'autre du bassin, s'élèvent jusqu'à une altitude de 3 600 à 3 800 m. Au-delà de cette limite se trouve les paramos, plateaux doucement ondulés, couronnés par les volcans. La superficie de ce bassin inter-andin volcanique est de 1 122 300 ha. Les sols à cangahua sont situés essentiellement sur les versants, notamment les piémonts.

#### 2.3.1.2. Géologie : les projections pyroclastiques.

Le volcanisme récent ou Quaternaire est caractérisé par l'abondance d'émissions sous forme de laves et surtout de projections pyroclastiques. Deux générations de pyroclastes ont été distinguées (Winckell et Zebrowski, 1992). L'une, qualifiée d'ancienne, a débuté il y a plus de 40 000 ans et a pris fin aux environs des années 11 000 BP, c'est à dire à la fin de l'époque glaciaire. La seconde dite récente a débuté dans les années 8 000 BP et a donné des dépôts historiques. Les projections anciennes ont atteint une extension particulièrement importante. Elles ont été identifiées sur de grandes épaisseurs à l'Ouest de la cordillère occidentale jusqu'à une verticale passant par Quinindé, au Sud jusqu'à la latitude de Chunchi, à l'Est jusqu'au pied des versants orientaux de la Sierra. Elles ne se retrouvent par contre presque jamais sur les paramos qui étaient à l'époque presque couverts par les glaciers. Dans les bassins interandins les pyroclastes présentent des épaisseurs pouvant atteindre 30 à 40 m, très localement une centaine de mètres. Ils correspondent à des émissions de type phréatomagmatique ou à des retombées aériennes froides, le plus fréquemment à une alternance des deux. Les formations dénommées cangahua sont toujours localisées dans ces matériaux. Les projections récentes ont une extension sensiblement égale à celle des précédentes, qu'elles recouvrent donc. Mais postérieures à la fin de la dernière glaciation, elles recouvrent également le paramo où elles reposent sur le substrat métamorphique râpé par les glaciers. Leur épaisseur est moindre et n'atteint, dans le cas des dépôts couvrant les paramos, que 2 à 4 mètres. Elles correspondent uniquement à des retombées aériennes de type lapilli et cendre. Parmi ces phases de retombées récentes, deux ont atteint une extension importante. La première a été datée de 2 600 ans, la seconde de 1 600 ans (Winckell, Zebrowski, Delaune, 1993). Les sols que l'on observe sont donc des sols composés : le sol supérieur est issu des pyroclastites récentes, le sol enterré des pyroclastites anciennes.

#### 2.3.1.3. Le climat.

Le climat du bassin septentrional interandin est tropical d'altitude. Il est caractérisé par une saison des pluies d'octobre à mai et par deux saisons sèches : l'une, bien marquée, de juin à septembre ; la seconde, moins prononcée, en décembre-janvier (Figure 9). Les climats se



Figure 7 Carte schématique de l'Equateur.

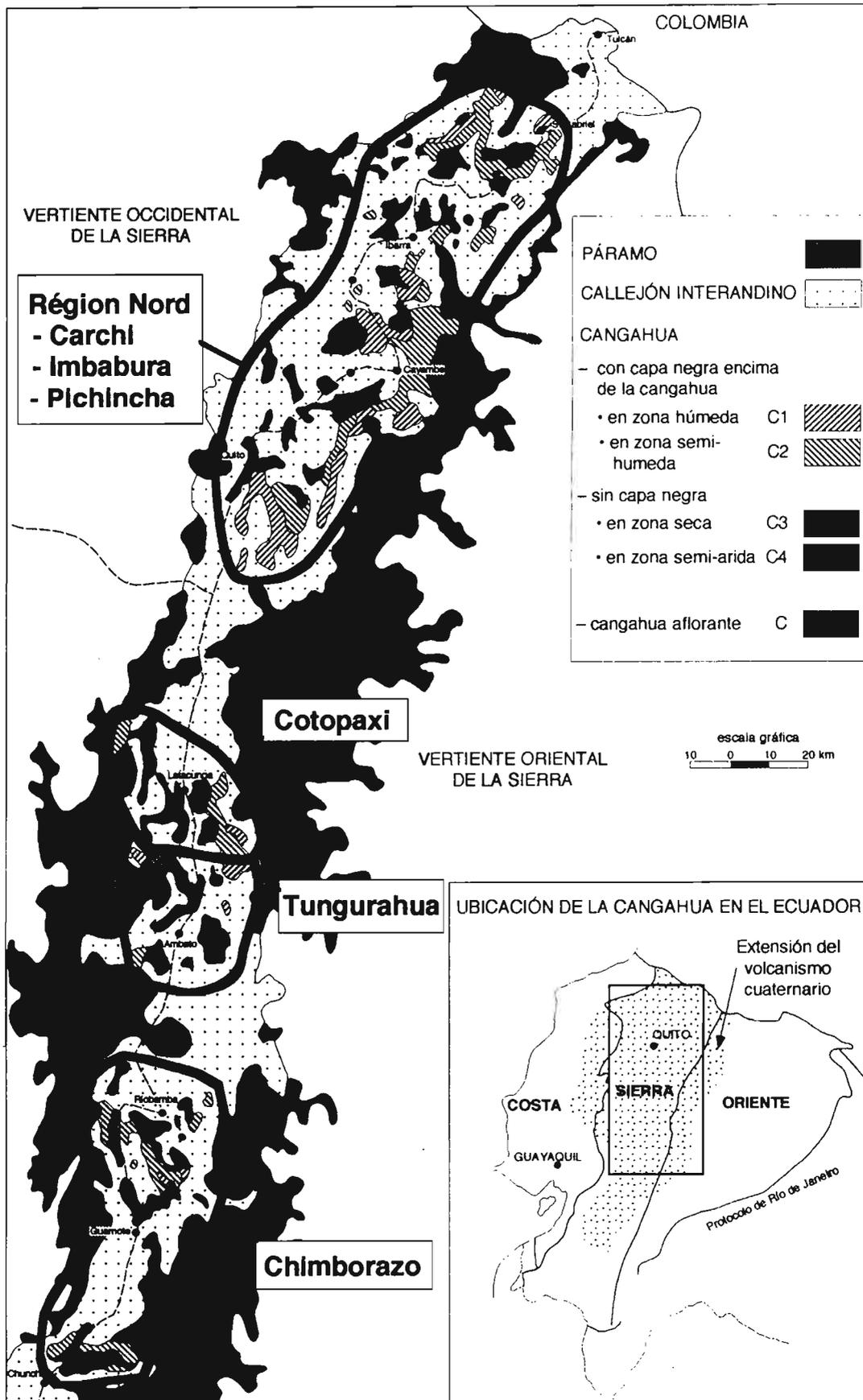


Figure 8 Carte de localisation des sites d'enquêtes.  
Carte des sols volcaniques indurés en Equateur.

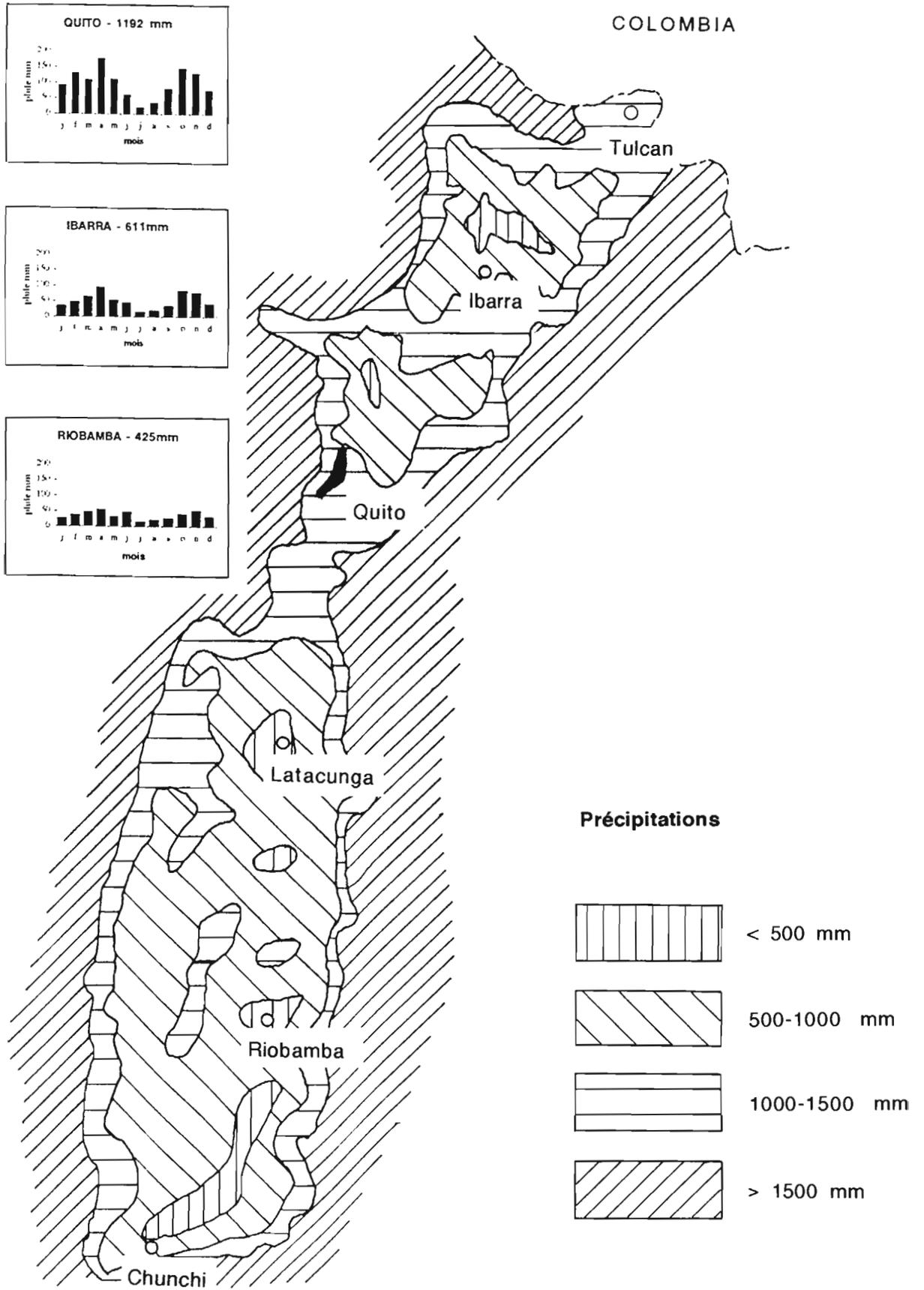


Figure 9 Les précipitations.

distribuent en réalité selon une topoclimoséquence. Le total annuel des précipitations est inférieur à 500 mm dans les zones les plus basses et atteint 1 500 mm en altitude (Cadier et al., 1978). Le nombre de mois secs diminue donc de bas en haut de séquence (selon Cadier et al., 1978, le mois sec correspond à celui où l'évaporation potentielle moyenne est supérieure aux précipitations moyennes mensuelles). En fonction de l'altitude on passe donc progressivement d'un climat sub-aride à un climat humide voire perhumide sur le paramo. Les températures varient peu au cours de l'année (moins de 5°) et la température du sol est très proche de celle de l'air. Elles diminuent avec l'altitude de telle sorte que le régime de température du sol, isohyperthermique pour des altitudes inférieures à 1 800 m, passe par les stades isothermique (entre 1 800 et 3 200 m) et isomésique (entre 3 200 et 3 800 m) avant d'atteindre le régime isofrigid, à la limite des paramos, à près de 3 800 m.

#### **2.3.1.4. Végétation et cultures.**

Le bassin interandin en dessous du paramo est généralement cultivé, même sur pentes fortes. Seules quelques pentes à très fortes déclivités (supérieures à 100%) sont encore couvertes par la végétation naturelle. Les cultures : Elles couvrent une surface totale de 857 000 ha et se répartissent suivant la climotoposéquence suivante :

- Dans les régions semi-arides, voire arides, localisées à une altitude inférieure à 1 800 m, l'irrigation est nécessaire. La canne à sucre est cultivée dans de grandes exploitations.

- L'étage situé entre 1 800 et 3 000-3 200 m est caractérisé par la présence du maïs associé ou non avec le haricot. Néanmoins les fonds du bassin sont généralement couverts de prairies, souvent irriguées, destinées à l'élevage laitier. A plus de 3 200 m le cycle du maïs s'allonge démesurément et cette culture n'est plus qu'exceptionnellement rencontrée.

- Entre 3 200 et 3 600 m, parfois 3 800 et même 3 900 m, c'est l'étage de la pomme de terre et de la fève qui marque la limite altitudinale des cultures.

- Le paramo, formation graminéenne herbacée à *Stipa hichu*, caractérise les plateaux froids.

#### **2.3.1.5. Les sols et la cangahua.**

Origine des sols et de la cangahua : Les sols se sont formés à partir des deux séries de dépôts pyroclastiques (l'ancienne du Pléistocène supérieur, la récente de l'Eocène). Ce sont donc des sols complexes. Une accalmie dans le dépôt des deux séries a permis la pédogénèse des pyroclastes anciennes de telle sorte qu'il est fréquent d'observer un sol enterré sous celui formé à partir des projections holocènes. Les horizons indurés (cangahua) sont localisés dans les dépôts du Pléistocène supérieur. Si leur dureté est proportionnelle à la durée de la saison sèche, il est certain que la nature des projections, en particulier la présence de tuf, influe directement sur la dureté de l'horizon. Contrairement aux projections anciennes qui sont très épaisses, les projections récentes le sont beaucoup moins. Les sols qui se sont formés à partir de ces projections ne présentent en effet pas plus de deux mètres d'épaisseur en altitude, de 30 à 40 cm dans les régions basses et sèches. Il est généralement possible d'identifier au moins deux séries de dépôts dans ces pyroclastes récents qui correspondent à des retombées froides de cendres, plus rarement de lapilli.

Les sols : Ils se répartissent le long des versants, comme les cultures, suivant la climotoposéquence. Il faut distinguer les sols supérieurs formés à partir des pyroclastites récentes de ceux sous-jacents issus des pyroclastites anciennes.

##### *A. Les sols sur pyroclastites récentes.*

L'épaisseur des sols formés à partir de ces retombées est étroitement liée à l'altitude. Les sols les moins épais sont localisés en bas de séquence, les plus épais en altitude. L'altération des pyroclastites est en effet moins rapide en climat sec et l'érosion y est plus forte. Mais l'épaisseur des sols dépend également de l'éloignement par rapport au volcan. Dans la partie

inférieure des bassins situés près des volcans récents les sols sont relativement épais alors que dans les régions éloignées de ces centres d'émission les sols sont moins épais. De même, avec l'altitude croissante, la couleur des sols devient plus foncée du fait de l'augmentation des teneurs en matière organique et surtout en fonction de la nature des composés humiques, la texture s'affine et le pH ainsi que le taux de saturation du complexe absorbant diminuent.

De bas en haut de versant on rencontre (Fig. 10) :

- des sols peu évolués (Inceptisols) en climats sub-aride et sec,
- des sols isohumiques (Mollisols) en climats sub-humide et humide,
- des andosols dans les climats plus humides. Ces andosols, légèrement désaturés dans les parties les moins humides, le deviennent fortement dans les zones les plus élevées et passent à des andosols désaturés souvent perhydratés sur le paramo.

### *B. Les sols enterrés sur pyroclastites anciennes.*

La différenciation des horizons des sols développés sur les matériaux anciens augmente avec l'altitude. Dans les régions sub-arides et sèches (régimes d'humidité usti-aridique et ustique), les matériaux sont peu altérés; les différents dépôts sont parfaitement identifiables, les sols correspondent à une succession d'horizon C avec absence d'horizon A et B. Ces horizons sont très compacts et durs ; les plus durs, souvent les moins altérés, correspondent à des tufs facilement identifiables. La présence de carbonate de calcium est générale dans ces matériaux.

En région sub-humide (régime d'humidité usti-udique) les sols présentent une succession d'horizons bien différenciés et comportent:

- un horizon humifère noir argileux très massif et compact
- un horizon B également argileux et très massif à l'intérieur duquel se trouvent des concrétions de carbonate de calcium dont la partie basale forme un réseau hexagonal en surface du sol quand les horizons A et B ont été érodés.
- une succession d'horizons C très durs.

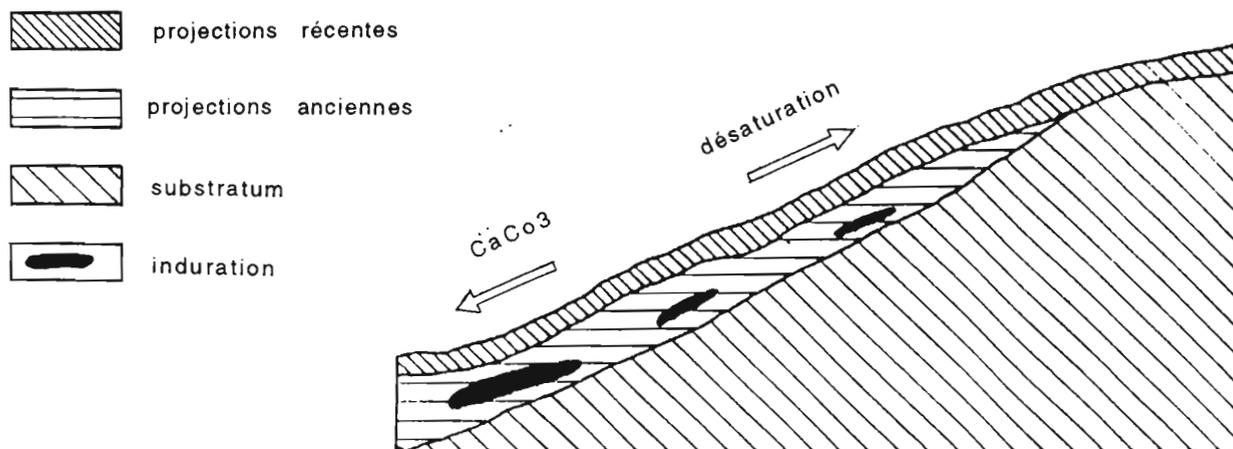
En région plus humide, en altitude (régime d'humidité udique), les sols sont très semblables, ils se différencient des précédents par l'absence de concrétions de calcaire et par une altération plus forte des horizons C qui restent massifs mais moins durs et qui passent progressivement à des horizons non indurés. Il est parfois difficile voire impossible de distinguer les différents dépôts.

Tout comme pour les sols développés sur pyroclastites récentes, le pH et le taux de saturation des sols sur pyroclastites anciennes diminuent avec l'altitude.

#### **2.3.1.5. La cangahua : une définition différente suivant les auteurs.**

La cangahua, horizon durci et "stérile", est donc localisée dans les pyroclastites anciennes. Elle correspond généralement aux horizons "C" pouvant provenir de tufs ou de dépôts de pyroclastites non cimentés mais durcis du fait de la sécheresse. C'est ainsi que Vera et López (1992) distinguent les cangahuas issues de flux pyroclastiques de celles originaires de retombées pyroclastiques. Sous des conditions climatiques égales ces dernières sont toujours moins dures que celles provenant de tufs. Ces auteurs extrapolent d'ailleurs le terme de cangahua à tout matériau volcanique durci (parce qu'en région sèche) et incluent sous cette dénomination les coulées de boue ainsi que des matériaux colluvionés. Dans ses descriptions de profil, Colmet-Daage appelle cangahua tout horizon dur rencontré dans le profil. Bien que ces horizons correspondent toujours aux pyroclastites anciennes il est rarement spécifié si ce sont des horizons "C" ou déjà un "B". Les paysans équatoriens n'hésitent pas à appeler cangahua l'horizon humifère des sols enterrés, ce dernier étant plus massif et dur que le sol supérieur. Ils la dénomment cangahua noire ou "chocoto". Enfin les géologues de la DGGM (Dirección General de Geología y Minas) regroupent, dans les légendes des cartes géologiques, toutes les formations pyroclastiques anciennes sous la dénomination de "formation cangahua". Custode et al. (1992) sont très proches de ce point de vue et proposent de définir la cangahua comme "un sol ancien et induré". Nous préférons limiter le terme de cangahua, comme nous l'avons fait pour le tepetate du Mexique, aux horizons C de tuf ou cinérite consolidée.

Altitude (m)	2200		3200		3600-3800
P (mm)	500		1000		1500
Végétation	étage du maïs		étage de la pomme de terre		páramo
Climat	aride	sub-aride sec	sub-humide	humide	très humide
Sol supérieur	Peu évolué		Isohumique	Andosol désaturé	Andosol hydraté



sol inférieur	horizons très durs		horizons durs	horizons peu durs	sans horizon dur
Sigle des sols (cf. carte)	C 4	C 3	C 2	C 1	

Figure 10 Coupe schématique de la climatoséquence.

## **2.3.2. Cartographie des sols à cangahua.**

### **2.3.2.1. Motivation.**

Les études pédologiques antérieures (1974-1984), réalisées par PRONAREG-ORSTOM, ont donné lieu à l'élaboration de cartes pédologiques à 1/50 000 dans la Sierra et à 1/200 000 ou 1/250 000 sur l'ensemble du pays Colmet-Daage et al. (1974-84). Les différents types de sol à cangahua étaient bien répertoriés mais les cartes à 1/50 000 sont incomplètes et les cartes à 1/200 000 trop synthétiques. L'élaboration de documents, plus orientés sur le thème de la cangahua, s'avérait nécessaire afin de déterminer de façon précise la localisation des sols à cangahua. Ces documents avaient pour but de :

- déterminer l'extension des sols à cangahua et des zones érodées,
- fournir aux instances chargées de mettre en valeur les zones érodées un document actualisé concernant entre autres le nombre d'hectares de sols à mettre en valeur,
- servir de base pour la localisation des sites expérimentaux et des zones à cangahua où les enquêtes socio-économiques devaient être réalisées,
- servir de "vérité-terrain" pour les travaux réalisés à partir des images satellites (De Noni et Viennot, 1996).

### **2.3.2.2. Méthodologie**

Une première carte de localisation des sols à cangahua a été élaborée à l'échelle du 1/1 000 000 (Fig. 8) à partir des cartes à 1/200 000. Cette esquisse cartographique, très simplifiée mais utile dans un premier temps pour visualiser l'extension des zones à cangahua, montre que les sols présentant des horizons indurés à faible profondeur (< 70 cm) couvrent près du quart du couloir interandin septentrional (de Chunchi à Tulcan), situé en dessous des paramos.

Une carte plus précise, réalisée à partir des cartes de sols à 1/50 000, a ensuite été élaborée. Sa réalisation a comporté les étapes suivantes :

- Réduction à 1/100 000 des cartes de sol à 1/50 000 existantes.
- Coloriage des réductions en fonction d'une légende établie après avoir regroupé certaines unités de la légende des cartes à 1/50 000.
- Nouveau dessin, à l'échelle de 1/100 000, d'une carte des sols. Quelques simplifications ont été apportées dans le contour des unités, mais surtout, les vides ont été comblés à l'aide de documents complémentaires et de quelques reconnaissances que nous avons effectué sur le terrain.

Nouvelle réduction, mécanique, jusqu'à l'échelle du 1/400 000 pour disposer d'un document plus facilement manipulable. Ce dernier document a été scanné et mis sur ordinateur ; ce qui a permis d'évaluer et de quantifier l'extension des différents types de sol à cangahua de façon précise.

### **2.3.2.3. Les unités cartographiques.**

Tous les sols localisés en dessous du paramo sont donc des sols composés. Dans la légende des cartes de sols à 1/50 000 les sols dits à cangahua (sols "C") correspondent aux sols dont l'horizon induré apparaît à moins de 70 cm de profondeur. Ils sont généralement localisés dans les parties inférieures des versants interandins. En altitude, les sols récents sont plus épais, les sols enterrés sont suffisamment altérés pour que l'agriculture ne soit pas gênée par la présence d'un horizon dur de telle sorte que ces sols ont été regroupés dans d'autres catégories (sols "M" et "H" des cartes à 1/50 000). Les sols "C" des cartes à 1/50 000 ont été divisés en sous-unités en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques, de leurs régimes de température et d'humidité ainsi que de la profondeur à laquelle apparaît la cangahua. Dans la carte de synthèse (Fig. 8), nous avons regroupé tous les sols en 5 catégories (C1, C2, C3, C4 et C). La correspondance entre les sigles des cartes de synthèse et ceux des cartes à 1/50 000 est donnée dans le tableau 7. Néanmoins dans la carte détaillée, donnée en annexe, nous avons

tenu compte de la profondeur du sol supérieur et avons distingué, pour C3 et C4, les sols dans lesquels l'horizon dur apparaît à plus de 20 cm (C31 et C41) de ceux dans lesquels il apparaît à moins de 20 cm (C32 et C42) (cf légende de la carte).

Tableau 7. Correspondance entre les sigles des cartes à 1/50 000 et des cartes de synthèse.

Profondeur à laquelle apparaît la cangahua	Régime d'humidité du sol			
	Usti-aridique	Ustique	Usti-udique	Udique
<b>Sigles des cartes à 1/50 000</b>				
	Régime de température : Isothermique		Isomésique	Isomésique
à 70 cm	Cq	Cd	Cm	Cv, Cw
à 40 cm	Cu	Cc	Cn	Ci, Cj, Cr
à 20 cm	Cy	Cb	Cp	Cs
à 10 cm		Ca		
affleurant			C	
<b>Sigles de la carte de synthèse à 1/1 000 000</b>				
Cangahua en profondeur	C4	C3	C2	C1
Cangahua affleurante			C	

Pour chaque série, nous rappelons les principales caractéristiques, résumées également dans le tableau 8.

*- Unité C4*

Elle correspond aux sols des régions semi-arides présentant un régime d'humidité usti-aridique. Les pyroclastites anciennes sont peu altérées et ne présentent pas d'horizon humifère noir. Les carbonates de calcium sont présents dans tout le profil. L'horizon supérieur, développé à partir des cendres récentes est brun clair, sableux fin. Le passage au paléosol est très brutal. Celui-ci est très compact, dur ; les teneurs en argile y sont inférieures à 10%, celles en limon peuvent atteindre 40%. Les taux de matière organique sont faibles (0,5 à 2%). Les teneurs en bases échangeables sont élevées (13,5 à 30 mé/100 g) et le complexe d'échange est toujours saturé. Le pH est supérieur à 7 dans tout le profil. Les carbonates de calcium sont présents sous forme de mycélium dès la surface.

*- Unité C3*

Elle regroupe les sols à régime d'humidité ustique. Les pyroclastites anciennes sont toujours peu altérées. Les sols sont peu différents des précédents; mais les carbonates de calcium sont souvent absents des horizons de surface et le pH présente des valeurs un peu plus basses. Il est neutre à faiblement acide en surface, augmente en profondeur.

*- Unité C2*

Elle correspond à des sols localisés en région encore sèche mais dont le régime hydrique est usti-udique. Le sol supérieur récent est brun foncé à noir, limono-sableux, légèrement plus argileux et noir en profondeur. La transition avec le paléosol est assez nette, de telle sorte qu'il est possible de distinguer l'origine des matériaux. Le paléosol est composé d'un horizon humifère noir argileux auquel fait suite un horizon (B) massif, jaunâtre, argileux (au moins 20% d'argile et 40 à 60% de limons) avec parfois des concrétions calcaires. La succession d'horizons C, comportant parfois des concrétions calcaires, est parfaitement reconnaissable. Les taux de matière organique sont plus élevés que dans les sols précédents (1,5 à 6,9%). Les teneurs en bases échangeables restent élevées (13,5 à 29 mé/10 g) du fait de la texture plus fine. Le taux de saturation est compris entre 62 et 96 dans le sol supérieur, légèrement inférieur à 100 dans le paléosol. Le pH, légèrement acide en surface est voisin de la neutralité dans le paléosol.

Tableau 8 : Caractéristiques des sols.

Régime d'humidité	Usti-aridique	Ustique	Usti-Udique	Udique
-------------------	---------------	---------	-------------	--------

### Caractéristiques morphologiques

Sols de surface	Couleur	Brun		Brun foncé à noir	
	Texture en surf	Sableux fin		Limono-sableux	
	Horizon argilique	Absent		Présent	
Sols enterrés	Matériaux originels	Peu altérés		Bien altérés	
				Profils différenciés (A-B)	
	Texture	Limono-sableux (A<10%, L= 25-40%)		Limoneux fin (A=20%, L=45-60%)	
CaCO <sub>3</sub>	mycélium dès la surface	concrétions possibles en profondeur		Absent	

### Caractéristiques analytiques des sols de surface

M.O. (%)	moy 1,48 med 1,55 (0,5-2,2)	moy 1,36 med 1,22 (0,7-2,4)	moy 3,7 med 4 (1,5-6,9)	moy 5,3 med 4,9 (3,2-8,7)
pH	8-9 dans tout le profil		6,5-7 en surface voisin de 7 en profondeur	
B.E. (mé/100g) en "B"	moy 19,3 med 17 (13,4-30)	moy 9 med 9 (5-13,1)	moy 18,5 med 18 (13,5-29)	moy 12,5 med 12 (7,5-18)
Taux de saturation	saturé		moy 82 med 87 (62-96)	moy 65 med 62 (52-77)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Truog)	moy 12,2 med 10,8 (4,2-29)			

<b>Classification</b>	Durustoll	Durustoll	Durustoll	Duriudoll
-----------------------	-----------	-----------	-----------	-----------

<b>Sigles</b>	C4	C3	C2	C1
---------------	----	----	----	----

#### - Unité C1

Elle est localisée dans les régions humides; le régime hydrique des sols est nettement udique. Le sol récent est encore plus noir, surtout en profondeur (2,5Y2/0) où les revêtements argileux sont nombreux, de telle sorte que la transition avec le paléosol est graduelle et qu'il est parfois difficile de reconnaître ce qui provient des matériaux récents et des anciens. Le paléosol, assez semblable au précédent dans la succession des horizons, est caractérisé par une altération plus forte, qui se traduit par une plus grande épaisseur de l'horizon B, et par l'absence de concrétions calcaires. Les taux de matière organique sont encore plus élevés. Les teneurs en bases échangeables sont plus faibles (7,5 à 18 mé/100 g) ainsi que le taux de saturation du complexe absorbant (52 à 77% dans le sol supérieur, voisin de 80% dans le paléosol). Le pH, acide en surface, reste légèrement acide (6,5) en profondeur, y compris dans le paléosol.

### - Unité C

Elle correspond à l'ensemble des zones érodées dans lesquelles affleurent les horizons durcis de cangahua après érosion des horizons supérieurs. La majeure partie de ces unités est localisée dans les régions sèches où l'érosion est forte et les sols peu épais, c'est à dire dans les zones où l'on trouve les unités C2, C3, C4. Les documents cartographiques à 1/50 000 ne distinguent pas les matériaux en fonction de leur dureté. Il suffit de se rappeler que les plus durs, donc les plus difficiles à mettre en valeur, sont localisés dans les régions les plus sèches (unités C3 et C4), alors que les moins durs sont situés dans des zones un peu plus humides (unités C2 et C1).

#### **2.3.2.4. Superficie des sols à cangahua et de la cangahua affleurante.**

Les sols à cangahua occupent sur les versants internes des deux cordillères de la partie septentrionale du bassin interandin équatorien une surface de 2 400 km<sup>2</sup> soit une extension égale à 37% des terres actuellement cultivées.

Un tiers des sols sont érodés et la cangahua est à moins de 20 cm de profondeur. Ils sont situés surtout en bas de versants c'est à dire dans les régions sèches et tempérées qui ont été le plus intensément cultivées. Ils couvrent une surface de 80 000 ha qui devraient être mis en valeur.

### **2.3.3. L'érosion et la récupération des sols érodés.**

#### **2.3.3.1. Importance de l'érosion.**

L'érosion est particulièrement importante dans le bassin septentrional interandin. Les sols complètement érodés couvrent en effet une superficie de 95 400 hectares. Ceux-ci, ajoutés aux 42 600 hectares de sols partiellement érodés dans lesquels la cangahua est présente à moins de 20 cm de profondeur, représentent 17% des terres actuellement cultivées. La comparaison de photographies aériennes d'âges différents a montré que l'érosion est importante dans les zones situées dans les régions sèches. En 30 ans, dans la région de Cangahua, l'augmentation des surfaces érodées avec affleurement de la cangahua a été de près de 300% (Gasselin, 1995), probablement en grande partie du fait de la mécanisation .

#### **2.3.3.2. La récupération des sols a cangahua érodés.**

Les sols à cangahua susceptibles d'être réhabilités ont une extension de près de 80 000 ha. Quelques programmes para-gouvernementaux de forestation et de mise en culture de la cangahua ont vu le jour à partir des années 70. La reforestation, essentiellement en eucalyptus, a été effectuée par le Ministère de l'agriculture. Les jeunes arbres étaient plantés sans sous-solage préalable dans des trous de 20x20x20 cm, ce qui était insuffisant pour une bonne croissance des arbres. Le nombre d'hectares boisés n'est pas connu, certains avancent une superficie de 500 ha, ce qui nous paraît insuffisant, d'autres (De Noni et al., 1992) une surface de 15 000 ha, ce qui nous paraît exagéré. Les quelques programmes de mise en culture de la cangahua ont été très limités (moins de 500 ha) et furent pour la plupart réalisés sans mesures anti-érosives. Néanmoins à partir de 1990 une ONG nationale, la "Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas" (CESA), réhabilite la cangahua à Licto, une vingtaine de kilomètres au Sud de Riobamba, en milieu paysan avec sous-solage mécanisé et la réalisation de terrasses de formation progressive ; 650 ha ont ainsi été déjà été réhabilités. En fait la mise en culture de la cangahua est surtout réalisée sans mesures de conservation par des particuliers. Si quelques agriculteurs, relativement aisés, ont effectué un défoncement mécanisé, la majeure partie des paysans, de faibles ressources économiques, rompent la cangahua manuellement au moyen du pic (cf chapitre IV, socio-économie).

## **2.4. EVALUATION SPATIALE ET MULTI-TEMPORELLE DES AFFLEUREMENTS DE CANGAHUA PAR IMAGERIE SPOT**

Cette étude a été dirigée par G. De Noni et M. Viennot.

### **2.4.1. Objectifs.**

Cette recherche a été menée pour caractériser et délimiter par télédétection, une formation volcanique indurée appelée cangahua, en utilisant des images satellites SPOT. La cangahua ou son équivalent couvre d'importantes surfaces dans les paysages à volcanisme pyroclastique récent de l'Équateur, où elle constitue une composante majeure des paysages et une forte contrainte à la mise en valeur, lorsque l'érosion la fait affleurer, en découpant le sol et les horizons meubles qui la recouvraient.

Deux opérations scientifiques distinctes ont été menées au cours des années 1995 et 1996 :

- Une étude multi-temporelle pour étudier la dynamique de l'érosion en évaluant les variations spatiales de la cangahua, par comparaison de 2 images espacées de 10 années. La zone choisie a été le bas de versant d'un petit édifice volcanique proche de Quito, dans le minifundio caractéristique du petit paysan indigène. Il s'agit d'une zone densément peuplée où les activités agricoles sont importantes et anciennes. Dans ces conditions les manifestations de l'érosion sont partout actives et se traduisent par une nette augmentation des surfaces en cangahua.

- Une spatialisation régionale de la cangahua sur une mosaïque composée de 5 images n'ayant pas même date de prise de vues. La zone d'étude couvre la presque totalité de la partie volcanique de la Sierra nord, en particulier le sillon interandin et les versants internes des cordillères où la cangahua affleure sur une bande de près de 300 km de long du nord au sud et sur une largeur qui n'excède pas 40 km. Cette carte a été comparée à celle dressée par C. Zebrowski en 1996 à partir des cartes F. Colmet Daage au 1/50 000, complétées en 1994-1995 par des contrôles de terrain.

### **2.4.2. Matériel et conditions d'étude.**

Les scènes ont été acquises, grâce au concours du programme ISIS (Incitation à l'utilisation Scientifiques des Images SPOT), proposé par le CNES. Quatre images ont ainsi été obtenues sur stock et deux sur programmation :

- L'étude multi-temporelle concernant la zone de l'Ilalo, proche de Quito (province de Pinchincha) a utilisé des images référencées KJ 640-350, couvrant les régions de Quito - Cayambe en date du 29.11.1986 et KJ 640-350 et KJ 351 acquises pour ce projet le 08.12.1995. L'étude a donné lieu à la soutenance du mémoire de maîtrise d'Alice Servenay (1995), qui a bénéficié de l'appui technique et thématique du Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés du Centre Orstom (LCSC) et de la Maison de la Télédétection de Montpellier.

- La cartographie régionale a nécessité, outre l'image KJ 640-350 déjà acquise précédemment, les images KJ 640-349 (Ibarra-Otavalo au Nord) et KJ 640-351 (Machachi au Sud) de même date, appartenant à la même trace et dont l'angle d'incidence est seulement de 6°30'. Ces 3 images ont été complétées par 2 autres acquises par programmation : KJ 640-352 (Latacunga-Ambato) et KJ 640-353 (Ambato-Riobamba) à l'extrême sud. Elles correspondent à la même date (25.07.95) et à la même trace, mais avec un angle d'incidence important (28° 90'). L'étude a également bénéficié de l'appui du LCSC et la Maison de la télédétection et a servi de support au Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées (DESS) de J. F. Faure (1996).

Toutes les images utilisées ont été prises en mode multi-bande (XS1, XS2, XS3) avec une résolution de 20 \* 20 m sauf celles du 25.07.95 où le pixel est de 30 x 20, à cause de la forte inclinaison de la prise de vue.

### 2.4.3. Méthode de traitement.

Elle peut se résumer en une suite d'opérations qui visent en premier lieu à corriger les informations de base pour les homogénéiser et les rendre comparables entre elles. Sur les images redressées et corrigées il devient alors possible d'effectuer les traitements.

En plus des corrections liées à la technologie du satellite, il est nécessaire de procéder à :

- Des corrections géométriques pour tenir compte d'un éventuel angle de prise de vue et d'une augmentation de la taille du pixel qui passe de 20 à 30 mètres (quand l'angle passe de 0 à 28°). On définit des points de calage ou d'amer qui vont servir de bases puis une procédure informatique fait disparaître les pixels en surnombre dans le sens E-O et attribue aux restants la valeur radiométrique des pixels alentours,

- Des corrections radiométriques indispensables pour travailler sur mosaïque et pour donner aux mêmes objets les mêmes valeurs radiométriques. Cette correction se fait sur les parties communes des images qui servent ainsi de référence radiométrique.

Les traitements consistent alors à :

- Identifier le thème recherché (ici la cangahua affleurante) sur une composition colorée composée à partir des 3 canaux SPOT,

- Isoler visuellement sur la composition colorée des parcelles d'entraînement correspondant au thème,

- Caractériser statistiquement la nature radiométrique des pixels de ces parcelles d'entraînement dans chacun des trois canaux pour définir des groupements de valeurs caractéristiques,

- Lancer alors des classifications pour appliquer à l'ensemble des images les groupements de valeurs définies au stade précédent.

La composition colorée en fausse couleur qui est un néocanal, s'obtient en superposant les 3 canaux en affectant le bleu à XS1 (0,5-0,59  $\mu\text{m}$ ), le vert à XS2 (0,61-0,68) et le rouge à XS3 (0,79-0,89). Elle s'effectue sur l'ensemble de la zone. Sur la composition colorée la cangahua apparaît en gris bleuté de même que les étendues sableuses, les toits, les zones nues sans végétation, les affleurements rocheux et d'une façon générale les villes et les emprises urbaines. La végétation apparaît en rouge d'autant plus intense que l'activité chlorophyllienne est importante.

Pour des raisons de facilité de traitement (taille mémoire, rapidité d'exécution) on ne va travailler que sur des imagerie qui sont des zones de 500 x 700 pixels où la thématique est visuellement claire sur l'image et bien connue sur le terrain.

L'apprentissage vise à déterminer les caractéristiques des thèmes que l'on souhaite créer. On va digitaliser avec soin directement à l'écran des polygones correspondant aux thèmes recherchés. La méthode consiste alors à créer des fichiers statistiques à partir des canaux et des néocanaux : Indice de végétation, indice de brillance, analyses en composantes principales. On exprime ces fichiers dans des représentations géométriques appelées serpents radiométriques, qui dans chaque canal indiquent outre la moyenne, l'intervalle de variation ou mieux l'écart type. A ce stade il peut être intéressant de contrôler l'homogénéité des valeurs radiométriques de chaque polygone, d'augmenter leur nombre, d'éliminer ceux moins sûrs dont les valeurs sortent des normes car de la qualité de l'apprentissage dépend la "justesse" de la signature spectrale et donc la qualité de la classification finale.

On passe enfin à la classification proprement dite par des algorithmes particuliers qui comparent et classent les statistiques précédemment définies à celles de la zone que l'on souhaite traiter. Le résultat donne lieu à une carte qui doit être examinée et critiquée avec la connaissance de la vérité terrain pour comprendre les confusions, voir les pixels indûment classés dans un thème ou ceux qui appartenant pourtant au thème n'y ont pas été placés.

Sauf cas rarissime la classification doit être améliorée ou affinée pour éliminer les confusions, classer tout le thème et rien que lui ; on peut être amené à saisir de nouveaux polygones.

## 2.4.4. Résultats.

### 2.4.4.1. Etude multi-temporelle.

Sur l'Ilalo où la vérité terrain est bonne, on a pu suivre ce protocole. La méthode des hypercubes, appliquée à la classification, a donné des résultats satisfaisants ; la zone est à peu près dépourvue de secteurs urbanisés et suffisamment petite pour que le risque de confusion avec un autre thème minéral soit mineur et qu'il n'existe que peu de secteurs ambigus. Il a été nécessaire de prévoir 3 sous thèmes cangahua : un de cangahua affleurante, un de cangahua discontinue qui associe des pixels ou des groupes de pixels dont la signature spectrale est celle de la cangahua affleurante et des pixels montrant une certaine activité chlorophyllienne (sols partiellement érodés) et enfin une cangahua intermédiaire dont la signature se situe entre cangahua affleurante et cangahua discontinue où la valeur radiométrique du pixel intègre plusieurs petites surfaces élémentaires appartenant aux deux premiers sous thèmes (Fig. 11a). En plus du thème cangahua, on a défini un thème végétation active particulièrement abondant dans les zones au-dessus de 2800 - 3000 m, un thème plantation et un thème eau libre (Fig.11b). Ces thèmes ne couvrent qu'une partie de l'espace.

Les images de 1986 et 1995, bien que semblables par la hauteur du soleil et l'angle de prise de vue, ne sont pas directement comparables, car les valeurs radiométriques des moyennes et écart types des thèmes sont très différentes selon les conditions de prise de vue : date de prise de vue (fin de 1<sup>re</sup> saison humide bien arrosée en 1986, fin de saison sèche très déficitaire en 1995) ce qui influe sur l'humidité de l'air et le couvert végétal. Un véritable recalage à partir des zones de référence étant impossible, il a fallu traiter séparément les 2 images selon la même méthode puis comparer les résultats obtenus (Tab. 9).

Les résultats font apparaître une indéniable augmentation des surfaces en cangahua dans ses trois sous thèmes (affleurante, intermédiaire et discontinue), ce qui est conforme à l'hypothèse de départ. Cependant il ne faut pas perdre de vue que les thèmes cangahua sont probablement sous évalués en 1986 quand les abondantes pluies provoquent le développement d'une importante végétation et surévalués en 1995 quand le thème végétation prend l'aspect de cangahua intermédiaire ou discontinue (cas des zones de culture non ou mal développée). Notons cependant que le thème végétation augmente, puisqu'il passe de 3 000 à 5 000 ha. Il se développe avec les déprises qui accompagne l'érosion. La réduction des surfaces en eucalyptus n'est pas un artefact ; d'importantes coupes ont été effectuées pour approvisionner Quito en bois d'œuvre et en bois à brûler en 87-88.

Tableau 9. Superficie des thèmes classés sur les extractions 1986-1995.

	1986		1995	
	Aire (ha)	%	Aire (ha)	%
Cangahua affleurante	31	0,2	87	0,5
Cangahua intermédiaire	145	0,7	684	3,5
Cangahua discontinue	443	2,3	819	4,2
Végétation	3087	15,9	5193	26,7
Eucalyptus	1191	6,1	257	1,3
Eau libre	3	-	3	-
Non classé	14517	74,8	12374	63,7

L'étude des modifications, au niveau du pixel, fait apparaître des résultats qui confirment une dégradation des paysages et en particulier une augmentation des surfaces en cangahua. En dix années, un peu moins de la moitié des 3 sous thèmes cangahua change d'affectation. Cependant 1 300 ha qui appartenaient au thème non classés intègrent la cangahua, tandis que seuls, 340 ha se sont améliorés et parmi eux 300 ha sont passés d'un des thèmes cangahua au thème non classé ; ce qui voudrait dire qu'ils ont récupéré une affectation agricole. Ce dernier résultat, probablement exagéré, ne doit pas masquer que les dégradations sont dominantes. La progression du thème cangahua (intermédiaire et discontinue) est particulièrement dynamique sur les lignes de crêtes rayonnantes autour du volcan Ilalo. Ces affleurements de cangahua naissent dans le bas à 2 500 m et atteignent localement 2 800 m.

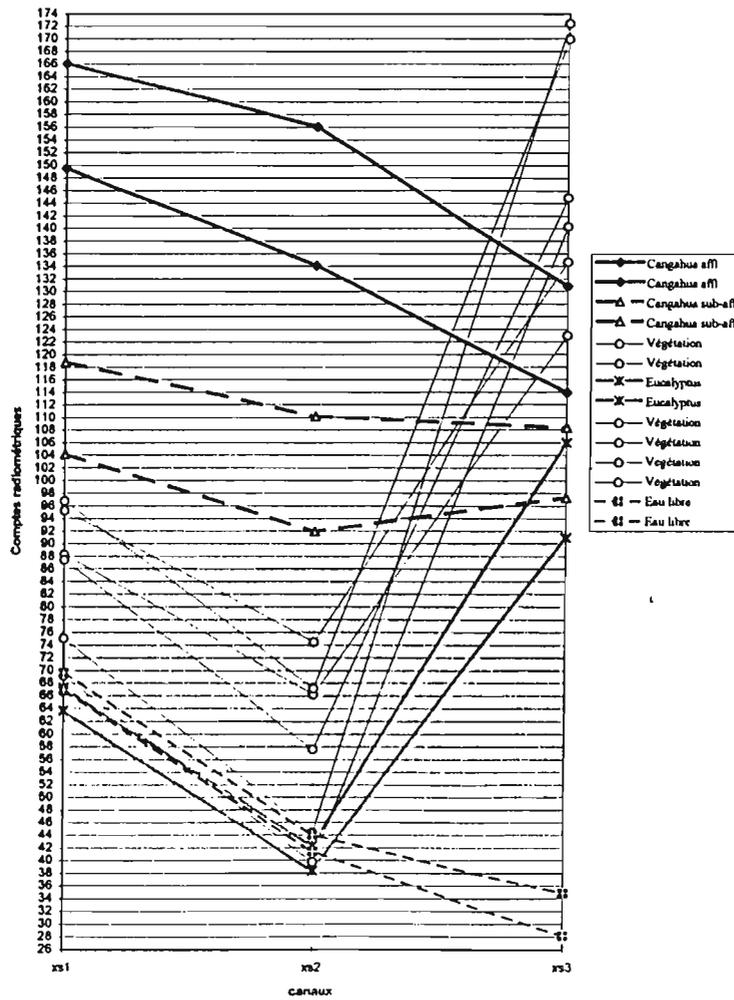


Figure 11a  
Serpents radiométriques (moyenne plus ou moins l'écart type) - Ilalo 95.

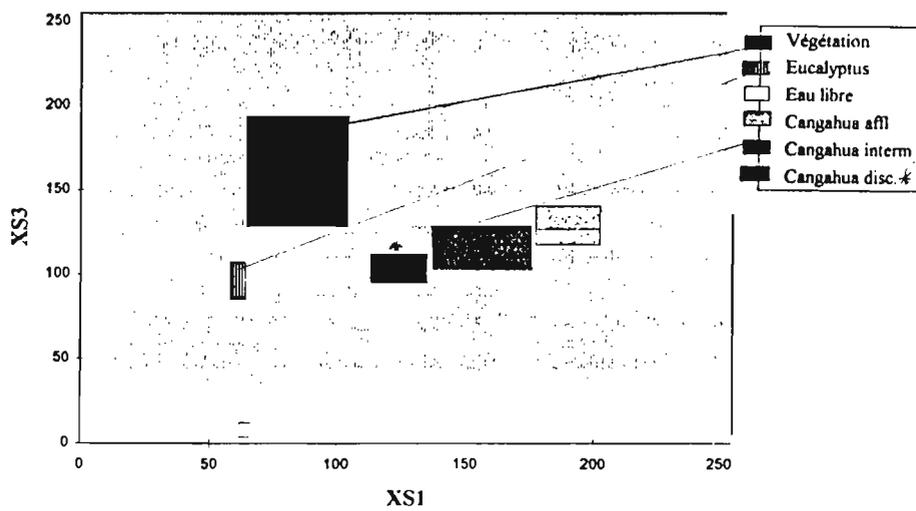


Figure 11b  
Découpage du plan XS1 XS3 en «boîtes» base de la classification par hypercubes  
Extraction Ilalo 1995.

#### 2.4.4.2. *La cartographie régionale.*

Elle visait à comparer :

- Une cartographie des cangahua réalisée à partir d'images satellites récentes (1995, 1996).

- Une cartographie conventionnelle de la cangahua réalisée à partir de travaux de terrain menés entre 1967 et 1981 par Colmet Daage et des équipes de Ministère Equatorien de l'Agriculture (MAG) pour les cartes de sols de la Sierra à 1/50 000, complétés par des travaux de terrain menés entre 1981 et 1983 par Zebrowski-Colmet Daage et des équipes du MAG pour la carte morpho-pédologique de l'Équateur à 1/200 000, complétée par des travaux de terrain menés entre 94 et 95 par Zebrowski pour réaliser une carte de la cangahua à 1/200 000.

A la différence de l'étude ponctuelle de l'Ilalo, cette étude est régionale. Elle intéresse la presque totalité de la Sierra volcanique pyroclastique récente soit une zone qui s'étend sur 300 km du Nord au Sud et sur 20 à 50 km d'Est en Ouest depuis Bolivar à Alausi où affleure la cangahua. L'échelle d'étude n'était évidemment pas la même que pour l'étude de l'Ilalo.

L'utilisation d'images appartenant à 2 traces a compliqué les opérations préalables de recalage. Les 2 traces appartiennent bien à la même année (1995), mais ont été prises dans des conditions climatiques très différentes (les 3 images du Nord sont de février après 2 mois de saison sèche tandis que les 2 du Sud sont de juillet, après d'abondantes pluies de mars à juin et un mois de juillet relativement humide). Les bandes communes des 2 traces montrent des valeurs de réflectance très différentes car l'angle de prise de vue de la trace de février est incliné de 6°3/10 à droite et celle de juillet de 29°9/10 également à droite.

Avant de faire la mosaïque complète, il a fallu effectuer indépendamment le recalage des 3 images du Nord pour réaliser la sous mosaïque du Nord puis la sous mosaïque du Sud et assembler les 2 sous mosaïques. Le ré-étalement radiométrique de la nouvelle image prend en compte la totalité des pixels des 2 sous-mosaïques. Malgré cela les teintes bleutées du Sud sont plus sombres que celles du Nord.

Pour ne pas avoir à travailler sur l'ensemble de la mosaïque, le thématique grâce à sa connaissance du terrain, a pu choisir comme dans l'exemple précédent des imageries représentatives au nombre de 6, incluant les thèmes choisis. Les imageries ont servi à délimiter des parcelles d'entraînement où les thèmes sont parfaitement caractérisés sur l'image et sur le terrain. On produit ainsi outre, les canaux XS1, XS2 et XS3, des néo-canaux à partir de l'Analyse en Composante Principale (ACP), Indice de Végétation Normalisée (IVN), Indice de végétation simplifié, Indice de brillance simplifié, ainsi que leur fichiers de résultats. De l'analyse statistique des fichiers et des graphes (moyenne, écart type) on va retenir les plus sélectifs pour les extrapoler aux imageries puis à la mosaïque. Pour cette étude, ce sont l'ACP1 et l'IVN qui se sont avérés les plus discriminants pour caractériser les 2 thèmes cangahua : cangahua affleurante, cangahua discontinue ainsi que 14 autres thèmes qui n'intéressaient pas directement l'étude mais permettaient de replacer la cangahua dans son environnement.

En lançant la classification sur l'imagerie incluant la ville d'Ibarra sur la base des seuls thèmes cangahua, il est apparu une confusion entre la cangahua et un thème urbain qui n'avait pas été prévu. Pour lever cette imprécision 3 voies ont été explorées :

- Celle basée sur une modification de la typologie par hiérarchisation des thèmes ne lève pas la confusion,

- Une autre basée sur l'analyse des structures par élimination des structures claires et sombres de taille inférieure à un élément structurant balayant l'image, suivi d'un recodage de l'image pour "faire sortir l'urbain" n'a rien donné, car les structures de la cangahua sortent alors avec l'urbain,

- Une troisième voie par édition de masques sur l'image classée a donné de meilleurs résultats.

Ces masques sont de 3 types :

- Masques spatiaux : contourage d'une ou plusieurs zones à reclasser,

- Masques numériques : sélection de pixels d'un ou plusieurs thèmes mal classés,

- Masques combinés : sélection des pixels d'un ou plusieurs thèmes mal classés à l'intérieur d'une ou plusieurs zones à reclasser.

Le masque édité, qui peut être de type spatial, numérique ou combiné, est un masque de confusion que l'on peut reclasser en fonction de sa thématique. Le résultat est alors incrusté dans l'image classée initiale sans que les zones externes au masque soient affectées. Par d'autres itérations on améliore ainsi la classification.

Cette technique très souple permet de retravailler un thème ou une zone de l'image et d'incruster progressivement les résultats jusqu'à l'obtention d'une image finale satisfaisante.

Comparaison avec le document cartographique (C. Zebrowski).

Globalement, les principales zones d'affleurements de cangahua sont localisées dans les mêmes zones sur les deux documents. La superposition est signalée sur la figure par la légende : "spatialisation commune aux 2 approches".

Néanmoins, dans le détail, s'expriment des différences qui concernent la cangahua affleurante discontinue et qui se trouvent

- Soit dans des zones communes aux 2 approches où la mosaïque SPOT indique, notamment dans les zones de Ibarra, Quito-nord et Latacunga-Ambato, une extension plus grande de ce thème (noté "spatialisation/SPOT", dans la légende). Plusieurs hypothèses, à vérifier par des travaux complémentaires de terrain, sont envisageables pour expliquer la différence : (i) les surfaces de cangahua affleurante discontinue ont progressé entre 1986 et 1995, (ii) la carte thématique ou les traitements de télédétection ne sont pas assez précis sur ce point. Le thème cangahua discontinue, qui est un thème composé, est plus difficile à discriminer que le thème cangahua affleurante caractérisé par une signature spectrale bien définie. D'autre part, la cangahua peut réfléchir localement comme les sables ponces volcaniques.

- Soit dans des zones qui ne sont pas communes aux 2 approches et où il existe une information qui provient de la carte thématique (noté "spatialisation / cartes de sols" dans la légende). Dans ce cas, la mosaïque SPOT n'a donné aucune réponse. Les deux documents n'ont pas été conçus dans le même esprit. Rappelons que la cangahua n'affleure qu'après décapage des horizons superficiels qui la coiffent. Dans la carte thématique, tous les types de cangahua ont été pris en compte, que le matériau affleure ou soit recouvert par un sol peu épais. Dans les traitements de télédétection, compte-tenu de l'importance de la signature spectrale d'un thème, seuls ont été retenus les thèmes de cangahua qui se concrétisent en surface par un affleurement total ou partiel.

L'évaluation des surfaces par découpage et par pesée des différentes unités a donné les résultats suivants (Tab. 10) :

Tableau 10. Spatialisation de la cangahua par images SPOT et comparaison avec le document cartographique.

	Superficie km <sup>2</sup>	Pourcentage %
Vallée interandine en dessous de 3200 m	9738	
Cangahua commune au 2 approches	1858	19.0
Cangahua SPOT	733	7.5
Cangahua document cartographique	960	10.1
Cangahua commune + SPOT	2591	26.5
Cangahua commune + cartographie	2818	28.9

#### 2.4.5. Conclusions.

Les images SPOT constituent un outil efficace pour la spatialisation de la cangahua. Cependant il est indispensable de s'entourer d'un minimum de conditions préalables dans l'acquisition des images afin qu'elles soient de la meilleure qualité possible (sans nuage, basse humidité atmosphérique et des sols) mais surtout adaptées au problème posé.

Pour une étude multi-temporelle, il est souhaitable de disposer d'images directement comparables correspondant à une date de prise de vue et à des conditions climatiques et de couvert végétal, le plus proches possibles ; la qualité des images est également importante s'il est nécessaire de discriminer plusieurs thèmes.

Pour une étude régionale et ne portant que sur un nombre limité de thèmes, il est impératif de disposer d'un jeu d'images prises au même moment, afin que les statistiques des thèmes définis lors de l'apprentissage soient directement applicables et pour obtenir une classification qui présente un minimum de confusion. La qualité de l'image est moins importante ; mais on évitera les prises de vue oblique qui compliquent le mosaïquage, obligent à passer par des transformations des valeurs radiométriques et provoquent des effets d'orientation de versant très importants.

Avec de gros progrès de convivialité, avec la semi-automatisation des corrections et avec des modules bien adaptés aux différents problèmes, les logiciels de traitements d'images ne sont plus réservés à des spécialistes. L'exploitation d'une image satellite au delà des simples valeurs radiométriques pour chacun des canaux primaires, suppose une connaissance régionale du terrain ainsi que celle de petites zones homogènes bien positionnées et replacées dans leur environnement (végétation, état de surface ...) qui peuvent ainsi servir de parcelles d'entraînement.

Pour compléter ces 2 études il est souhaitable de réaliser quelques travaux complémentaires là où la télédétection s'est avérée peu performante :

a) Sur la discrimination insuffisante des thèmes cangahua dans les études régionales, il faut sur le terrain, multiplier le nombre de petites zones bien positionnées et travailler indépendamment sur les deux séries d'images, d'angle de prise de vue différent. Il faut également créer de nouveaux thèmes : couverture sablo-ponceuse des régions de Riobamba et d'Ambato ; roches affleurantes d'Ibarra.

b) Sur la discrimination cangahua affleurante, cangahua à faible profondeur ; l'étude de l'activité chlorophyllienne d'images prises dans des conditions climatiques différentes (plus sèches) montre que la végétation des sols peu profonds (cangahua subaffleurante) accuse rapidement le stress hydrique.

c) Sur la fiabilité de l'extension de la cangahua et des thèmes associés, il serait souhaitable, sur une zone d'accès aisée et déjà bien connue (KJ de Quito, par exemple) de reprendre toutes les scènes d'un même KJ pour déterminer la variabilité des résultats en fonction de la saison et des conditions climatiques ayant précédé la prise de vue.

## BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE I

- Bertaux J. et Quantin P. 1994. Les niveaux indurés des séries pyroclastiques récentes du Mexique Central. 15ème réunion Sc. Terre, Nancy, 1994 p. 28.
- Cadier E., Pourrut P., Winckell A. et Zebrowski C. 1978. Carta de isohietas medias anuales e histogramas mensuales, Orstom-Pronareg, Quito, Ecuador.
- Cadier E., Huttel C. et Pourrut P. 1978. Carta de número de meses secos. Orstom-Pronareg, Quito, Ecuador.
- Colmet-Daage F. et al. 1974-1984. Cartas de suelos de la Sierra ecuatoriana a 1:50.000. Orstom-Pronareg, Quito, Ecuador.
- Colmet-Daage F. et Zebrowski C. 1980-1984. Cartas de suelos de la sierra ecuatoriana a 1:200.000. Orstom-Pronareg, Quito, Ecuador.
- CNES, 1992. Télédétection spatiale, ED. Cépadués, 305 p.
- Custode E., De Noni G., Trujillo G. et Viennot M. 1992. La cangahua en el Ecuador : caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión. Terra vol.10, Mexico, 332-346.
- De Noni G. et Viennot M. 1996. Evaluation spatiale et multitemporelle de la cangahua à partir d'images SPOT. Act. 3e simposion suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).
- Dubroeuq D. 1992. Los tepetates en la region de Xalapa, Veracruz (Mexico) : un endurecimiento de origen pedológico. Terra. Mexico, 10 : 233-240.
- Dubucq M. 1989. Identification et cartographie par télédétection des sols érodés : application au lauragais toulousain, Thèse de l'Université P. Sabatier, Toulouse, 247 p.
- Faure J.F. 1996. Spatialisation et cartographie des affleurements de cangahua par télédétection dans le bassin interandin (Equateur), DESS, Univ. P. Valéry, Montpellier. 111 p.
- Gasselin P. 1995. Systèmes de production minifundistes sur sols volcanique indurés et érodés en Equateur. Mém. ESAT-CNEARC-ORSTOM, Montpellier, nov. 1995, 57 p.
- González R. J. 1993. Santa Catarina del Monte. Bosques y hongos. Col. Tepetlaostoc #3. Univ. Iberoamericana. México. 115 pp.
- Hall M. et Beate B. 1991. El volcánismo plio-cuaternario en los Andes del Ecuador. Estudios de Geografía, 4, p. 5-17. Col. Geogr. Ecuador, Quito, 1991.
- Hall M. et Mothes P. 1996. El origen y edad de la cangahua superior, Valle de Tumbaco, Ecuador. Act. 3e simposio suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).
- Hessmann R. 1992. Investigaciones micromorfológicas en "tepetates", formaciones en sedimentos de "toba" en el estado de Tlaxcala (Mexico). Terra. Mexico. vol 10 : 145-150.
- Hidalgo C. 1995. Etude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la Vallée de Mexico. Contribution à la connaissance de leurs caractères et de leur formation. Thèse, Université Nancy I, 1995, 215 p. ; publ. Orstom, TDM n° 146, 1996.
- Hidalgo C., Bertaux J. et Quantin P. 1995. Forms of silica in indurated volcanic soils of the Mexico Valley. 10th Int. CLays conference, Adélaide, 1993, Proceed. 487-493.
- Hidalgo C., Quantin P. et Elsas F. 1996. Caracterización mineralógica de los tepetates de tipo fragipan del Valle de Mexico. Act. 3e simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).

Hidalgo C., Quantin P. et Zebrowski C. 1992. La cementación de los tepetates : estudio de la silicificación. Terra. Mexico. vol 10 : 192-201.

Lunden B., Nordstrom K., Stromquist L. 1990. An evaluation of soil intensity mapping from SPOT satellite imagery by studies of colour air-photos and top-soil content of 137 censium, University of Stockholm, Rap. 74, Suède, 13-37.

Oleschko K., Zebrowski C., Quantin P. et Fedoroff N. 1992. Patronos micromorfológicos de organización de arcillas en tepetates (Mexico). Terra. Mexico. vol 10 : 183-191.

ORSTOM, 1978. Analyse multivariable, procédure "loterie". Application à l'analyse multispectrale en télédétection, documents techniques, n° 39, Paris, 78 p.

Peña D. et Zebrowski C. 1992. Informe del mapa morfoedafológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, y anexos. 1. Mapas temáticos ; 2. Descripción de perfiles. Annexe au rapport final contrat CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.

Poetsch T. et Anikas K. 1996. The microscopic appearance of free silica in some tepetate of soils of volcanic origin in Central Mexico. Act. 3e simposio suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).

Prat. 1991. Etude du talpetate, horizon volcanique induré de la région Centre-Pacifique du Nicaragua. Genèse, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydro-dynamique. Son rôle dans l'érosion des sols. Thèse. Paris VI. 350 p.

Prat. y Quantin P. 1992. Origen y genesis del talpetate: horizonte endurecido de suelos volcanicos en la region Centro-Pacifico de Nicaragua. Terra, vol. 10 : 267-282.

Quantin P. et al. 1992. Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final, CEE n° TS2 A 212 C. 77 p.

Quantin P. et Zebrowski C. 1996. Caractérisation et formation de la cangahua en Equateur. Act. 3e simposion suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).

Rossignol J.P., Campos A. et Quantin P. 1992. Las condiciones regionales de desarrollo de los tepetates en la zona Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mexico. Terra. Mexico. vol 10 : 210-220.

Severnay A. 1995. Spatialisation de la cangahua en Equateur à partir de données SPOT : cas du bassin de Quito. Mémoire de maîtrise IUP Gestion de l'environnement, Univ. Paris VII, 61 p.

Severnay A., Prat C., Sorani V. y Gonzalez E. 1996. Estudio espacial de los tepetates (suelos volcanicos endurecidos) del eje neovolcanico mexicano: metodologia para un programa de investigacion. In: I Foro sobre aplicaciones de los SIG. Univ. Aut. Edomex. Toluca, Mexico, 179-182. + Act. 3e simposio suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).

Severnay A. 1997. Les paysages de tepetates du Mexique central volcanique: identification et caractérisation spatiale par télédétection et SIG des zones agricoles à réhabiliter. Mémoire de DEA. Univ. Toulouse Le Mirail. 90 p.

Vera R. et Lopez R. 1992. Tipología de la cangahua, Terra vol 10 : 113-119.

Werner G. 1992. Die böden der region Apan (Hidalgo) und Calpulalpan (Tlaxcala). Erläuterungen zu einer vorläufigen bodenkarte. Annexe au rapport final du programme CCE/Orstom n° TS2-0212-C.

Winckell A. et Zebrowski C. 1992. La cangahua en Equateur : le contexte paléogéographique de sa formation. Terra, vol 10 : 107-112.

Winckell A., Zebrowski C. et Delaune M. 1993. Evolution du modelé Quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Equateur. 1ère, 2e et 3e partie. Cah. Orstom, série géomorphologie, vol. VII; n°4, 1969, p. 495-560.

Zebrowski C. 1996. Los suelos con cangahua en el Ecuador. Act. 3e simposion suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).

## CHAPITRE II

### FACTEURS DE FERTILITE POTENTIELLE DES HORIZONS INDURES CULTIVES (PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES)

#### 1. TEPETATES MEXICAINS.

Les travaux du précédent programme (Quantin et al., 1992) avaient déjà déterminé les principaux facteurs de fertilité potentielle du tepetate cultivé, limitant ou favorisant la productivité agricole. Après ameublissement du matériau à une taille d'agrégat optimum (2 à 5 mm), les contraintes majeures sont la carence en azote et en phosphore assimilable et la quasi stérilité microbienne. En outre les agrégats fins étant instables, il y a dégradation des propriétés physiques au cours d'une culture. Les résultats de ce deuxième programme précisent l'évolution des propriétés physiques, chimiques et biologiques en fonction du temps de culture et de différents traitements, ou montrent l'intérêt de certains procédés.

#### 1.1. PROPRIETES PHYSIQUES DE TEPETATES CULTIVES.

Il s'agit de travaux de Fechter et son équipe de l'Université de Tlaxcala (Fechter et al., 1996 ; rapport final, 1997), sur la station expérimentale de Tlalpan et sur des terrasses paysannes de différents âges de mise en culture (San Andres Cuamilpa). Sur la station de Tlalpan l'objectif était de comparer trois façons culturales en culture de maïs : le labour traditionnel "LT" suivi du buttage et du sarclage en deux travaux successifs ; le labour minimum "LR", sans autre travail du sol, mais deux traitements différents, soit avec couvert végétal intercalaire de légumineuse, "LRCV", soit sol nu (désherbage chimique sélectif) "LRSCV" entre les rangs de maïs. Les mesures à plusieurs dates successives concernent : la conductivité hydraulique perméamètre de Guelph) et l'humidité au champ (TRASE) ; la porosité (distribution de taille des pores) ; la vitesse de percolation en cylindre d'agrégat tamisé (1-2 mm, 3-5 mm) au laboratoire (Becher et Kainz 1983) pour évaluer la stabilité structurale.

En outre il y a eu une observation du développement des racines en fonction du type de labour (LT, LR) à Tlalpan sur maïs, ou de l'âge de la terrasse cultivée et du type de plante (maïs, haricot, fève, etc...) à San Andrés.

#### 1.1.1. Conductivité hydraulique, porosité et stabilité structurale.

##### 1.1.1.1. *Conductivité hydraulique.*

La conductivité hydraulique moyenne par jour, de 600 cm après le premier labour, s'est abaissée en trois semaines, puis stabilisée vers 25 à 20 cm (Fig. 1) c'est à dire environ 10 mm/heure, quel que soit le traitement cultural (LT, LRcv, LRscv). La diminution de taille des agrégats fins entraîne le colmatage des macropores et une forte réduction de l'infiltration des fortes pluies, donc du stockage de l'eau et provoque ruissellement et érosion superficielle. Ceci confirme l'observation de Jérôme (1992) sur la station de San Miguel Tlaixpan (Texcoco, Mexico).

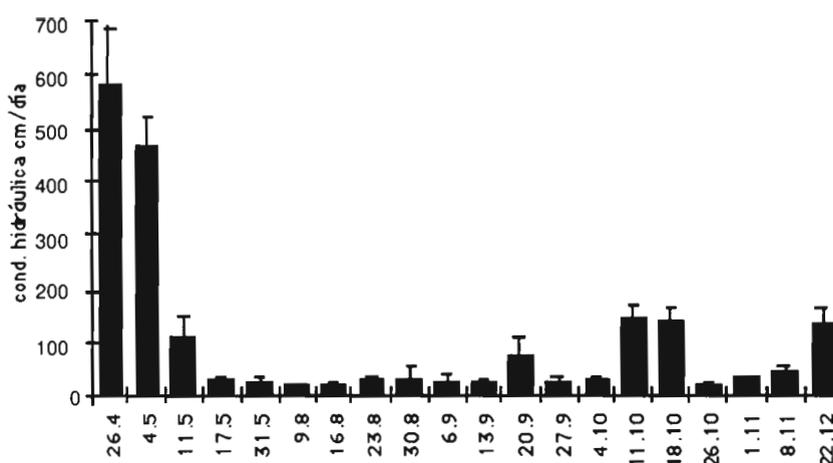


Figure 1. Variation de la conductivité hydraulique après le premier labour

### 1.1.1.2. Porosité totale.

La porosité totale se stabilise entre 55 et 57% dans les 20 cm supérieurs, quel que soit le labour, LT ou LR, ou l'âge de la mise en culture. Mais la distribution de taille des pores varie significativement suivant le labour (Tab. 1). La porosité grossière est plus grande dans le cas du labour minimum (LR) que du labour traditionnel (LT), à cause d'un moindre travail du sol. Mais la porosité moyenne, responsable de la réserve en eau utile du sol y est bien inférieure, surtout dans le cas sans couvert végétal intercalaire (LRscv). Le labour traditionnel ainsi que le couvert végétal assurent une meilleure capacité de rétention en eau du sol.

Tableau 1. Distribution de taille des pores dans les 20 cm supérieurs, en % du volume.

Labour	Da	P tot	Pg	Pm	Pf
LT	1.16	56.4	19.4	22.0	15.0
LRscv	1.17	55.8	24.5	13.3	18.0
LRcv	1.19	55.2	22.4	17.4	15.4

### 1.1.1.3. Humidité du sol.

L'humidité du sol est aussi dépendante de la couverture végétale. Sans couverture végétale intercalaire l'humidité s'est maintenue à un niveau suffisant (20% en volume) pendant une période sèche de 3 semaines dans le cas du labour traditionnel et du labour minimum, mais pas avec la couverture intercalaire qui a provoqué un effet de stress pour le maïs.

### 1.1.1.4. Stabilité des agrégats.

La stabilité des agrégats fins (1-2 mm, 3-5 mm) est reflétée par la vitesse de percolation, après avoir atteint un régime stable. Cette vitesse demeure 2 à 3 fois supérieure dans la partie supérieure du sol (0-5 cm) en labour minimum avec couverture végétale (LRcv) qu'en son absence. C'est l'indice d'une meilleure stabilité des agrégats fins en présence des racines.

Le couvert végétal a donc un effet positif sur la stabilité des agrégats et la réserve en eau utile ; mais il concurrence la plante cultivée en période prolongée de déficit hydrique. Si le labour traditionnel améliore la réserve en eau utile, il a toutefois un effet négatif sur la stabilité des agrégats.

## 1.1.2. Enracinement en fonction du type de labour et de la plante.

L'enracinement a été observé sur des profils culturaux de 0 à 1 m de profondeur. C'est un bon indicateur des effets des façons culturales, notamment le labour, sur l'amélioration des propriétés physiques du tepetate cultivé. D'autre part le développement de la rhizosphère

conditionne l'accroissement du stock de matière organique et en conséquence améliore la stabilité structurale, la porosité et l'activité biologique du sol. La méthode comporte l'observation sur le profil cultural de la distribution, densité, taille et longueur des racines, puis au laboratoire la pesée de la biomasse racinaire.

### ***1.1.2.1. Observation de profils racinaires.***

#### ***A. Labour traditionnel et labour minimum, en culture de maïs.***

En labour traditionnel (en 8<sup>e</sup> année de culture) l'enracinement est très dense de 0 à 25 cm, mais irrégulier, puis dispersé jusqu'à 40 à 50 cm de profondeur. Cette irrégularité est due au buttage. En labour minimum l'enracinement est dense et régulier jusqu'à 30 cm, puis espacé jusqu'à 50 à 60 cm. Le labour traditionnel n'améliore donc pas l'enracinement.

#### ***B. Comportement des plantes.***

Le maïs seul (en 8<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> années de culture) développe peu ses racines au-delà de 50 à 60 cm de profondeur et surtout entre 30 et 40 cm. Cependant le maïs et la fève associés (en 6<sup>e</sup> année de culture) pénètrent leurs racines jusqu'à 80 à 100 cm, avec une forte densité jusqu'à 30 cm et une densité encore importante jusqu'à 60 à 70 cm. La culture associée maïs-fève explore donc mieux le volume sol. L'orge (en 6<sup>e</sup> année de culture) développe une forte densité de racines entre 0 et 20 cm puis des racines espacées jusqu'à 40 à 50 cm de profondeur. Parmi les légumineuses, la fève a un enracinement profond, jusqu'à 60 à 80 cm, et dense jusqu'à près de 40 cm ; tandis que le haricot et l'Ayocote (*Phaseolus coccineus*) ont un enracinement limité vers 30 cm et de moyenne densité.

#### ***C. Evolution des mottes grossières de tepetate;***

Evolution des mottes grossières de tepetate et de la profondeur de sol utilisable par les racines. Au cours des premières années de culture, les racines pénètrent peu en dessous du tepetate labouré. Il est donc nécessaire de cultiver le tepetate à au moins 40 cm de profondeur. Les mottes grossières se réduisent lentement et elles sont encore présentes dans un tepetate cultivé depuis 18 ans. Il se développe une nouvelle structure et des agrégats biogéniques dans la sphère racinaire ; mais nous n'avons pas de résultats à ce sujet.

### ***1.1.2.2. Mesure de la biomasse racinaire (Tab. 2).***

#### ***A. Effet du labour et d'un couvert végétal intercalaire sur le maïs.***

Le poids total des racines de maïs (en 8<sup>e</sup> année de culture à Tlalpan) varie peu : de 1 670 kg/ha en labour traditionnel à 1 530 kg/ha en labour minimum sans couvert végétal intercalaire. La répartition est semblable, progressivement décroissante entre 0 et 40 cm de profondeur. Donc il se confirme que le labour traditionnel n'apporte aucun avantage pour le développement des racines.

Le labour minimum avec couvert végétal intercalaire ne produit pas plus de masse racinaire : le poids global racines de maïs et de mauvaises herbes est en effet de 1 470 kg/ha. Plus de la moitié de la masse racinaire (872/1470 kg), incluant beaucoup de racines de mauvaises herbes se concentre dans les 10 premiers centimètres. Il y a donc forte compétition entre racines de maïs et de mauvaises herbes, diminution conséquente des racines de maïs. En outre cela explique la sensible diminution de la réserve en eau dans le sol supérieur et effet de stress hydrique en cas de sécheresse prolongée (au moins 3 semaines) pendant la saison des pluies.

La comparaison avec les mesures faites par Etchevers et al. (1997) montre que la biomasse racinaire du maïs en culture paysanne traditionnelle sur tepetates est 3 fois moindre

(440 kg/ha en moyenne), en présence d'une quantité abondante de racines de mauvaises herbes (1 500 kg/ha en moyenne).

Tableau 2 : Biomasse racinaire (en kg/ha) en fonction de profondeur et type de plante.

	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	0-50 cm
Maïs LT	448	386	330	291	214	1669
Maïs LR scv	478	387	336	201	127	1529
Maïs LR cv	872	313	141	69	75	1470
Maïs + fève	1118	776	496	370	203	2963
Haricot	761	442	328	374	-	1905
Orge	499	251	253	142	133	1278

### *B. Association maïs + fève.*

L'association de la fève, contrairement au couvert intercalaire superficiel (essentiellement de mauvaises herbes) a permis d'accroître fortement la masse racinaire surtout dans les 20 premiers centimètres, mais aussi dans l'ensemble du volume, sans réduire proportionnellement le développement des racines du maïs.

### *C. Autres plantes.*

Le haricot, contrairement aux observations du profil racinaire a produit une biomasse racinaire de 1 900 kg/ha un peu supérieure à celle du maïs seul, surtout dans les 10 cm supérieur du sol. L'orge fournit une biomasse de 1 280 kg/ha, sensiblement moindre que les autres plantes et concentrée surtout dans les 20 cm supérieurs du sol.

En conclusion le maïs, la fève et même le haricot nécessitent une profondeur de tepetate cultivé à au moins 40 sinon 50 cm de profondeur ; les céréales blé, orge, avoine pouvant se contenter de 30 cm. Le maïs et la fève associés développent sans concurrence leurs racines sur l'ensemble du volume sol et sont donc le mieux capables d'améliorer le stock organique et les propriétés physiques du tepetate cultivé. Un couvert intercalaire superficiel (légumineuse et mauvaises herbes à enracinement superficiel) est concurrentiel pour les racines du maïs et ne permet pas d'accroître le stock organique et d'améliorer la structure du tepetate cultivé, sinon près de la surface. La culture d'orge comme d'autres céréales ne produit une amélioration du stock organique que dans les 20 cm supérieurs du sol. Le labour traditionnel en culture de maïs n'est pas plus efficace que le labour minimum pour le développement des racines et du stock organique.

## **1.2. PROPRIETES CHIMIQUES.**

A la suite des travaux du programme antérieur (Quantin et al., 1992), Etchevers et ses collaborateurs du Collège de Postgraduation en Sciences Agronomiques de Montecillo (Etchevers et al., rapport final, 1997) ont fait deux études : le relevé du niveau nutritionnel des tepetates des Etats de Mexico et de Tlaxcala ; l'analyse de la dynamique de la matière organique et de l'azote dans les tepetates cultivés. Dans ces deux derniers cas, les études ont été menées en lien avec C. Prat et al.

### **1.2.1. Niveau nutritionnel des tepetates.**

#### *1.2.1.1. Tepetates non cultivés.*

En 1995, H. Brito-Vega a préparé les bases de l'étude, à savoir : extraire les aires de différents types de tepetate en affleurement à partir de la carte morpho-pédologique au 1/50 000 de D. Peña et C. Zebrowski (1992) établie lors du programme STD2 de la CEE pour la région orientale de la vallée de Mexico et de celle de la région de Tlaxcala au 1/100 000 dressée par G. Werner (1988). Un échantillonnage aléatoire a été fait de 100 aires réduites représentatives des

différents types de tepetate, pour servir de base expérimentale. Des échantillons de tepetates ont été prélevés, sur lesquels des analyses de caractérisation ont été faites en 1996.

Deux problèmes sont apparus : les unités de la carte de Mexico ne sont pas équivalentes de celles de Tlaxcala ; la valeur médiane des propriétés chimiques des tepetates ressortant des différentes unités ne sont pas significativement différentes.

Sur la carte de Mexico, il s'agit d'unités stratigraphiques, notamment T2 et T3 et de sous-unités : avec ou sans calcaire (apparent) définies sur le terrain. Mais tous ces tepetates contiennent un peu de calcaire (3 à 7%) sans limite précise entre eux. En outre leurs propriétés chimiques moyennes sont peu différentes.

Sur la carte de Tlaxcala, les quatre unités D1, D2, D3 et D4 ont été définies sur le terrain par un critère imprécis de couleur, respectivement : gris clair, brun jaune, brun clair et gris foncé. Les propriétés chimiques moyennes de ces unités ne sont pas significativement différentes entre elles ni de celles des tepetates de Mexico.

Pour pallier cette difficulté Etchevers a défini 4 classes "arbitraires" selon 4 rangs de valeurs de toutes les propriétés mesurées, à savoir : pH ; M.O.% (matière organique) ;  $\text{CaCO}_3$ % ; éléments échangeables K, Ca, Mg et Na (en C mol/kg) ; micro-éléments Fe, Cu, Zn et Mn (en ppm) assimilables ; P assimilable (en ppm) ; Conductivité électrique ( $\text{dSm}^{-1}$ ).

Le classement a été fait à priori par rang de valeur croissante, par exemple :

- en classe 1 : pH < 6,6 ; M.O. < 0,6 ;  $\text{CaCO}_3$  < 3% ; K éch. < 0,2 C mol/kg
- en classe 2 : pH 6,6-7,3 ; M.O. 0,6-1,2% ;  $\text{CaCO}_3$  3-6% ; K éch. 0,2-0,3 C mol/kg
- en classe 3 : pH 7,4-8,5 ; MO 1,2-1,8% ;  $\text{CaCO}_3$  6-9 % ; K éch. 0,3-0,6 C mol/kg
- en classe 4 : pH > 8,5 ; M.O. 1,8-2,4% ;  $\text{CaCO}_3$  > 9% ; K éch.0,6-1,3 C mol/kg

Evidemment aucun tepetate ne rentre dans aucune de ces classes. L'analyse de fréquence par élément des échantillons présentant tel ou tel rang de valeur des différentes classes fait clairement apparaître l'incohérence de ce type de classification. Ainsi la teneur en micro-éléments est très basse quand le taux de calcaire et le pH sont élevés ; à l'inverse la teneur en micro-éléments augmente quand le taux de matière organique augmente et les valeurs du calcaire et du pH s'abaissent. Donc il conviendrait d'abord d'établir des relations significatives entre propriétés du point de vue du potentiel de productivité ; puis de faire une combinaison de critères pour calculer un indice de productivité potentielle, à partir duquel une classification des échantillons serait possible.

Finalement les conclusions de cette analyse inachevée se sont limitées à des faits évidents, déjà connus antérieurement, à savoir : une carence majeure en N et P assimilable ; une déficience grave en matière organique (taux < 0,5%) ; un pH légèrement alcalin en relation avec un peu de calcaire ; une déficience en micro-éléments assimilables Fe, Cu, Zn et Mn, accusée par les valeurs de pH > 7,6 ; une teneur élevée en cations échangeables Ca, Mg, K et Na. Deux facteurs favorables sont à noter : l'abondance de Ca, Mg et K échangeables, en raison d'une C.E.C. effective élevée (15 à 25 Cmol/kg) ; le faible taux de fixation du phosphore (11% en moyenne selon Baumann 1996). Pour obtenir une bonne productivité il est donc seulement nécessaire d'appliquer une fertilisation minérale en N et P selon les besoins de la plante cultivée. Mais il est recommandé de pratiquer une fertilisation organique pour améliorer les propriétés physiques et biologiques du tepetate cultivé, et d'ajouter un apport de micro-éléments, notamment Cu et Zn, pour les besoins de certaines cultures.

### ***1.2.1.2. Tepetates cultivés, de 0 à 60 ans.***

Dans le but d'étudier l'évolution de la fertilité des tepetates cultivés et notamment la dynamique du carbone organique et de l'azote, et l'évaluation de la biomasse microbienne, Etchevers et al. (1997, rapport final) ont sélectionné 16 parcelles paysannes de 0 à 60 ans depuis leur mise en culture. La plupart sont cultivées en maïs. Mais nous ne connaissons pas leur passé cultural, notamment les apports d'engrais organiques et minéraux ; ce qui introduit une variable aléatoire indépendamment de l'âge des parcelles. Les résultats d'analyse montrent

même que les parcelles au temps 0 ont été prélevées lors de la culture après fertilisation ou qu'il y avait un résidu de sol.

Pour réduire la présentation des résultats d'analyse chimique, nous avons regroupé les parcelles par classe d'âge (Tab. 3) :

Tableau 3 : Caractéristiques des parcelles sélectionnées.

Age	Nombre de parcelles	Plante cultivée principalement
0	2	blé
3-5	3	maïs, maïs-fève
10	3	maïs-fève, haricot, agapando
16	3	maïs
21-22	2	maïs
35-46-60	3	maïs

Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 4). Les prélèvements ont été faits de 0 à 20 cm de profondeur.

Tableau 4. Caractères chimiques des tepetates cultivés de 0 à 60 ans, Texcoco-Mexico.

Age (nombre parcelles)	pH	MO/C	N %	C/N %	P —	K ppm	Ca —	Mg me/ 100g	Na me/ 100g	CEC** —	S %	S/T** —	Fe —	Cu —	Zn ppm	Mn —
Non cultivé	7.7	1.3/0.8	0.075	10.7	6-25	1.38	6.5	5.6	0.8	22.8	14.3	62.7	8	1.0	0.5	10
3-5 (3)	7.7	2.1/1.3	0.11	11.8	2-18	1.30	15.0	6.7	1.7	26.2	23.7	90.5	7	1.0	1.1	12
10 (3)	7.4	2.6/1.6	0.13	12.3	0-5	1.15*	15.2*	8.7*	1.0*	38.2*	26.1	68.3	7	0.5	0.8	12
16 (3)	7.1	2.4/1.5	0.12	12.5	1-11	1.02	18.0	8.2	0.5	30.0	27.7	92.3	7	1.3	0.8	20
21-22 (2)	6.6	2.0/1.2	0.11	10.9	1-34	0.69	8.7*	7.0	0.3	19.2*	16.7	87.0	5	0.6	0.7	21
35-46-60 (3)	6.9	1.8/1.1	0.10	11.0	1-5	0.88	8.8	7.1	0.5	27.0	17.3	64.1	9	1.1	0.7	25

\* une donnée aléatoire

\*\* valeur de CEC surestimée

Les parcelles 0 ne sont pas au stade du tepetate initial, qui ne contient que 0,4 à 0,5% de matière organique, 0,02 à 0,03% d'azote, 3 ppm de phosphore assimilable. Elles ont reçu une fertilisation minérale et organique ou sont un mélange avec un résidu de sol. A partir de 3 à 5 ans de culture la teneur en matière organique et en azote a presque doublé ; puis elle n'augmente plus que faiblement jusqu'à 10 et 16 ans, et étonnamment elle diminue légèrement dans les parcelles les plus anciennement cultivées. Ceci signifie qu'il n'y a plus eu d'apport organique dans les parcelles de plus de 16 ans. Les taux de P assimilable sont très variables et peuvent être très faibles (carence) à tous les âges de 3 à 60 ans ; cela dépend sans doute de la variabilité des apports d'engrais phosphaté. Il y a une baisse sensible et progressive du pH et de K échangeable à partir de 16 ans de culture, et du Ca échangeable à partir de 21-22 ans de culture ; cependant les teneurs en K et Ca échangeables demeurent largement au-dessus du seuil de déficience.

Ces résultats confirment les premières données antérieures (Quantin et al., 1992). On observe un accroissement sensible de la matière organique et de l'azote ainsi que du potentiel de fertilité au cours des 3 à 5 premières années (Tab. 5). De même la productivité augmente, puis se stabilise et devient aléatoire suivant les apports de fertilisants, les façons culturales et probablement aussi suivant l'approvisionnement en eau. En conséquence et contrairement à l'attente des expérimentateurs, il n'y a pas de relation progressive entre l'âge des parcelles, leur teneur en matière organique, en azote et en phosphore assimilable, ni évidemment leur productivité.

Deux conclusions s'imposent. Les teneurs relativement basses en carbone organique, azote total et phosphore assimilable, quel que soit l'âge des parcelles, indiquent probablement un niveau de fertilisation insuffisant pour atteindre et maintenir une production optimum de maïs. L'indépendance de la production et des paramètres chimiques montre que d'autres facteurs aléatoires, climatiques, d'alimentation en eau, ou autres sont intervenus.

Tableau 5 : Evolution des teneurs en Matière Organique, N, P assimilables et de la productivité du maïs en fonction de l'âge des parcelles testées.

Age (ans)	31	2	51	2	11	6	21	35	46	60
Rendement Kg/ha										
paille	2706	2434	1702	1621	1841	2136	2314	1995	2167	2058
grain	848	714	847	474	777	635	1310	730	854	1269
Mat.Org. %	2.5	1.8	-	2.0	2.7	2.3	1.8	1.8	2.0	1.7
N %	0.11	0.08	-	0.14	0.10	0.09	0.07	0.12	0.11	0.08
P assimil. %	18	2	-	6	8	1	1	1	3	5

### 1.2.2. Dynamique de la matière organique et de l'azote en tepetates cultivés.

Cette étude a été faite par Etchevers et al. (1997, rapport final). Elle a comporté : des observations au champ sur les 16 parcelles de tepetate cultivées depuis 0 à 60 ans, précédemment analysées, afin de déterminer les apports végétaux ; des expériences d'incubation d'échantillons de ces parcelles au laboratoire pour déterminer la dynamique de minéralisation de l'azote ; des mesures de décomposition des résidus de racine au champ.

#### 1.2.2.1. Apports en N de la biomasse végétale.

Sur chaque parcelle cultivée en maïs ont été évalués les poids en matière sèche des pailles, du grain et du résidu de récolte sur le sol, ainsi que des racines du maïs et des mauvaises herbes. La teneur en azote (en % de poids sec) a été déterminée sur les tiges et les racines du maïs. Comme nous l'avons vu précédemment les rendements en paille et en grain sont variables d'une parcelle à l'autre sans relation avec l'âge des parcelles. Il en est de même du poids de racines de maïs et de mauvaises herbes, et des teneurs en azote des tiges ou des racines du maïs. Il n'est donc possible de faire qu'une évaluation globale moyenne sur l'ensemble des dix parcelles afin d'évaluer approximativement un ordre de grandeur des exportations d'azote par la culture de maïs et des retours par les résidus de récolte sur le sol et des racines dans le sol.

Les teneurs moyennes en azote des tiges de maïs est de 0,71% ; celles des racines de 1,71%. L'apport en N des racines après décomposition est donc important si l'on considère d'après les mesures effectuées que le poids des racines de maïs représente près de 60 % du poids total du résidu de récolte (tiges + racines). Pour le grain nous avons utilisé une valeur en N de 2%.

La production moyenne des dix parcelles en matière sèche de maïs est seulement de : 2 100 kg de paille, 850 kg de grain et 440 kg de racines ; soit respectivement en azote 14,9, 17,0 et 7,5 kg/ha ; au total un besoin équivalent de 39,4 kg/ha (Tab. 6). Mais la production des mauvaises herbes ( si nos données sont exactes) est de 1 530 kg de racines et en proportion approximativement 3 000 kg de tiges ; soit respectivement en azote 26,1 kg dans les racines et 21,3 kg/ha dans les parties aériennes. Au total le besoin en azote pour le maïs et les mauvaises herbes aurait été de 86,8 kg/ha.

Les résidus de récolte en tige de maïs sont en moyenne de 290 kg, les résidus de racines de maïs 440 kg et ceux de racines de mauvaises herbes de 1 530 kg/ha ; soit un apport potentiel d'azote respectivement de 9,5 kg par les résidus du maïs et 26,1 kg par les racines de mauvaises herbes donc au total 35,6 kg/ha. Si l'on considère un taux de minéralisation annuel de 35% de ces résidus, il y aurait donc un retour de seulement 12,5 kg d'azote/ha ; soit un déficit global de 74,3 kg/ha d'azote qui provient du sol, de la fertilisation et de la fixation d'azote atmosphérique.

Tableau 6. Production en matière sèche du maïs et mauvaises herbes (M.H.) ; bilan d'azote, sur tepetates (en kg/ha).

	Production maïs					Résidus maïs			Bilan N			
	paille	grain	paille + grain	racine MH (1) tige		tige	racine	MH racine	besoin maïs	MH	ésidus maïs	MH
Mat.sèche	2100	850	2950	440	≈3000	290	440	1530	-	-	-	-
kg/ha	1620	470	2100	310	-	35	310	890	-	-	-	-
	2700	1310	3620	540	-	620	540	3030	-	-	-	-
Azote			31.9				7.5					
kg/ha	14.9	17.0		7.5	≈21.3	2.0		26.1	39.4	47.4	9.5	26.1

Ces résultats permettent d'expliquer la faible productivité du maïs en agriculture traditionnelle dans la région de México. On évalue à près de 100 kg de N/ha (sans compter les pertes par lessivage) la quantité pour produire 3 tonnes de grain de maïs/ha (optimum de la région). La fertilisation azotée est probablement très insuffisante. En outre la concurrence des mauvaises herbes est excessive puisqu'elle consomme près de la moitié de l'azote disponible. Les retours au sol par les résidus sont très limités, environ 12 kg/ha de N après minéralisation, car la majeure partie des tiges de maïs sont exportées pour la nourriture du bétail. Enfin l'analyse du sol montre que les apports de fumure organique sont restreints (faute de fumier). Il en résulte généralement une forte déficience du sol en azote et en phosphore assimilable.

#### 1.2.2.2. Azote minéralisable, labile et stable.

Des échantillons des 16 parcelles étudiées ont été mis en incubation au laboratoire pendant 17 semaines, pour déterminer l'azote potentiellement minéralisable (méthode de Stanford et Smith, 1972, modifiée Molina et al., 1983 ; Richards, 1985). On compare l'azote produit après stérilisation et sans stérilisation. Le résultat global est l'azote total minéralisable. Les courbes cumulatives (Fig. 2) font apparaître : l'azote "labile", ou rapidement minéralisable pendant les cinq premières semaines ; l'azote "stable", ou lentement minéralisable de 6 à 17 semaines .

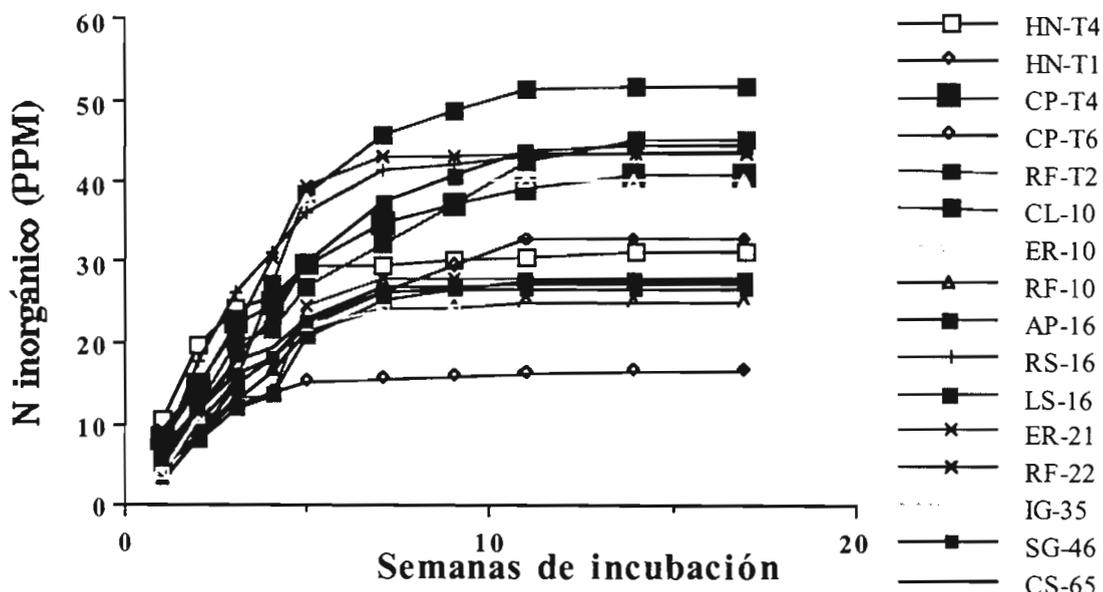


Figure 2. Azote minéralisé durant les incubations.

L'azote minéralisable total a varié de 16 à 51 ppm suivant les parcelles. Le minimum 16 ppm correspond à la parcelle de 1<sup>re</sup> année (temps 0) qui n'a pas reçu de fumure organique ; tandis que ce taux est de 30 ppm en cas d'apport de fumier. A part les parcelles de 1<sup>re</sup> année, il n'y a pas de relation entre le taux d'azote minéralisable et l'âge des parcelles, en raison sans

doute de la variabilité de la fertilité de ces parcelles suivant leur "passé cultural". Les valeurs les plus élevées de 40 à 50 ppm sont observées aussi bien dans les parcelles de 3 à 5 ans que de 10, 16 ou de 22 ans, mais pas dans celles de 35, 46 et 60 ans. Mais il y a une corrélation évidente entre le taux d'azote minéralisable et les apports de fumure organique.

L'azote labile représente 80% de l'azote minéralisable total. C'est la fraction importante pour la nutrition des plantes. Son taux varie de 15 ppm (parcelle 0 sans fumier) à 38 ppm ; soit un équivalent de 37 à 95 kg/ha de N labile (profondeur 20 cm, Da 1,25).

### 1.2.2.3. Minéralisation des résidus végétaux au champ.

Il s'agit d'une mesure de la perte en poids de ces résidus pendant la période de culture (130 jours). Pour les parties végétales supérieures en surface du sol, la perte a varié de 8 à 40% ; la fourniture de N et P de ces résidus est donc limitée. La décomposition des racines dans le sol (fig. 3) et probablement des autres résidus organiques, est d'environ 40% ; la fourniture d'azote par les racines est donc importante.

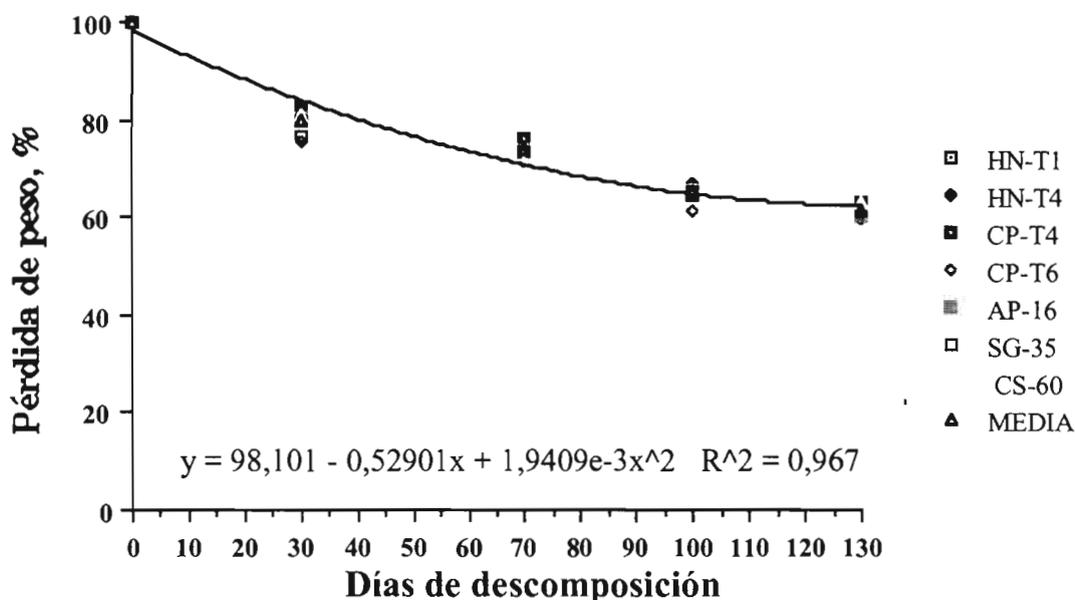


Figure 3. Décomposition des racines enterrées, au champ.

## 1.3. ACTIVITE MICROBIENNE ET SYMBIOTIQUE.

De nombreuses études et expérimentations ont été faites concernant la biomasse microbienne (Etchevers et al., 1996, 1997), l'impact de l'activité microbienne et de symbiotes spécifiques sur la productivité (Ferrera et al., 1996, 1997).

### 1.3.1. Biomasse microbienne, évaluation et dynamique.

Etchevers et al. (1997, rapport final) ont fait successivement : une comparaison de l'activité microbienne et ses produits dérivés (C, N et P) entre un tepetate non cultivé "T", un sol agricole traditionnel "AT", un sol à agriculture intensive "AI" et de haute technicité "AHI" ; puis une évaluation de la biomasse microbienne et des produits (C, N et P) sur les 16 parcelles de tepetates cultivés de différents âges déjà évoquées précédemment.

Les déterminations sur les sols comportent outre les analyses classiques de pH, matière organique, etc, les taux de N minéralisable, P assimilable (Olsen) et C soluble (Fox et Piekelek 1978) ; ainsi que l'évaluation en nombre des populations de bactéries, actinomycètes et champignons, l'évaluation de la biomasse et de ses produits en carbone, en azote et en phosphore.

L'évaluation de la biomasse microbienne a été faite selon la méthode de Jenkinson et Polwson (1976, 1980) par incubation au laboratoire en atmosphère contrôlée pendant 10 jours, sur des échantillons stérilisés ou non. Le CO<sub>2</sub> produit par la microflore et déterminé permet de calculer le carbone et le poids de la biomasse. De même, le NH<sub>4</sub> produit par la microflore, extrait et déterminé, permet de calculer N de la biomasse (Shen et al., 1984). De même pour P.

### 1.3.2. Comparaison du tepetate initial et de sols cultivés.

Le comptage du nombre de colonies de bactéries, actinomycètes et champignons (Tab. 7) développées en laboratoire révèle une grande différence d'activité microbienne entre le tepetate T et les sols cultivés AT et AI. Cette activité, faible dans le tepetate non cultivé, augmente fortement et atteint son maximum en agriculture intensive. La quasi absence de champignons dans le tepetate et son fort développement dans les sols agricoles est un fait important ; il a été mis en relation avec la mauvaise productivité du maïs local en première année de culture du tepetate, probablement en l'absence d'endomycorhizes spécifiques, en dépit d'une fertilisation minérale suffisante.

Les analyses chimiques du tepetate et des sols et de leur biomasse microbienne précisent et soulignent ces différences. Le tepetate se caractérise par un pH alcalin, une très faible teneur en matière organique, N minéralisable, P assimilable, et en des taux négligeables, voire nuls, en C, N et P de la biomasse microbienne ; il est donc quasi stérile. Dans les sols agricoles il y a une nette progression, suivant l'intensification et la technicité de la culture de AT en AI et AHI, des teneurs en matière organique, N minéralisable, P assimilable, C, N et P de la biomasse. On remarque une meilleure corrélation entre C de la matière organique et P assimilable, C et P de la biomasse, qu'avec N minéralisable et N de la biomasse. Ceci montre l'importance majeure du phosphore pour l'activité microbienne et la productivité. Rappelons aussi l'importance des mycorhizes pour accroître la disponibilité du phosphore minéral pour certaines plantes.

Tableau 7. Propriétés chimiques et biomasse microbienne du tepetate et de sols agricoles.

	Tepetate ou Sol				Biomasse			Microflore (n. colonies)		
	pH	M.O. %	N min ppm	P ass. ppm	C ppm	N ppm	P ppm	Bactéries	Actino-mycètes	Champignons
T	7.3	0.06	14	1	8	2	0	1.8x10 <sup>4</sup>	1.2x10 <sup>4</sup>	7.8x10 <sup>0</sup>
AT	6.1	0.86	34	7	134	28	7	2.7x10 <sup>5</sup>	1.5x10 <sup>5</sup>	5.4x10 <sup>3</sup>
AI	6.5	1.65	75	9	133	36	9	1.5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>6</sup>	3.6x10 <sup>4</sup>
AHI	6.5	2.10	44	21	279	38	21	-	-	-

### 1.3.3. Evolution du carbone de la biomasse microbienne en tepetates cultivés de différents âges.

Les résultats ont été regroupés en fonction de l'âge des parcelles (Tab. 8). La parcelle d'âge 0 sans apport de fumier et celle de 60 ans n'ont pas été prises en compte.

Tab. 8. C organique et C de la biomasse microbienne de tepetates cultivés de différents âges.

Age/ans	0	3	5	12-15	20-25	35-46
Nombre parcelles	1	2	2	2	3	2
Matière organique %	1.2	0.3-1.6	1.4-1.7	0.9-1.5	1.1-1.4	1.2-1.7
P ass.(Olsen) ppm	17	3-18	7-13	3-32	7-12	16-69
C soluble %	0.37	0.18-0.88	0.13-0.19	0.36-0.88	0.21-0.51	0.34-0.66
C biomasse ppm	4.5	1.6-5.6	1.4-2.0	1.4-14.7	7.5-12.8	14.5-32.0

Les résultats confirment l'hétérogénéité du statut nutritionnel et de la productivité des parcelles, indépendamment de leur âge. Il n'y a pas de relation, contrairement à l'attente des expérimentateurs, entre l'âge et la production de C de la biomasse. Cependant une analyse détaillée par parcelle, montre une relation probable mais peu significative entre C de la

biomasse, P assimilable et matière organique. Les relations avec C soluble sont aléatoires. Le fait le plus important est que les teneurs en C de la biomasse demeurent très faibles dans tous les tepetates cultivés en comparaison des sols agricoles. Ceci signifie que l'activité microbienne demeure très faible ou quasi nulle quel que soit l'âge depuis la mise en culture.

#### 1.4. ACTIVITE MICROBIENNE ET INOCULATION DE SYMBIOTES.

Une première étude lors du précédent programme (Alvarez-Solis et al., 1992) avait eu pour but de montrer l'intérêt dès la première année de culture des tepetates d'introduire des bactéries fixatrices d'azote, des genres *Rhizobium* et *Azospirillum*, en même temps qu'une fumure organique, pour la vesce et pour la culture associée de maïs-haricot et fève. Il n'y avait eu amélioration du rendement que pour la vesce, mais pas pour la culture associée. D'autre part le médiocre développement du maïs en première année, malgré une fertilisation minérale suffisante, suggérait une carence en micro-organismes susceptibles de favoriser l'assimilation du phosphore minéral. Ferrera et ses collaborateurs du Collège de Postgraduation en Sciences Agronomiques de Montecillo (Ferrera et al., rapport final 1997), ont entrepris une analyse systématique de l'activité microbienne et de l'intérêt de micro-organismes symbiotes (bactéries fixatrices d'azote, endomycorhizes) pour la productivité des tepetates cultivés. Ils ont expérimenté au champ et en serre : l'inoculation de bactéries fixatrices d'azote, à savoir des souches de *Rhizobium* spécifiques de diverses légumineuses telles que haricot, fève, vesce et mélilot blanc ; des souches d'*Azospirillum* symbiote associé au maïs ; l'inoculation de souches de *Glomus* (sp et *agregatum*), endomycorhizes associées au maïs, à l'oignon et à une légumineuse arbustive *Eysenhardtia polystachia*. Ces endomycorhizes facilitent l'assimilation du phosphore minéral. En outre ils ont testé la synergie de *Rhizobium* et *Glomus* sur des espèces arborées de *Leucaena leucocephala* et *Acacia constricta*.

##### 1.4.1. Bactéries fixatrices d'azote.

###### 1.4.1.1. Expérimentation au champ.

###### A. Station San Miguel Tlaixpan (Mexico) ; évaluation d'agro-écosystèmes.

Il s'agit d'une étude associée à une expérimentation agronomique de diverses plantes et rotations culturales, sur tepetate cultivé en 2<sup>e</sup> année ; essai mis en place en 1994 par Prat et son équipe (Prat, rapport final 1997, voir partie agronomique). Le suivi microbiologique a concerné les plantes suivantes : maïs seul, maïs associé à haricot et fève, haricot, fève, pois, vesce et *Medicago polymorpha* (luzerne). Seules ont été inoculées : le maïs par *Azospirillum* ; le haricot et la fève par *Rhizobium*. Les traitements comparés sont : le témoin non inoculé sur tepetate ou sur sol agricole ; les plantes inoculées sur tepetate avec fertilisation minérale (80 N, 60 P) ou organique (fumier 20 t/ha). Les paramètres mesurés sont : biomasse végétale supérieure, population microbienne totale (bactéries, champignons, actinomycètes), activité de la nitrogénase, nombre de nodules de *Rhizobium* (total et ceux formés par la souche inoculée).

###### A.1. Résultats des comptages des population et nodules:

Le comptage global de la population microbienne du tepetate cultivé ne donne pas de différence significative, ni entre plantes, ni entre traitements. Il y a toujours abondance. Cette mesure ne présente aucun intérêt.

Le nombre de nodules de *Rhizobium* sur le tepetate cultivé est en moyenne de 60 par plant de haricot et de 300 par plant de fève, sans différence significative entre fumure minérale ou organique. Sur le sol agricole (non inoculé) le nombre de nodules n'était que de 2 pour le haricot et 66 pour la fève. Sur tepetate cultivé, le nombre de nodules issus de la souche inoculée au haricot ne représentent que 10% du total ; il y a abondance des souches natives. Donc le tepetate cultivé en 2<sup>e</sup> année (après culture d'orge et vesce) présente une bonne population de *Rhizobium*.

## A.2. Activité de la nitrogénase.

Cette activité est déterminée par la quantité d'éthylène produite pendant la réaction de ammonification, exprimée en nmol/pl/h. Les valeurs mesurées ne sont pas corrélées avec le nombre de nodules par plante. Cette activité est dépendante de la bactérie (*Rhizobium* ou *Azospirillum*) et de la souche inoculée ou native. En proportion l'*Azospirillum* symbiote externe associé au maïs fixe moins d'azote que le *Rhizobium* symbiote interne associé aux légumineuses. En outre, on a observé une variation sensible de cette activité de l'*Azospirillum* suivant trois variétés de maïs (Tab. 9 et Fig. 4).

Les résultats majeurs sont les suivants : Dans le cas du maïs et du haricot l'inoculation a fortement accru l'activité de la nitrogénase c'est à dire la fixation d'azote ; apparemment non dans le cas de la fève. La fixation d'azote par le *Rhizobium* est supérieure à celle d'*Azospirillum*. Cette fixation n'est pas significativement supérieure en culture associée maïs + légumineuse qu'en monoculture. La fumure organique en culture associée accroît fortement l'activité des bactéries fixatrices d'azote pour le maïs, le haricot et la fève tandis que la fertilisation minérale l'inhibe. Mais il n'y a pas de relation avec la production de biomasse végétale, car la fumure minérale seule assure aussi bien les besoins de la plante. La fève avec ou sans inoculation assure une bonne activité de fixation d'azote. De même le pois. Mais la vesce et la luzerne, sans inoculation, avec ou sans fumure organique n'ont qu'une médiocre activité. Dans tous les cas il n'y a pas de relation entre activité de la nitrogénase et production de la biomasse végétale (Fig. 6 a et b). Mais dans l'alternative d'une fumure organique il est sans doute très utile de faire une inoculation de souches spécifiques de bactéries fixatrices d'azote.

Tableau 9. Activité de la nitrogénase en nmol/pl/h.

Tepetate + inoculation				Sol non inoculé
	Monoculture + FM	Culture associée + FM	Culture associée + MO	Culture associée + FM
Maïs	190	0 à 170	200 à 700	35
Haricot	-	600 à 900	1 600	57
Fève	1 600	2 400 à 3 100	7 300	2 200
Tepetate non inoculé, monoculture				
	+ FM	+ MO		
Pois	600 à 4 600	1 900		
Vesce	60 à 80	90		
Luzerne	20 à 80	120		

FM : fertilisation minérale, MO : fumure organique, Culture associée : maïs, fève, haricot.

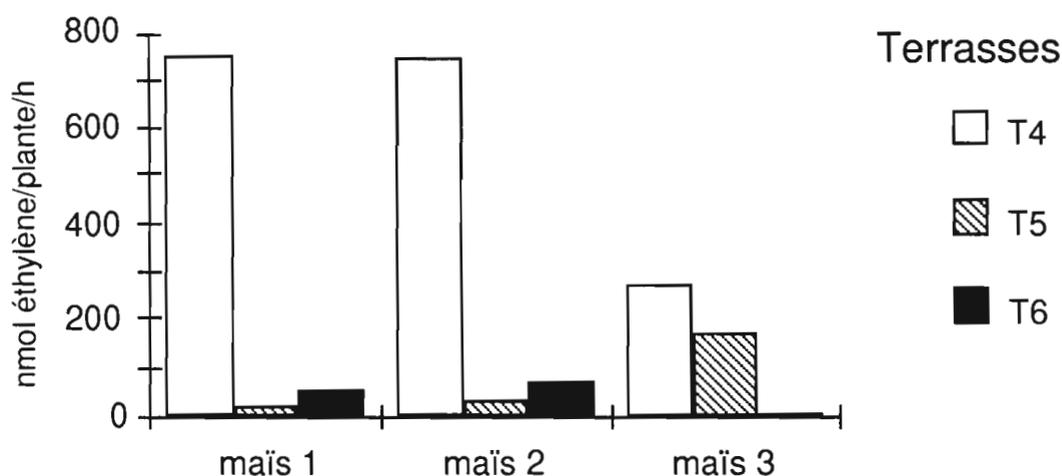


Figure 4. Activité de la nitrogénase dans le cas de 3 variétés de maïs inoculées par *Azospirillum*, avec fumure organique (T4) ou minérale (T5, T6).

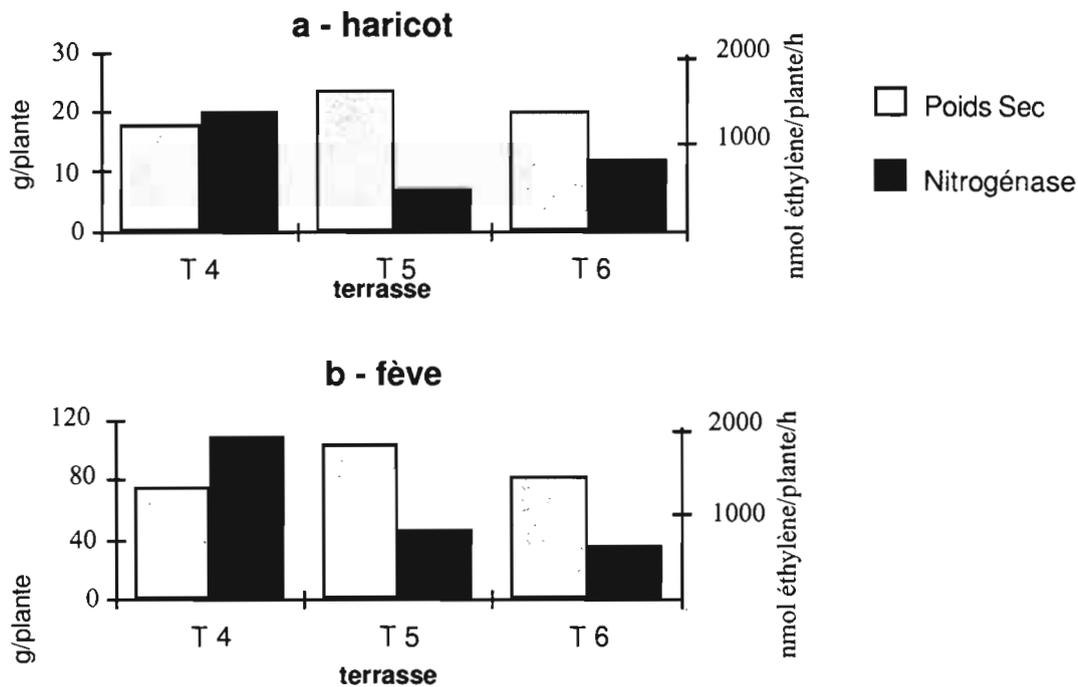


Figure 5. Activité de la nitrogénase et biomasse végétale dans le cas du haricot (a) et de la fève (b), avec fumure organique (T4) ou minérale (T5, T6).

#### B. Station de Tlalpan (Tlaxcala). Mélilot blanc inoculé par *Rhizobium meliloti*.

Dans cet essai sur tepetate cultivé il y a eu comparaison d'un apport de fumier (40 t/ha) et inoculation de *Rhizobium* (plusieurs souches associées), avec le témoin sans fumier ni inoculation. Les résultats après 90 jours de végétation après le semis ne montrent pas de différence significative entre les deux traitements, ni en rendement en matière sèche, ni de l'activité de la nitrogénase, ni du nombre de population microbienne du sol. Seule, une teneur moyenne en protéine du fourrage est un peu plus élevée dans le traitement avec inoculation et apport de fumier, soit de 22% au lieu de 20% pour le témoin. Il est probable que cet essai n'a pas été fait avec la rigueur nécessaire et que le témoin n'était pas le tepetate stérile initial.

Cependant une deuxième récolte 60 jours après la première a produit de biens meilleurs résultats sur le traitement avec fumier et inoculation que sur le témoin, respectivement : 27 et 12 t/ha de matière sèche ; 22 et 19% de protéine ; 82 et 71% de digestibilité. Mais il n'y a encore pas eu de différence significative de l'activité de la nitrogénase ; donc cette différence est plus due à la fertilisation organique qu'à une amélioration de la fixation d'azote. Un essai en vase de végétation a permis de mieux contrôler cette expérimentation.

##### 1.4.1.2. Expérimentation en serre, sur mélilot blanc.

La culture de mélilot blanc en vase de végétation sur tepetate initial a comporté les traitements suivants : témoin + apport de phosphore ; inoculation de plusieurs souches associées de *Rhizobium meliloti* et apport de vermicompost à 5, 10 ou 15 t/ha ; apport de 15 t/ha de vermicompost et inoculation distincte de 6 souches de *Rhizobium*. Les mesures concernent le poids de matière sèche en g/plant et l'activité de la nitrogénase en micromoles/plante/heure d'éthylène.

Le rendement en matière sèche n'est que de 1,2 g/pl pour le témoin et de 1,5 pour l'apport de P sans inoculation. Dans tous les traitements avec vermicompost (5, 10 et 15 t/ha) et inoculation de *Rhizobium*, il y a augmentation du poids sec entre 2,8 et 3,0 g/pl. Le maximum est atteint pour l'apport de 15 t/ha de vermicompost avec inoculation multisouche, ou la meilleure des souches isolément. L'activité de la nitrogénase est nulle pour les

traitements : témoin + P, 5 t de vermicompost + multisouche ; faible  $\approx 2$  pour 10 t de vermicompost + multisouche ; notable 40 micromole/pl/ha pour 15 t de vermicompost et multisouche ; variable de 3 à 26, pour 15 t de vermicompost et les diverses souches séparées.

Il y a donc une certaine indépendance entre le rendement en matière sèche et l'activité de la nitrogénase ; mais une forte corrélation avec l'apport de vermicompost. Cependant l'inoculation de *Rhizobium* spécifique présente un intérêt certain pour la fixation d'azote ; certaines souches sont plus actives que d'autres. L'apport de phosphore seul ne suffit pas. La fertilisation organique seule est efficace ; mais une fertilisation minérale complète (N, P) le serait sans doute autant.

#### 1.4.2. Endomycorhizes favorisant la nutrition en phosphore.

L'inoculation de diverses souches de *Glomus* a été expérimentée en serre sur *Eysenhardtia polystachya* et sur maïs, au champ sur oignon.

##### 1.4.2.1. Expérimentation en serre ;

###### A. Sur *Eysenhardtia polystachya* ;

Les traitements comportent séparément 3 souches de *Glomus* (z1, z2 et agregatum), puis une souche de *Glomus agregatum* associée à trois doses de fumier à 5, 10 et 15% du sol. Trois catégories d'observations ont été faites à savoir :

- développement végétatif : hauteur de la tige, diamètre basal, nombre de feuilles, volume racinaire et biomasse végétale ;
- qualité du fourrage : taux de N, K et P
- activité de l'endomycorhize : taux de colonisation de la plante, nombre de spores libres du sol.

Le tableau suivant (Tab. 10) résume ces résultats. Les endomycorhizes seules améliorent significativement par rapport au témoin le développement végétal ainsi que la teneur du fourrage en N, P et K. L'apport du fumier a un effet très significatif par rapport à la seule inoculation d'endomycorhizes à partir de 10 t/ha : la quantité de matière sèche produite est 2,8 fois plus grande ; le fourrage contient plus d'azote et de potassium ; mais sa teneur en phosphore est un peu inférieure (0,16/0,21%) à celle du traitement sans apport de fumier. Cet effet très marqué des endomycorhizes est donc dû à l'amélioration de la nutrition en phosphore. La colonisation de la plante par les endomycorhizes diminue un peu en présence de fumier, alors que le nombre de spores externes dans le sol augmente. Le fort accroissement du rendement avec l'apport de fumier est dû à l'amélioration de la nutrition azotée, qui s'ajoute à l'amélioration de la nutrition en phosphore par les mycorhizes. La dose optimale de fumier (en poids sec) à apporter est d'au moins 10 t/ha.

Tableau 10. Effet des mycorhizes sur *Eysenhardtia polystachia* (à 134 jours).

	Développement végétal					Qualité fourrage			Activité mycorhizes	
	Tige		Feuilles n	Bio masse g/pl.	Racine s v.r. mL	N	P	K	Coloni -sation %	Spores n
	cm	db								
Témoin	2.5	1.0	4.6	0.02	0.46	1.07	0.09	0.96	0.0	19
<i>Glomus</i> Zac 1	15.6	2.7	21.5	0.58	2.05	1.30	0.22	1.20	78	56
<i>Glomus</i> Zac 2	14.4	2.7	18.5	0.47	1.10	1.30	0.21	1.10	23	44
<i>Glomus agregatum</i> + fumier 5 t/ha	18.0	2.8	22.7	0.62	1.50	1.87	0.16	1.33	57	93
+ fumier 10 t/ha	27.0	3.9	32.3	1.30	2.40	1.90	0.16	1.40	54	143
+ fumier 15 t/ha	24.6	4.0	34.0	1.32	2.32	1.83	0.16	1.34	46	189

h : hauteur ; db : diamètre basal ; vr : volume racinaire ; biomasse : matière sèche/plante ; ;  
colonisation : taux de colonisation par endomycorhizes.

### B. Sur maïs.

Le maïs a été inoculé par une seule souche de *Glomus Zac 19*, considérée comme performante, mais sans savoir si elle est spécifique du maïs.

Le traitement endomycorhize + vermicompost (12 t/ha) a été testé sur 6 variétés locales de maïs, à savoir : negro, palomero, chino, blanco précoce, blanco tardif et cañuela. Les mesures à 50 jours depuis le semis de la hauteur (h en cm), du poids sec (g/plant) et de la photosynthèse (micromoles/m<sup>2</sup>/s) varient significativement entre variétés (Tab. 11).

Tableau 11. Hauteur, poids sec et photosynthèse (à 50 j) de variétés de maïs inoculées en tepetate cultivé.

Variété	Hauteur cm	Poids sec g	Photosynthèse
Negro	29	1.41	2.16
Palomero	31	1.32	4.62
Chino	37	1.63	4.36
Blanco précoce	32	1.55	3.79
Blanco tardif	37	1.77	6.32
Cañuela	37	1.87	6.32

Ce sont les variétés blanc tardif et cañuela qui sont à ce stade végétatif potentiellement les plus productives.

Pour distinguer les effets séparés ou cumulés des endomycorhizes et du vermicompost (12 t/ha), 3 traitements sur une même variété (probablement cañuela) ont été testés : endomycorhize seule (EM), vermicompost seul (V), les 2 (EM + V), par rapport au témoin (T).

Tableau 12. Effet (à 50 j) de l'endomycorhize et du vermicompost sur une variété de maïs.

Traitement	Hauteur cm	Poids sec g	Photosynthèse
T	34	1.37	4.87
EM	31	1.27	4.33
V	35	1.77	4.82
EM + V	35	1.95	4.34

L'endomycorhize seule est inefficace. L'apport de fumure organique, bien que limité (V = 12 t/ha) accroît significativement le développement de la plante (hauteur, surface foliaire, volume racinaire) et le rendement ; l'association EM + V, n'améliore que très faiblement le rendement en poids sec. Une mesure du taux de colonisation par l'endomycorhize de la variété cañuela, en présence de vermicompost montre un accroissement sensible de 3 à 13% par rapport à l'EM seule. Cependant cela ne se traduit pas par une nette augmentation du rendement par rapport à la fertilisation organique seule.

Cet essai ne démontre pas l'intérêt pour le maïs de l'inoculation d'endomycorhize *Glomus Zac 19*. Mais trois remarques limitent cette conclusion : la souche d'EM n'était peut être pas spécifique des variétés de maïs utilisées ; le temps d'observation à 50 jours est trop court (il faut attendre 100 à 200 jours) ; le tepetate témoin ne paraît pas être à son état stérile initial. Il conviendrait de refaire cette expérimentation d'une manière plus rigoureuse.

#### 1.4.2.2. Expérimentation au champ, sur oignon.

Cet essai a été fait (Tab. 13) sur la station de Tlalpan (Tlaxcala). Une seule souche de *Glomus Zac 19*, comme pour le maïs, a été inoculée. Il y a eu 5 traitements : témoin (T), endomycorhize (EM), vermicompost à 5 t/ha en poids sec (V), les deux EM + V et la fertilisation minérale seule (120, 60, 00 - FM). Les mesures ont été faites à 60 et 120 jours après plantation, à savoir : le poids sec en g/plant de la tige (PA), le volume racinaire (VR) en cm<sup>3</sup>, le poids frais du bulbe (PB) en g/plant, le rendement en kg/ha (R).

Tableau 13. Effet d'endomycorhize, de vermicompost et fertilisation minérale sur la culture d'oignon en tepetate.

Traitement	PA	VR	PB	R
T	1.42	1.14	13.21	963
EM	2.16	1.86	18.04	1765
V	7.16	4.90	71.55	4023
EM + V	7.55	5.60	113.77	4529
FM	10.96	5.20	120.46	4851

Ces résultats montrent encore un faible effet de l'endomycorhize seule par rapport au témoin ; cependant le rendement a presque doublé. La fumure organique, même à faible taux (5 t/ha) a accru très sensiblement le développement et le rendement de l'oignon qui a été multiplié par 4. L'association EM + V améliore un peu cet effet, montrant une certaine efficacité de cette endomycorhize. Mais la fertilisation minérale seule améliore encore plus la production. Peut être la fertilisation organique était à un taux insuffisant. Nous ne sommes pas certain que la souche de *Glomus* utilisée était bien spécifique de la plante cultivée.

#### 1.4.3. Synergie de *Rhizobium* et *Glomus*, sur tepetate cultivé.

Une expérimentation systématique a été faite sur deux espèces arborées de légumineuse : *Leucaena leucocephala* et *Acacia constricta*. (Tab. 14). Les traitements sont : témoin (T), *Rhizobium* (R), *Glomus* (G), les deux RG, RG + azote (RGN), RG + phosphore (RGP), le tout (RGNP). Les mesures sont : colonisation microbienne (CN en %), hauteur (h en cm), volume racinaire (VR en cm<sup>3</sup>).

Tableau 14. Effet comparé de *Rhizobium*, *Glomus* et fertilisation minérale sur *Leucaena l.* et *Acacia c.* (à 90 jours).

Traitement	<i>Leucaena leucocephala</i>			<i>Acacia constricta</i>		
	CM	h	VR	CM	h	VR
T*	50	10	1.8	-	12.1	1.7
R*	62	9.6	2.1	38	14.2	1.9
G	61	8	1.3	83	14.8	1.1?
RG	64	-	1.3	68	11.5	1.9
RGN	46	18.5	1.9	85	18.2	2.2
RGP	62	10.6	2.7	55	19.7	2.2
RGNP	60	18.5	3.8	61	12.1?	1.6?

T\* R\* traitements sur tepetate non stérilisé au départ (souches natives).

Dans le cas de *Leucaena leucocephala*, l'inoculation de *Rhizobium* produit une amélioration significative ; celle-ci est renforcée par une fertilisation minérale complète (NP). Mais l'inoculation de *Glomus* seul ou associé n'a aucun effet significatif.

Dans le cas d'*Acacia constricta*, une légère amélioration est apportée par *Rhizobium* ou *Glomus* seuls ou associés ; mais elle est peu significative. La fertilisation minérale azotée ou phosphatée améliore nettement le développement végétatif ; mais l'intérêt d'une inoculation associée (RG) n'est pas démontré.

En conclusion : l'intérêt d'une simple inoculation de *Rhizobium* ou de *Glomus*, sans améliorer en même temps le potentiel nutritif en N et P du tepetate initial par une fertilisation minérale ou organique, n'a pas été démontré, (sauf exception de *Glomus* pour *Eysenhardtia* et l'oignon).

Dans le cas d'une inoculation de *Rhizobium*, son efficacité est dépendante d'un apport de matière organique (fumier, compost) à des doses limitées, sinon c'est la matière organique qui assure presque totalement la nutrition minérale de plante. Une fertilisation minérale inhibe le développement du *Rhizobium*, mais elle assure à elle seule une bonne productivité.

Dans le cas de *Glomus*, l'efficacité à améliorer la nutrition en phosphore et le développement de la plante a été démontrée pour certaines plantes, notamment *Eysenhardtia polystachia*. Elle est encore sensible pour l'oignon, mais peu évidente pour le maïs et d'autres plantes. Comme pour le *Rhizobium*, l'efficacité de *Glomus* est sensiblement accrue par un apport modéré (5 t/ha) de fumure organique. Son activité est un peu réduite par des apports plus élevés (10 à 15 t/ha) et elle est inhibée par une fertilisation minérale seule. Cependant les meilleurs rendements sont obtenus par une fumure organique assez abondante (10 à 15 t/ha en poids sec), l'intérêt de la mycorhize étant alors réduit, ou par une fumure minérale seule.

La synergie *Rhizobium*-*Glomus*, souvent constatée ailleurs (voir littérature), n'a pas été clairement démontrée dans nos essais sur tepetate. Il faudrait sans doute une expérimentation plus rigoureuse, en milieu tepetate bien contrôlé et avec des souches de *Rhizobium* et de *Glomus* vraiment spécifiques des variétés des plantes cultivées. Dans la perspective d'un aménagement économique de l'agro-système, la recherche de souches spécifiques adaptées et d'une fertilisation organique et minérale minimum de départ adéquate pour le bon développement des symbiotes et de la plante, serait à entreprendre avec plus de soin encore.

## **2. CANGAHUA D'EQUATEUR.**

### **2.1. FACTEURS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DE FERTILITE.**

Nous ne traiterons que de la cangahua de type duripan calcaire, qui est la plus souvent cultivée et qui a fait l'objet de nos expérimentations sur les stations de Cangahua (Cayambe), la Tola (Tumbaco) et Licto (Riobamba). Les propriétés principales de la cangahua ont été présentées dans la première partie de ce rapport. En résumé les facteurs de fertilité, négatifs et positifs, de la cangahua calcaire sont les suivants.

#### **2.1.1. Facteurs physiques.**

La structure initiale est massive et dure à l'état sec ; parfois elle le demeure à l'état humide dans les matériaux calcaires (plus de 5% de calcaire); la porosité globale est d'environ 42% ; mais la macroporosité et la perméabilité dans la masse sont très faibles, la vitesse d'infiltration de l'eau étant de 1 à 3 mm/heure. La faible accessibilité à l'eau et à l'air ainsi que la dureté sont la cause première de la stérilité de ce matériau. Cette contrainte peut être réduite, comme dans le cas des tepetates mexicains, par une fragmentation appropriée à une taille optimum d'agrégat entre 2 et 5 mm. La stabilité de ces agrégats (< 2 mm) varie selon la teneur en calcaire. La cangahua peu calcaire (< 5%), cas le plus fréquent, est instable à l'eau (20 à 50% d'agrégats stables) et assez facile à fragmenter à l'état humide. Mais cette instabilité est une cause première de dégradation structurale et d'érodibilité lors de la mise en culture.

La teneur en argile (< 2  $\mu$ m) est plutôt faible : 7 à 12% à Cangahua, 7 à 8% à La Tola, 12% à Licto. Mais le taux d'argile + limon fin (< 20  $\mu$ m) est considérable : de 25 à 40% à Cangahua, 30 à 37% à La Tola, 47% à Licto. C'est un matériau limono-sableux, qui présente une bonne cohésion, une importante microporosité (35 à 40% en volume) et une assez forte capacité de rétention en eau ; celle-ci est de 19 à 21% (en poids de sol sec) à l'état initial et peut atteindre 24 à 25% après fragmentation. C'est un facteur favorable pour la réhabilitation en sol agricole. D'autre part, la fraction argileuse a une forte capacité d'échange cationique (1 à 1,5 me/g) qui permet une forte rétention de bases échangeables (16 à 22 cmol/kg de sol total).

#### **2.1.2. Facteurs chimiques.**

La teneur en calcaire des cangahuas expérimentées est de 2 à 5%. Le pH est légèrement alcalin : de 7 à 7,8 à La Tola (climat subhumide), 8,2 à 8,6 à Cangahua (climat subaride). Au-dessus de 7,8 c'est une contrainte qui limite la disponibilité de certains micro-éléments (Fe, Mn, Cu) ; cette limite sera réduite par des apports de fumure organique.

Le taux de carbone (0,1 à 0,5%) et d'azote (0,02 à 0,04%) sont très faibles, ainsi que les teneurs en phosphore assimilable (Olsen, 0,2 à 1 ppm). La carence en N et P est la deuxième cause majeure de stérilité. Les essais en vase de végétation (voir plus loin) l'ont confirmé. En outre la carence en matière organique s'accompagne d'une quasi stérilité microbienne et d'une médiocre stabilité des agrégats. Elle devra être compensée par une fumure organique.

La capacité d'échange de cations (CEC) effective varie de 16 à 22 cmol/kg. Elle est totalement saturée par les bases échangeables, à savoir en cmol/kg d'élément échangeable : Ca de 4 à 14, Mg de 4 à 8, K de 0,4 à 1,7. Ces valeurs sont élevées ; il n'y a aucun risque de déficience. Cependant dans certains échantillons le rapport Mg/Ca est relativement élevé et K/Ca + Mg relativement bas ; ce qui peut entraîner un certain déséquilibre par excès de Mg et par déficience légère de K pour la plante. En général, la forte rétention en bases échangeables et les valeurs élevées en Ca, Mg et K échangeables sont favorables à la constitution d'un sol agricole fertile. Le tableau suivant (Tab. 15) montre les valeurs observées sur les parcelles de cangahua expérimentées à La Tola.

Toutes les propriétés, physiques, chimiques et microbiologiques, de la cangahua sont semblables à celles des tepetates mexicains non ou peu calcaires, de type fragipan. Sauf cependant une teneur moindre en argile et en conséquence une capacité un peu plus faible de rétention en eau et en bases échangeables, parfois une teneur plus limitée en K échangeable et souvent un pH plus alcalin en condition subaride.

Tableau 15. Propriétés chimiques de la cangahua, La Tola (17 échantillons).

Analyse	MO %	N %	pH eau	P (Olsen) ppm	----- mé/100 g -----			
					Ca	Mg	Na	K
Moyenne	0.52	0.024	7.1	0.17	5.67	3.86	0.16	0.83
Minima	0.07	0.02	6.7	0.02	3.75	4.59	0.09	0.41
Maxima	0.95	0.04	7.6	1.00	10.00	7.87	0.26	1.17

Toutes les propriétés, physiques, chimiques et microbiologiques, de la cangahua sont semblables à celles des tepetates mexicains non ou peu calcaires, de type fragipan. Sauf cependant une teneur moindre en argile et en conséquence une capacité un peu plus faible de rétention en eau et en bases échangeables, parfois une teneur plus limitée en K échangeable et souvent un pH plus alcalin en condition subaride.

## 2.2. EXPERIMENTATION EN VASE DE VEGETATION ; DETERMINATION D'ELEMENTS LIMITANTS.

Cette expérimentation a été faite à l'Université Centrale d'Equateur par un étudiant G. Cisneros, sous la conduite de G. Trujillo, J. Flor et M. le Professeur M. Lalama (Trujillo et Zebrowski, rapport final 1997). La méthode est celle de "l'élément manquant" de Chaminade. Elle a été appliquée à deux échantillons venant des stations de Cangahua et de La Tola (Tumbaco) ; voir ci-dessous (Tab. 16) les propriétés chimiques. La plante cultivée est un ray grass (*Lolium perenne*). Il y a eu trois récoltes de la partie végétative supérieure à 45, 80 et 115 jours et les mesures suivantes : tallage, hauteur de plante, nombre de feuilles, poids de matière verte et matière sèche.

Tableau 16. Propriétés chimiques des échantillons de Cangahua (CAN) et Tumbaco (TUM).

	pH	MO %	N tot %	----- ppm -----							
				P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
CAN	8.4	0.18	0.09	1.8	28.5	203	69	17	7	1.8	0.14
TUM	7.3	-	-	1.0	14.5	148	62	14	5	1.0	0.06

Les résultats concernant seulement le poids de matière sèche sont donnés dans le tableau suivant (Tab. 17), en moyenne de 6 répétitions par traitement.

Tableau 17 : Poids de matière sèche des 3 récoltes (g/pot) en vase de végétation.

Traitement		Cangahua			Tumbaco		
		1er C	2e C	3e C	1re C	2e C	3e C
T0	témoin	0.35	0.11	0.5	0.51	0.26	0.15
T1	N seul	1.30	1.08	1.0	1.35	1.16	0.86
T2	complet	4.09	11.32	15.5	5.78	12.07	12.82
T3	sans Mn	4.01	12.32	16.6	5.45	12.78	14.46
T4	sans Zn	4.05	11.38	14.6	5.95	11.77	12.98
T5	sans Fe	3.93	9.49	9.5	5.74	10.79	12.52
T6	sans Cu	4.59	10.99	13.2	5.80	10.99	12.53
T7	sans S	4.79	12.09	15.4	5.38	14.85	17.89
T8	sans Mg	5.28	11.90	12.3	6.70	10.68	11.46
T9	sans K	5.03	9.51	10.3	6.80	10.24	10.88
T10	sans P	2.36	9.45	7.0	2.68	5.84	6.31

Les traitements sont : témoin, azote seul, solution nutritive complète, solution nutritive avec un élément marquant (sans Mn, etc...) pour en déterminer la déficience éventuelle dans la cangahua.

Ces résultats en 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> récolte, montrent les faits suivants : la quasi stérilité du témoin ; le très faible effet de l'azote seul ; le rendement optimum de la fertilisation par une solution nutritive complète ; une diminution de plus de 50% du rendement en l'absence de phosphore ; une légère baisse en l'absence de potassium et même de magnésium à partir de la 3<sup>e</sup> coupe ; en outre sur l'échantillon de Cangahua, une légère baisse en l'absence de fer qui peut être due à un blocage de cet élément au pH supérieur à 8 du matériau.

Ces résultats témoignent donc d'une carence en azote et d'une forte déficience en phosphore -deux éléments limitants majeurs du développement végétal- ainsi qu'une légère déficience probable en potassium et en magnésium, qui ne s'explique que par l'excès relatif du calcium dans la solution de sol. Il y a aussi un léger blocage du fer dans l'échantillon le plus alcalin de la station de Cangahua, mais pas des autres micro-éléments. Il n'y a pas de déficience en soufre, mais peut être un léger excès naturel dans l'échantillon de Tumbaco.

En conclusion, la fertilisation minérale devrait être essentiellement à base de N et de P selon la quasi totalité des besoins de la plante cultivée. Pour une production maximum seulement, un léger complément en K et Mg pourrait être utile, surtout après plusieurs années de culture, pour compenser l'excès de Ca. Dans le cas des matériaux plus alcalins la baisse du pH par un apport de fumure organique devrait réduire la légère déficience en Fe.

## BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE II

- Alvarez-Solis J.D., Ferrara-Cerrato R. et Zebrowski C., 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *Terra* 10 : 419-420.
- Báez A., Ascencio E., Prat C. y Márquez A., 1996. Analisis del comportamiento de cultivos en un tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal 1993-1995. (Texcoco, México). Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito (en publication).
- Baumann J., 1996. Die wirkung der tieflockerung auf erodierbarkeit und ertragspotential verhärteter vulkanascheböden im staat Tlaxcala/Mexiko. *Boden und landschaft - Schriftenreihe zur bodenkunde, landeskultur und landschaftsökologie*, Bd. 10, Giessen.
- Becher H.H. et Kainz M., 1983. Auswirkungen einer langjährigen stallmistdüngung auf das boden gefüge im lößgebiet bei straubing. *Z. Acker u. Pflanzenbau*, 152 : 152-158.
- Etchevers J. et al., 1997. Informe final, contrat CCE n° TS3\* CT 930252.
- Etchevers J. et Brito H., 1996. Levantamiento nutrimental de los tepetates de Mexico y Tlaxcala. Actes simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).
- Etchevers J., Pérez A. et Navarro H., 1996. Dinámica del nitrógeno y de la materia orgánica en los tepetates. Actes simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).
- Fechter U. et Werner G., 1997. Informe final, contrat CCE n° TS3\* CT 930252.
- Ferrera R. et al., 1997. Informe final, contrat CCE n° TS3\* CT 930252.
- Ferrara-Cerrato R., Ortiz-Caton A. et al., 1996. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia sobre los microorganismos. Actes, simposio suelos volcanicos endurecidos, Quito, 1996 (en publication).
- Fox R.H. and Piekielek. 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of soil. *Soil Science Society of America Journal*. 42 : 751-753.
- Garcia C.R., 1996. Vermicomposta e inoculación micorrizica en maíz y cebolla cultivados en tepetate. Tesis profesional. UACH. Chapingo; Edo. de Mexico. 130 p.
- Jenkinson D. and Powlson D., 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-V. A method for measuring soil biomass. *Soil biology and Biochemistry*. 8: 209-213.
- Jérome G., 1992. Etude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le tepetate, dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique. Comparaison avec un sol non induré. Mémoire de fin d'études, ISTOM, juin 1992, 191 p.
- Molina J.A.E., Clapp C.E., Shaffer M.J., Chichester F.W., Larson W.E., 1983. A model of nitrogen and carbon transformations in soil : description, calibration and behavior. *Soil Science Soc. Am. J.* 47 : 85-91.
- Prat C. et al., 1997. Rapport final, contrat CCE n° TS3\* CT 930252.
- Quantin P. et al. 1992. Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et de Tlaxcala en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final CEE 77 p.
- Rios G.S., 1994. Manejo de la endomicorriza V-A en plantas arbóreas para la rehabilitación de tepetates. Tesis licenciatura. Universidad autonoma Chapingo.
- Shen S.M., Pruden G. and Jenkinson D.S., 1984. Mineralization and immobilization of nitrogen and fumigated soil and the measurement of microbial biomass nitrogen. *Soil biology and Biochemistry*. 16 : 437-444.
- Stanford G. and Smith S.J., 1972. Nitrogen mineralization potential of soil. *Soil Science Soc. Am. J.* 36 : 465-472.
- Trujillo G. et Zebrowski, 1997. Rapport final, contrat CCE n° TS3\* CT 930252.
- Werner G., 1988. Los suelos en el Estado de Tlaxcala, Altiplano central mexicano. Notice explicative avec collaboration de G. Miehllich, édité conjointement par l'Univ. J. Liebig Giessen, Gouv. Tlaxcala, UAT, Ed. Steiner Verlag Wiesbaden. 198 p.

## CHAPITRE III

### EXPÉRIMENTATION AGRONOMIQUE ET PRODUCTIVITÉ

#### 1. OBJECTIFS, STATIONS ET METHODES.

Le but de cette expérimentation est de déterminer la productivité agricole des sols volcaniques indurés après leur mise en culture. Les traitements sont choisis en fonction de pratiques locales et de nouvelles techniques à promouvoir. Il s'agit de pratiques économiques et durables dans le contexte socio-économique régional. Dans ce sens il y a eu une étude composée de l'impact d'une fertilisation organique ou minérale et de l'inoculation de micro-organismes symbiotiques ; une expérimentation de systèmes de rotation culturale ou de variétés adoptées de plantes cultivées ; une estimation des coûts de production (voir chap. IV, analyse socio-économique) et de la rentabilité.

Dans le cadre du précédent programme, au Mexique seulement (Quantin et al., 1992, rapport scientifique final), l'expérimentation agronomique avait été limitée à une seule station (Hueyotlipan, Tlaxcala) et à la première année de culture du tepetate, en 1991. Parallèlement, il y avait eu des observations sur des terrasses de tepetates cultivés de différentes années, en condition paysanne.

Dans la perspective de ce deuxième programme, l'expérimentation a été poursuivie à Hueyotlipan en 1992 et 1993, puis dans le cadre de ce programme en 1994 et 1995. Au départ, il s'agissait d'étudier l'évolution de la productivité en fonction du nombre d'années de culture et aussi de plusieurs rotations culturales. En 1995, il s'est ajouté un essai comparé systématique de la fertilisation organique ou minérale et de l'inoculation de symbiotes, en 5<sup>e</sup> année de culture de maïs et fève ; il y a également une comparaison de 4 variétés de maïs.

Une deuxième station sur tepetate a été installée en 1993 à San Miguel Tlaixpan (Texcoco, Mexico) pour expérimenter sur des terrasses de dimension paysanne l'aptitude à l'érosion suivant différentes pratiques et rotations culturales (voir Chap. V, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés cultivés). Cette étude s'est poursuivie dans le cadre de ce programme en 1994, 1995 et 1996. Une deuxième expérimentation a été mise en place en 1995 et poursuivie en 1996 pour un étude systématique de la fertilisation organique ou minérale et de l'inoculation de symbiotes, en première et deuxième année de cultures. Parallèlement, il y a eu une expérimentation en 1994 et 1995 de l'adaptation de diverses plantes, variétés et rotations culturales.

Sur une troisième station, à Tlalpan (Tlaxcala), il y a eu une expérimentation sur trois terrasses de dimension paysanne, destinées à l'étude de l'érosion, de l'impact du labour traditionnel avec billonnage et du labour minimum sur la productivité d'une association maïs-fève.

Pour ce deuxième programme, l'étude a été étendue à la cangahua d'Équateur, à partir de 1944. Il y a deux années d'observation en 1994-95 et 1995-96. Faute d'étude antérieure, nous avons entrepris une expérimentation simplifiée de rotation culturale sur deux stations : l'une La Tola (Tumbaco) près de Quito en climat subhumide ; l'autre Cangahua (Cayambe) en climat subaride, avec irrigation d'appoint ; selon le même protocole, en comparant l'impact de la fertilisation minérale ou organique ; Ensuite, en 1995-96, nous avons mis à profit un projet de réhabilitation en terrasses de la Cangahua par une communauté paysanne près de Licto (Riobamba) pour une expérimentation plus complexe du travail de la cangahua et de sa fertilisation organique et minérale.

Les résultats seront présentés successivement au Mexique et en Équateur et par station . Ils ont été obtenus par différentes équipes, à savoir : au Mexique, Navarro et son équipe du C.P. (Navarro, rapport final 1997) ont réalisé les différentes expérimentations sur la station de Hueyotlipan, ainsi que le deuxième essai sur la station du San Miguel Tlaixpan ; Prat et son équipe ORSTOM-C.P. (Prat, rapport final 1997) ont produit l'expérimentation sur les terrasses de mesures de l'érosion et le troisième essai sur divers systèmes de culture ; Fechter et ses étudiants de l'UA Tlaxcala (Fechter et Werner, rapport final 1997) ont fait l'expérimentation sur la station de mesure de l'érosion de Tlalpan ; En équateur, Trujillo et ses collègues et élèves de l'UCE à Quito (Trujillo et Zebrowski, rapport final 1997) ont réalisé l'expérimentation sur les stations de la Tola et Cangahua. Trujillo et Zebrowski ont collaboré au projet de Licto, dirigé par l'ingénieur Teran de la CESA à Riobamba (Équateur, rapport final du programme). Les résultats obtenus au Chili sur les parcelles de mesure de l'érosion (voir Chap. V) en 1995-96 ne nous ont pas été communiqués.

## 2. CAS DES TEPETATES MEXICAINS DE TYPE FRAGIPAN.

### 2.1. STATION DE HUEYOTLIPAN.

#### 2.1.1. Impact du nombre d'années de culture.

En première année (1991), 3 types de cultures ont été testés : blé (T), maïs associé à fève (A), vesce (V) comme engrais vert. En outre, on a comparé un bloc avec fumure organique (fumier -40 t/ha- + fertilisation minérale) à un bloc sans fumure organique mais fertilisation minérale seule (120-60-00). Les premiers résultats ont montré que le blé, la vesce et la fève produisent presque normalement dès la première année, tandis que le maïs produit très peu. L'effet améliorant de la fumure organique est sensible, surtout sur le maïs et la fève, moins sur le blé, voire dépressif en cas de forte fertilisation azotée sur le blé. Ces essais ont été poursuivis en 1992, 93, 94 et 95 afin de voir l'impact du nombre d'années sur la fertilité du tepetate cultivé. En effet, des observations en 1991 sur des parcelles de tepetate cultivé de différentes années sur des terrasses paysannes, avaient montré une amélioration rapide de la production du maïs de 2-4 q/ha en première année, à 22-25 q/ha en 3<sup>e</sup> année, 25-31 q/ha en 5<sup>e</sup> année (rapport scientifique final, 1992). Dans le même temps, la production du blé augmentait plus faiblement de 14-15 q à 23 q/ha.

Le tableau suivant (Tab. 1) rassemble les productions obtenues sur les mêmes terrasses de 1991 à 1995. Nous ne présentons que les résultats sous l'effet d'une fertilisation minérale seule (FM), renouvelée chaque année, ou complétée par une fumure organique (FM + MO). Mais la fumure organique n'a été apportée qu'en 1991 et renouvelable en 1995. Maïs et fève étant associés à partir de 1992, les rendements (en t/ha) devraient être ajoutés pour représenter la production totale par hectare ; il n'a pas été possible de faire une évaluation séparée. En outre, il y a concurrence du maïs vis à vis de la fève : quand le maïs produit moins (témoin sans FM), la fève produit plus. Par exemple en 1995 : sur le témoin (sans FM ni MO) le maïs a produit 0,16 t/ha et la fève 1,09 t/ha ; sur le témoin (sans FM), maïs + MO, le maïs a produit 1,09 t/ha et la fève 1,52 t/ha ; avec inoculation, sans FM, maïs + MO, le maïs a produit 1,1 t/ha et la fève 1,90 t/ha ; sur le traitement FM seul, le maïs a produit 2,38 t/ha et la fève 0,76 t/ha seulement ; sur le traitement FM + MO, le maïs a produit 2,85 t/ha et la fève 0,85 t/ha seulement. Il n'est donc pas possible de comparer pour une plante le produit de la monoculture et de la culture associée.

Tableau 1. Évolution du rendement de blé, maïs et fève (en t/ha) de 1991 à 95, à Hueyotlipan.

Année	Blé		Maïs (1)		Fève (1)	
	FM	FM + MO	FM	FM + MO	FM	FM + MO
1991	3.0 - 3.5	3.5 - 6.0	0.10	0.10	0.4	0.80
1992	-	-	2.52	3.53	0.63	1.90
1993 (2)	3.09	3.30	0.76	0.91	-	-
1994	3.25	3.55	-	3.11	-	0.78
1995	-	-	2.38	2.85	0.76	0.85

(1) culture associée. Maïs + Fève (2) 1993. année climatique défavorable pour le maïs  
MO : apport de fumier en 1991, puis en 1995 seulement

Ces résultats montrent que pour le blé, la production a été optimale dès la première année de culture ; en outre, elle n'a pas subi l'effet d'un climat plus sec en 1993. Le maïs a commencé à produire normalement dès la deuxième année de culture, mais le rendement est fortement dépendant des aléas climatiques, notamment en année sèche (1993) ; en 1995, malgré le renouvellement de la fumure organique, le rendement a été un peu inférieur à celui de 1992. La production du maïs n'augmente pas systématiquement en fonction du nombre d'années de culture ; celle du blé se maintient à peu près constante. Le rendement de la fève associée au maïs est dépendant du développement du maïs ; il peut être optimum dès la deuxième année de culture. En quatrième année (1994) de culture sur tepetate, même sans renouveler la fumure organique, les rendements ont été supérieurs à ceux de la moyenne régionale sur sol agricole, aussi bien pour le blé que pour le maïs.

### 2.1.2. Rotation culturale et impact du précédent cultural sur la production de blé.

En 1994, 4<sup>e</sup> année, la culture de blé a été généralisée sur un ensemble de parcelles ayant supporté 9 rotations culturales différentes depuis 1991, à savoir : AI-A-A-T / N-T-A-T / V-T-A-T / V-A-T-T- / T-A-T-T / T-T-T-T / V-T-T-T. (AI : maïs + haricot ; A : maïs + fève ; T : blé ; V : vesce. En outre, ces 9 rotations ont été suivies sur 2 blocs, l'un avec fumure organique apportée en 1991 seulement, l'autre sans, tous avec une fumure minérale renouvelée chaque année.

L'influence du précédent cultural sur le blé a été évaluée par analyse des critères de développement végétal et des composantes du rendement. En 1994, bonne année climatique, la production moyenne de grain pour toutes les parcelles a été de 3,2 t/ha, donc optimum si on compare à la moyenne de 3,1 t/ha en parcelles expérimentales sur sol agricole pour la même variété de blé dans cette région. Le tableau suivant (Tab. 2) présente les principaux résultats de composantes du rendement suivant les 9 antécédents culturaux, et selon l'apport initial ou non de fumure organique. De l'ensemble des observations, il ressort les conclusions suivantes :

Le précédent fumier (40 t/ha) en tête d'assolement donne un faible accroissement (+ 8 à 10%) du nombre de talles et d'épis, mais très faible et pas significatif (+ 2 à 3%) du rendement en grain et en paille, donc sur le blé en 4<sup>e</sup> année de culture, il n'y a pas ou peu d'effet résiduel de la fumure organique.

Tableau 2. Composantes de rendement du blé suivant rotation et fumure organique, en 1994.

Antécédents Rotation	Matière organique	Poids de 100 grains (g)	Grains nombre/m <sup>2</sup>	Rendement t/ha	Matière sèche totale t/ha	Indice de récolte
AI-A-A-T	+	4.44	11221 AB	3.98 A	12.25 AB	0.3740 A
	-	4.30	11827 A	4.06 A	12.44 A	0.3760 A
AI-T-A-T	+	4.56	11437 AB	3.74 A	12.23 AB	0.3869 A
	-	4.68	9676 ABC	3.57 A	12.25 AB	0.3358 A
A-A-A-T	+	4.44	10773 AB	3.82 A	12.35 AB	0.3542 A
	-	4.63	8625 ABC	3.21 A	9.54 AB	0.3879 A
V-T-A-T	+	4.53	10408 AB	3.78 A	11.72 AB	0.3700 A
	-	4.65	9482 ABC	3.53 A	9.78 AB	0.4171 A
T-T-A-T	+	4.69	9260 ABC	3.50 A	10.30 AB	0.3980 A
	-	4.34	7462 BCD	3.18 A	11.54 AB	0.3169 A
V-A-T-T	+	4.88	7798 ABCD	2.96 A	10.21 AB	0.3272 A
	-	4.66	8199 ABC	3.05 A	9.19 AB	0.3792 A
T-A-T-T	+	4.20	9084 ABC	3.08 A	9.82 AB	0.3557 A
	-	4.46	8154 ABC	2.92 A	9.02 AB	0.3715 A
T-T-T-T	+	4.67	9428 ABC	3.56 A	10.66 AB	0.4039 A
	-	4.22	8154 ABC	2.82 A	8.82 BC	0.3665 A
V-T-T-T	+	4.85	3683 D	1.39 B*	5.26 C*	0.3306 A
	-	4.65	5565 CD	2.91	8.86 BC	0.3753 A

\* aléa sanitaire sur blé

Le précédent immédiat (en 1993) de culture associée de maïs + légumineuse (fève ou haricot, A ou AI), sur le blé a eu un effet très significatif sur tallage, nombre d'épis et de grains au m<sup>2</sup> ; le rendement en poids de grain (3,6 t/ha) et de matière sèche (11,4 t/ha) a significativement augmenté (+ 28 et 27% en moyenne) par rapport au précédent immédiat blé (T). Le précédent 3 cultures associées (AI - A - A) fournit le rendement maximum en grain (4 t/ha), tandis que le précédent immédiat blé (T) ne produit en moyenne que 2,8 t/ha et le minimum de 2,2 t/ha est obtenu après culture continue de blé sans MO. Donc il y a eu un effet améliorant de la culture associée de légumineuse, sans doute à cause de son activité fixatrice d'azote, sur le développement et la production du blé.

L'antécédent fumure organique par rapport à la fumure minérale seule dans le cas du précédent culture associée n'a que très peu amélioré les rendements en grain de 3,8 / 3,5 t/ha et en matière sèche de 11,8 / 11,1 t/ha ; cet impact de la fumure organique est plus sensible dans le cas du précédent blé, à savoir en grain de 3,2 / 2,9 t/ha et en matière sèche de 10,2 / 9,0 t/ha.

La vesce en tête d'assolement n'a pas eu d'effet résiduel sur le rendement en blé en 4<sup>e</sup> année de culture.

### **2.1.3. Facteurs stationnel amont-aval de la terrasse sur la production.**

Il y a un gradient d'un sol moins profond, plus grossier et plus aride en amont à un sol plus profond, plus fin et plus humide en aval. Il se marque par un gradient de productivité. Ainsi pour le blé, le rendement a été de 3,2 t/ha à l'amont et de 4,3 t/ha à l'aval.

En 1994, l'observation détaillée des effets de ce gradient a été faite sur une culture associée maïs-fève. Sur le maïs à l'aval, la meilleure humidité du sol a un effet positif sur tous les critères de croissance végétale et de remplissage du grain : nombre de plants et d'épis au m<sup>2</sup>, nombre et vitesse d'émission des feuilles, hauteur du plant, rendement en matière sèche, poids du grain et rendement en grain, indice de récolte. En conséquence de l'amont vers l'aval, la production a augmenté de 2,85 à 3,36 t/ha. Mais sur la fève associée au maïs c'est l'effet inverse ; le rendement chute de 50%. il ne s'agit sans doute pas d'un effet de compétition du maïs pour l'eau et les nutriments, au dépens de la fève. Le fort développement du maïs cause à la fève un déficit d'insolation et une plus grande sensibilité aux maladies cryptogamiques. Donc globalement en culture maïs-fève, l'avantage de la position aval sur la production est limité. Cette observation explique aussi pourquoi quand le maïs se développe mieux, la fève produit moins.

### **2.1.4. Impact de la fertilisation biologique, minérale ou organique du maïs associé à la fève sur tepetate en 5<sup>e</sup> année de culture (1995).**

Après la culture de blé en 1994 (voir rotation culturale), une nouvelle expérimentation a été faite pour comparer 5 traitements : "T" témoin ; "I" inoculation de bactéries fixatrices d'azote ; "FS" fertilisation minérale starter (15-60-00) au ; I+FS ; "FM" fertilisation minérale complète (120-60-00, N en 3 fractions) ; sur 2 blocs, l'un "Mo" avec fumure organique (40 t/ha) renouvelée, l'autre sans. La variété de maïs cultivée, canuelan est l'une des plus productives localement. Une expérimentation similaire a été faite sur sol agricole. Une expérimentation simplifiée sur tepetate de deux traitements I+FS et FM, avec ou sans M.O., a été appliquée à quatre variétés de maïs associés à la fève. Il y a eu une observation des principaux paramètres de croissance et de rendement.

#### ***2.1.4.1. impact sur le rendement du maïs, var. Cañuela.***

Le rôle de la fertilisation minérale et organique est essentiel, celui de la fertilisation biologique (inoculation) est mineur pour la production du maïs. En 5<sup>e</sup> année de culture du tepetate, il n'y a pas d'effet résiduel des fertilisations antérieures, car la production du témoin est très faible, 0,1 t/ha, même après inoculation de symbiotes. La fertilisation starter seule est inefficace, par défaut de l'apport d'azote (20 unités/ha au lieu de 120 nécessaires).

Tableau 3. Rendement du maïs (Associé à fève).

Traitement	MO	Grains	Poids de	Rendement	Matière	Indice de
		n/m <sup>2</sup>	un grain	grain	sèche	
			mg	t/ha	t/ha	
I	+	389.9	300	1.10	4.78	0.21
	-	50.2	164	0.11	1.73	0.06
FS	+	640.2	325	2.18	5.44	0.39
	-	60.9	186	0.17	2.25	0.06
I+FS	+	775.1	324	2.56	5.96	0.42
	-	113.2	202	0.30	2.60	0.08
FM	+	812.4	353	2.85	7.23	0.38
	-	732.7	326	2.38	6.83	0.05
T	+	385.8	287	1.09	4.37	0.23
	-	50.4	193	0.16	2.29	0.09

La fumure organique (40 t fumier/ha) permet de produire seulement 1,1 t/ha de grain et 4,4 à 4,8 t/ha de matière sèche. L'apport combiné de fertilisation starter augmente très fortement cette production à 2,2 t/ha de grain et 5,4 t/ha de matière sèche. L'inoculation en outre améliore encore un peu cet effet à 2,6 t/ha de grain et 6 t/ha de matière sèche.

La fertilisation starter par son apport de P (60 unités/ha) améliore l'équilibre N/P de la fumure organique, stimule la minéralisation du fumier et le développement du maïs. Le traitement combiné I + FS + MO est aussi efficace que la fertilisation minérale (FM) seule ; celle-ci a produit 2,4 t/ha de grain et 6,8 t/ha de matière sèche.

Cependant la production maximum, à savoir 2,8 t/ha de grain et 7,2 t/ha de matière sèche est obtenue par la combinaison fumure minérale et organique. Il y a synergie des deux pour obtenir l'optimum.

D'un point de vue économique deux traitements sont également efficaces : fumure organique + fertilisation starter + inoculation ou fertilisation minérale seule.

#### 2.1.4.2. Impact sur le rendement de la fève.

La fève a un comportement très différent, voire opposé, à celui du maïs (Tab. 4). Elle produit mieux quand le maïs se développe mal. Ainsi, sa production presque normale est de 1,1 t/ha, sans fertilisation minérale ni organique. La fertilisation starter seule ou l'inoculation de bactéries symbiotiques sont inefficaces, sans doute le sol contenant déjà des souches naturelles de Rhizobium.

Seule la fumure organique, seule ou combinée à l'inoculation ou à la fertilisation starter, améliore sensiblement la production à 1,5 voire 1,9 t/ha. Cependant, quand elle est associée à la fumure minérale complète (FM+MO), l'effet est négatif et le rendement baisse à 0,8 t/ha.

Tableau 4. Rendement de la fève, associée au maïs.

Traitement	MO	Gousse		Grain	Poids de	Rendement
		n/m <sup>2</sup>	n/plant			
				n/m <sup>2</sup>	g	t/ha
I	+	56.2	15.5	111.8	1.72	1.90
	-	22.4	8.3	43.8	1.27	0.32
FS	+	35.6	12.1	75.5	1.99	1.45
	-	32.9	12.8	69.2	1.57	0.76
I+FS	+	32.0	11.0	60.1	1.74	1.02
	-	20.2	7.2	49.3	1.12	0.64
FM	+	26.7	9.4	49.3	1.74	0.85
	-	26.6	9.8	58.4	1.29	0.76
T	+	42.9	12.8	89.0	1.68	1.52
	-	32.8	12.1	77.3	1.43	1.09

On observe à nouveau que le rendement de la fève diminue sensiblement quand celui du maïs est à son maximum, c'est à dire les traitements FM + MO, FM, I + FS + MO. Il y a sans doute une incompatibilité physiologique et phytosanitaire entre un développement dense du maïs et celui de la fève.

#### 2.1.4.3. Impact global sur le rendement maïs + fève.

Il y a globalement une certaine compensation des productions du maïs par la fève (Tab. 5), de sorte que la production cumulée du témoin et des traitements de fertilisation starter est de 0,9 à 1,2 t/ha.

Les meilleurs rendements cumulés sont au moins de 3 t/ha. Ils sont obtenus soit avec la fertilisation minérale seule (3,1 t/ha), soit en associant la fumure organique aux quatre autres traitements ; l'optimum 3,6 à 3,7 t/ha étant obtenu soit avec la fertilisation starter, soit avec la fertilisation minérale complète. Dans ce cas il est évident que la fumure organique associée à la fertilisation starter est plus économique. Mais la fumure organique seule ne produit que 2,6 t/ha ; ce traitement ne peut être économique ; il sera fortement valorisé par le complément d'une fertilisation starter.

Tableau 5. Rendement cumulé en grain de maïs + fève.

Traitement	MO	Maïs t/ha	Fève t/ha	Maïs + Fève t/ha
I	+	1.10	1.90	3.01
	-	0.10	0.32	0.43
FS	+	2.18	1.45	3.63
	-	0.17	0.76	0.93
I + FS	+	2.56	1.02	3.58
	-	0.30	0.64	0.94
FM	+	2.85	0.85	3.70
	-	2.38	0.75	3.13
T	+	1.09	1.52	2.61
	-	0.16	1.09	1.25

#### 2.1.4.4. Impact sur le rendement de quatre variétés de maïs, précoces ou tardives, associées à la fève.

D'une manière générale pour les quatre variétés de maïs la production est très faible sans une fertilisation minérale ou organique suffisante, y compris la fertilisation starter seule (tab. 6). Le traitement fumure organique + fertilisation starter donne dans trois cas sur quatre un rendement égal ou légèrement supérieur à la fertilisation minérale seule (sauf cas de la variété noire, où le rendement est inférieur). La fertilisation combinée minérale et organique donne toujours la production maximum, de 2,2 à 2,8 t/ha selon les variétés. Des quatre variétés, noir précoce est la moins productive, Cañuela tardive est la plus productive ; mais les variétés précoces ne sont pas systématiquement moins productives que les tardives ; il n'y a pas de différence entre blanc précoce et blanc tardif.

La production de la fève ne semble pas corrélée avec une variété particulière de maïs. Elle est surtout réduite par une déficience ou un excès de fertilisation. Dans la plupart des cas, la fumure organique augmente sensiblement la production de la fève, sauf la combinaison avec une fumure minérale complète dans le cas de la variété cañuela notamment, où l'effet est négatif. C'est généralement le traitement fumure organique + fertilisation starter qui produit le meilleur rendement (1 à 2 t/ha) en association avec le maïs.

La production cumulée maïs + fève est toujours maximum pour la fertilisation combinée, minérale et organique, et supérieure à tous les autres traitements ; elle varie de 3,3 à 4,1 t/ha (moyenne 3,7) ; les variétés tardives produisent un peu plus que les précoces. La fumure organique avec fertilisation starter produit généralement plus que la fertilisation minérale seule ; respectivement en moyenne des quatre variétés 3,4 et 2,9 t/ha pour ces deux

traitements. L'effet de la fumure organique + fertilisation starter est surtout sensible pour les variétés précoces où les rendements égalent alors ceux du traitement combiné FM + MO ; cet effort est un peu moindre pour les variétés tardives. Donc la fumure organique + fertilisation starter est certainement plus rentable que la combinaison FM + MO, voire aussi la fertilisation minérale seule. Ce traitement a pour avantage d'améliorer les propriétés physiques et l'activité biologique du tepetate cultivé.

Tableau 6. Rendement cumulé en grain (t/ha) de maïs + fève pour 4 variétés de maïs.

Variétés de maïs	Traitement	MO	Rendement t/ha		
			Maïs	Fève	Maïs + Fève
Blanc tardif	I + FS	-	0.14	0.71	0.85
		+	1.92	1.14	3.06
	FM	-	1.71	0.91	2.65
		+	2.57	1.54	4.11
Blanc précoce	I + FS	-	0.27	1.04	1.31
		+	2.29	1.42	3.72
	FM	-	1.82	0.62	2.44
		+	2.61	0.98	3.58
Noir précoce	I + FS	-	0.21	0.39	0.61
		+	1.28	2.01	3.29
	FM	-	1.92	1.51	3.43
		+	2.23	1.11	3.34
Cañuela tardif	I + FS	-	0.30	0.64	0.94
		+	2.56	0.02	3.58
	FM	-	2.38	0.76	3.13
		+	2.85	0.85	3.70

#### ***2.1.4.5. Impact sur le développement végétatif et les composantes du rendement du maïs et de la fève.***

De nombreuses observations ont été faites pour tous les traitements sur les paramètres du développement du maïs, de la germination à la floraison, et sur les composantes d'élaboration du rendement en grain.

L'effet de la fumure organique est positif dès la germination sur le développement du maïs. Cependant la fertilisation starter, ajoutée à celle-ci est complétée par une inoculation microbienne, en améliorant l'équilibre nutritif N/P et l'activité microbienne, permet d'obtenir un meilleur développement puis un meilleur rendement en matière sèche que la seule fumure organique. En outre, elle produit un accroissement de l'efficacité reproductive du nombre de grains au m<sup>2</sup> et du poids moyen de 1 grain, par rapport à une simple fertilisation minérale ou organique, d'où un meilleur rendement. Cependant, son effet est légèrement inférieur à celui de la combinaison fumure organique et fertilisation minérale complète.

Sur la fève, l'effet de la fumure organique améliore très significativement par rapport à la seule fertilisation minérale le nombre de gousses par plant, de grains au m<sup>2</sup> et du poids moyen de 1 grain. La fumure organique + fertilisation starter a dans 3 cas sur 4 un meilleur impact sur les composantes du rendement que la fumure organique combinée à une fertilisation minérale complète. C'est la diminution du nombre de gousses et de grains au m<sup>2</sup>, probablement due à une maladie cryptogamique, et non le poids moyen de 1 grain, qui est la cause de cette diminution de rendement de la fève, alors que le maïs a une production maximum.

L'observation la plus intéressante concernant le maïs est celle des dates de floraison masculine, puis féminine, et l'écart entre les deux. D'elles dépendent la précocité et surtout l'efficacité reproductive.

Sur le sol agricole, le nombre de jour à la floraison pour la variété tardive Cañuela est en moyenne de 89 jours pour la floraison mâle et 94 jours pour la floraison femelle. L'écart moyen de 5 jours permet toujours une bonne fécondation. La variabilité est faible. L'effet des traitements fumure minérale ou organique n'est pas significatif ; celui cumulé FM + MO est

très faible. Ce résultat est indépendant de la variété. Les variétés précoces se distinguent par le nombre de jours à la floraison : mâle 81 jours ; femelles 83 jours, écart 2 jours ; des variétés tardives : mâle 89 jours, femelle 84 jours, écart 5 jours. Mais il n'y a pas d'effet significatif des traitements de fertilisation. Le sol agricole de référence est donc normalement fertile.

Sur tepetate en 5<sup>e</sup> année de culture avec la variété Cañuela, les résultats sont très différents. Sans fertilisation organique ou minérale la floraison mâle et surtout femelle est très retardée et l'écart entre les deux est de 29 à 31 jours. C'est probablement la cause majeure d'une mauvaise fécondation et reproduction. Cela se traduit aussi par une médiocre production végétale à la floraison. La fertilisation organique seule réduit sensiblement l'écart à la floraison, à 8 ou 9 jours. La fertilisation minérale complète (azote fractionné en 3 apports) a encore meilleur effet et donne le même résultat qu'un sol agricole, en réduisant l'écart à la floraison à 6 jours. La fertilisation starter (peu de N) seule produit peu d'effet, mais ajoutée au fumier, elle réduit à 6 jours l'écart à la floraison. Cependant la fertilisation combinée FM + MO produit l'effet maximum en réduisant l'écart à seulement 1 jour.

La précocité de la floraison femelle, l'écart entre floraison mâle et femelle et l'efficacité reproductive sont donc dépendants d'une bonne nutrition minérale et notamment en azote (puisque l'apport de P de la fertilisation starter ne suffit pas), outre une bonne alimentation en eau. Ceci est vrai pour toutes les variétés ; c'est de ce facteur primordial que dépend le rendement du maïs. Le tableau ci dessous (Tab. 7) présente les résultats obtenus pour les 4 variétés de maïs. Dans tous les cas, la fumure organique ou une fertilisation minérale complète permettent une bonne efficacité reproductive. Cependant, la fumure organique complétée par une fertilisation starter est dans 3 cas sur 4 légèrement plus efficace que la fertilisation minérale seule (ou la fumure organique seule) : la fertilisation starter surtout par son complément en phosphore permet d'activer la vie microbienne.

Dans 3 cas sur 4 également (sauf variété noire) l'optimum d'efficacité reproductive, et en conséquence du rendement en grain, est obtenu par la combinaison des fertilisations minérales et organiques. Mais l'alternative économiquement la plus rentable est soit la fumure organique + fertilisation starter ou fumure minérale seule. A moyen terme, la première devrait être plus rentable car elle développe d'une manière plus durable le potentiel de fertilité du sol formé à partir du tepetate.

Tableau 7. Nombre de jours à la floraison mâle et femelle et efficacité reproductive des 4 variétés de maïs en fonction de la fertilisation minérale et organique.

Maïs variété	Traitement	MO	Jours à la floraison			Taux (1) de croissance g/jour/m <sup>2</sup>	Efficacité reproductive
			mâle	femelle	écart		
Blanc tardif	I + FS	-	92.7	124.3	31.6	2.55	11.11
		+	91.3	99.3	8.0	4.29	68.70
	FM	-	88.7	99.3	10.6	5.06	63.10
		+	90.0	92.0	2.0	6.06	74.35
Blanc précoce	I + FS	-	82.7	119.7	37.0	1.87	19.92
		+	83.0	87.7	4.7	3.67	76.07
	FM	-	82.0	89.0	7.0	3.98	71.70
		+	81.3	80.7	0.0	3.61	86.95
Noir précoce	I + FS	-	82.7	116.3	33.6	2.08	13.49
		+	86.0	97.3	11.3	2.78	59.68
	FM	-	80.7	84.7	4.0	3.10	83.97
		+	83.3	85.7	2.4	4.44	73.73
Cañuela tardif	I + FS	-	91.3	117.7	21.4	3.27	15.56
		+	90.7	96.3	5.6	4.80	76.88
	FM	-	89.0	95.0	6.0	5.70	74.72
		+	90.7	91.7	1.0	7.31	84.98

(1) Taux de croissance de la levée à la floraison.

## 2.2. STATION DE TLALPAN.

Il s'agit des essais de culture de maïs sur les trois terrasses de mesure de l'érosion pour tester l'effet du labour traditionnel avec billon, et du labour minimum avec ou sans couverture végétale intercalaire Tab. 8). Nous n'avons que les résultats obtenus en 1995 (Quantin, rapport scientifique, 1995). La variété était Cañuela et la fertilisation minérale seule (120-60-00).

Tableau 8. Caractéristiques des essais à la station de Tlalpan (Tlaxcala).

Traitement	Nombre épis/m <sup>2</sup>	Poids en grain t/ha
Labour traditionnel	4.0	2.2
Labour minimum sans couvert intercalaire	2.7	1.2
Labour minimum avec couvert intercalaire	4.1	1.6

En labour traditionnel, le rendement obtenu 2,2 t/ha est comparable à celui obtenu sur la station voisine de Hueyotlipan en 1995, avec une fertilisation minérale seule (2,4 t/ha).

Le labour minimum avec couvert végétal intercalaire a permis une efficacité reproductive égale à celle due au labour traditionnel ; mais le rendement en grain est moindre (1,6 t/ha) à cause de la concurrence de la végétation intercalaire au moment de l'élaboration du grain (stress hydrique surtout).

le labour minimum sans couvert végétal a provoqué la verse de près de 1 plant sur 2 (les variétés mexicaines sont très sensibles à la verse) ; d'où une diminution du nombre d'épis au m<sup>2</sup> et du rendement. Dans ce cas il n'y a pas eu diminution du poids moyen de 1 grain, mais du nombre de grains. Il faudrait modifier la technique du semis (2 grains par paquet) ou maintenir le buttage, ou faire un labour et un semis plus profonds.

## 2.3. STATION DE SAN MIGUEL THAIXPAN.

### 2.3.1. Impact de la fertilisation biologique, minérale et organique en première et deuxième année de culture du tepetate.

La rotation culturale était une céréale, blé et avoine, en première année (1995) ; puis de maïs et fève associés en deuxième année (1996). Le protocole est le même qu'à Hueyotlipan en 1995, à savoir sur 2 blocs, l'un avec fumure organique (MO) de fumier (40 t/ha) et l'autre sans MO ; 5 traitements : I - inoculation de symbiotes, FS - fertilisation starter (15-60-00), I + FS, FM - fertilisation minérale complète (90-60-00 pour le blé ; 120-60-00 pour le maïs), T - témoin.

#### 2.3.1.1. Culture de blé en 1995 (1<sup>re</sup> année).

Le tableau 9 donne quelques paramètres de croissance et de rendement du blé.

Sans fertilisation (I et I sans MO), le blé s'est peu développé et produit très peu. La fertilisation biologique (I) sans fumure organique est inefficace.

La fertilisation starter seule a permis un développement modéré et une certaine production de grain (1,7 t/ha). L'apport de phosphore, malgré l'insuffisance d'azote, est efficace. La combinaison avec l'inoculation bactérienne n'améliore pas le rendement ; l'accroissement de l'activité microbienne est sans effet.

La fumure organique seule (T + MO) n'est que modérément efficace ; elle produit moins (1,6 t/ha) que la fertilisation minérale complète (2,6 t/ha) et pas mieux que la fertilisation starter seule. Ceci pourrait s'expliquer par une déficience relative du fumier en P ou un déséquilibre N/P.

Dans tous les cas, la fumure organique combinée avec la fertilisation minérale a augmenté le développement et surtout le rendement en grain, de 1,7 à 2,8 t/ha pour la formule starter, de 2,6 à 3,3 t/ha pour la fertilisation minérale complète ; on obtient ainsi dès la première année l'optimum de production. La fumure organique + fertilisation starter est une option économique valable en regard de la simple fertilisation minérale.

Tableau 9. Productivité du blé en première année de culture.

Traitement	M.O.	Plants	Talles	Épis	Mat sèche	Grains
		n/m <sup>2</sup>		t/ha		
I	+	344.5	467.3	296.8	4.06	1.84
	-	307.2	430.0	213.3*	1.55	0.30
FS	+	427.0	612.5	476.8	6.32	2.79
	-	371.7	531.0	313.0	5.91	1.75
I + FS	+	353.0	451.5	376.5	6.62	2.16
	-	290.5	774.8	281.0	4.16	1.07
PM	+	536.5	774.8	629.5	9.49	3.26
	-		771.0	548.0	8.21	2.57
T	+	324.7	453.5	281.5	4.27	1.58
	-	311.5	418.8	183.5*	1.26	0.23

\* Dans les traitements I et T, sans MO, les épis contiennent moins de 10 grains par épi.

### 2.3.1.2. Culture d'avoine en 1995 (1<sup>re</sup> année).

Le tableau suivant (Tab.10) donne quelques paramètres de croissance et de rendement de l'avoine.

L'avoine est moins exigeante que le blé ; même sans fertilisation (I et T sans MO) elle peut se développer et produire modérément (1,3 t/ha). La fumure organique ou la fertilisation minérale (FM ou FS) n'améliorent que modérément (+ 50 à 24%) la production de grain par rapport au témoin. Il n'y a pas d'effet cumulé de la fumure organique à la fertilisation minérale sur le rendement en grain, mais seulement sur le poids de matière sèche. La fertilisation minérale et organique permet de doubler la production de matière sèche par rapport au témoin ; elle semble plus intéressante pour la production fourragère que celle de grain, mais probablement peu économique.

Tableau 10. Croissance et rendement de l'avoine.

Traitement	M.O.	Plants	Talles	Matière sèche	Grains	Indice récolte
		n/m <sup>2</sup>		t/ha		
I	+	326.5	411.5	9.68	2.78	0.26
	-	152.0	394.0	5.46	1.28	0.20
FS	+	192.5	440.5	7.58	1.64	0.21
	-	179.5	495.5	8.05	1.62	0.18
I + FS	+	181.5	540.2	0.92	0.17	0.17*
	-	217.0	480.0	0.94	0.23	0.23
FM	+	218.5	651.0	10.01	1.78	0.16
	-	176.0	575.6	9.49	1.78	0.17
T	+	212.0	474.5	8.42	1.96	0.21
	-	170.0	339.0	5.04	1.30	0.24

\* Résultat aberrant

### 2.3.1.3. Culture de maïs et fève associés en 1996 (2<sup>e</sup> année).

Cet essai fait suite au précédent. La fumure organique n'a pas été renouvelée ; nous ne déterminerons que l'arrière effet en deuxième année. La fertilisation minérale a été renouvelée sur les mêmes parcelles que précédemment, à la dose adéquate pour le maïs (120-60-00 pour FM ou 20-60-00 pour FS). Le labour initial n'a été fait qu'à 20 cm (au lieu de 40 cm à

Hueyotlipan). Les résultats ne peuvent donc être rigoureusement comparés à ceux obtenus en 1995 sur la station de Hueyotlipan. Nous ne présentons dans le tableau suivant (Tab. 11) que les valeurs de rendement des cultures de maïs et de fève.

Tableau 11. Rendement en grain du maïs et de la fève en deuxième année de culture du tepetate (San Miguel Tlaixpan, 1996).

Traitements	M.O.	Efficience reproductrice Maïs	Rendement en grain		
			Maïs	Fève t/ha	Maïs + Fève
T	+	72.9	1.50	1.24	2.75
	-	65.7	1.07	0.48	1.55
FS	+	75.0	1.51	1.38	2.89
	-	69.8	0.98	1.03	2.01
I	+	83.5	1.68	1.14	2.82
	-	57.7	0.89	0.81	1.71
FM	+	87.1	2.02	0.88	2.90
	-	72.8	1.20	0.80	2.00
I + FS	+	78.3	1.91	1.24	3.15
	-	64.4	0.76	0.79	1.55

\* Résultat aberrant

En première lecture l'effet résiduel de la fumure organique est très marqué sur la production du maïs et de la fève. La fertilisation starter seule n'a rien ajouté à la fumure organique seule, mais combinée avec inoculation microbienne (I + FS + MO), elle a produit le meilleur rendement du maïs et la meilleure productivité globale. Ce résultat confirme pour la culture maïs + fève, l'intérêt d'une fumure organique combinée à la fertilisation starter et inoculation.

Le résultat obtenu pour le maïs avec la fertilisation minérale (FM) seule est probablement aberrant puisque peu différent du témoin. Mais conformément aux résultats de Hueyotlipan, le cumul FM + MO produit bien le meilleur rendement du maïs et le plus bas rendement de la fève, soit globalement une production qui n'est pas supérieure au traitement FS + MO. Cela confirme l'intérêt économique de la fumure organique combinée à la fertilisation starter.

Les meilleurs rendements de la fève (associée au maïs) sont obtenus avec la fumure organique, seule ou complétée par une fertilisation starter. Ils sont toujours réduits par la fertilisation minérale complète (riche en azote) seule ou associée à la fumure organique.

Les résultats des meilleurs traitements sont inférieurs, pour le maïs et globalement, à ceux obtenus en 1958 à Hueyotlipan. Ceci peut paraître logique, car il s'agit ici de la deuxième année de culture du tepetate, sur un sol moins profond et moins évolué en sol agricole, et sans renouvellement de l'apport organique.

Cependant, à l'inverse pour le témoin ou les parcelles sans fertilisation minérale complète (FS, I) et sans fumure organique, les rendements en maïs ont été plutôt élevés, de 0,8 à 1 t/ha, en comparaison de ceux obtenus à Hueyotlipan, de 0,1 à 0,3 t/ha. Cela pose le problème de la préparation du sol en 2<sup>e</sup> année de culture, suggérant un éventuel mélange entre les parcelles du bloc sans fumure organique, d'où une limite de la portée de cet essai. Néanmoins, les résultats majeurs concordent avec les observations précédentes.

### 2.3.2. Expérimentation de façons et rotations culturales sur deux terrasses de mesure de l'érosion.

Il s'agit des essais de différents traitements et d'une rotation culturale sur les 7 terrasses destinées à la mesure de l'érosion sur tepetate cultivé de 1993 à 1996 pendant quatre années (Prat et al., rapport final, 1997; Navarro et al., rapport final, 1997). Cette partie a été rédigée avec une contribution de C. Prat.

### 2.3.2.1. Station et protocoles expérimentaux.

Situé sur les terres communales de la communauté de San Miguel Tlaixpan (Texcoco) sur le versant Est de la vallée de Mexico, le terrain expérimental comporte 5 terrasses (T2, T3, T4, T5 et T6) formées à partir d'un tepetate t3 défoncé et travaillé (labour + pulvérisage) en 1993. A partir de 1995, la T6 a été divisée en deux (T6a et T6b) afin de mettre à la même taille l'ensemble du dispositif de mesure de l'érosion. Les travaux de défonçage ont été effectués au printemps 93 avec un caterpillar D7 comportant deux dents. Deux passages croisés ont été effectués suivies de la formation des terrasses et de leurs talus de séparation. Enfin, deux passages de disques ont affinés la préparation (4 pour la T5). Un sol agricole naturel de type phaeozem à tendance vertique (T7) a également été aménagé afin de servir de référence agronomique. Celui-ci avait été travaillé en 1993 par un simple labour profond à 30 cm ; puis pour améliorer les propriétés physiques du sol vertique sous-jacent, il a été défoncé à 50 cm et de nouveau labouré en 1994. Toutes les parcelles de tepetate ont été défoncées en moyenne à 40 cm, sauf la T2 qui l'a été à 60 cm, pour tester l'effet profondeur. Les principaux paramètres testés pour le comportement à l'érosion et la productivité sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 12).

Tableau 12. Paramètres des différentes terrasses.

Traitements	Référence	Surface m <sup>2</sup>	Profondeur m*	Pente %
Référence tepetate (T2 à T6)				
Profondeur à 60 cm	T2	470	0,60	4,7
Monoculture	T3	773	0,46	3,2
Apport de fumier	T4	732	0,43	3,4
Texture fine et pente réduite à 2%	T5	792	0,44	2,5
Terrasse normale	T6	733	0,40	4,4
Idem, sans résidus de récolte de 1995-96	T6b	419	0,40	4,4
Référence sol naturel	T7	713	0,53	5,9

\* profondeur moyenne vérifiée en 1994.

La terrasse T6 sert de référence en culture associée (orge + *Medicago* ou maïs + fève) pour l'ensemble du dispositif. Elle a été subdivisée en 1995, pour tester l'impact des résidus de récolte qui sont laissés en surface sur toutes les parcelles ; la T6b a été privée de ses résidus ; ceci a permis aussi de ramener sa surface en T6a à une dimension voisine des autres pour la mesure de l'érosion.

Ainsi, les principaux paramètres testés au départ sont : tepetate / sol naturel sur tepetate : profondeur 60 / 40 cm ; fumier (20 t/ha chaque année) / fumure minérale complète (variable suivant cultures, voir plus loin) ; monoculture / culture associée (voir plus loin) ; texture plus fine et pente réduite / texture moyenne et pente de 4 à 5%.

A partir de 1995 s'est ajouté : sans résidu de récolte / avec résidu ; puis en 1996, la rotation culturale a été modifiée, faisant apparaître labour à plat pour l'orge en T2, T3, T4 et T7 / labour billonné pour le maïs en T5 et T6, subdivisé en billon cloisonné en T5 / billon traditionnel en T6.

La rotation culturale de 1993 à 1996 a été la suivante (Tab. 13) :

Tableau 13. Rotation culturale 1993-1996

Terrasses	1993	1994	1995	1996
T2	Orge + Vesce	Maïs + Fève + Haricot	Maïs + Fève	Orge + <i>Médicago</i> p.
T3	Orge	Maïs	Maïs	Orge
T4	Orge + Vesce	Maïs + Fève + Haricot	Maïs + Fève	Orge + <i>Médicago</i> p.
T5	Orge + Vesce	Maïs + Fève + Haricot	Maïs + Fève	Maïs + Fève (1)
T6	Orge + Vesce	Maïs + Fève + Haricot	Maïs + Fève	Maïs + Fève (2)
T7	Orge + Vesce	Maïs + Fève + Haricot	Maïs + Fève	Orge + <i>Médicago</i> p.

(1) en billon cloisonné (2) en billon traditionnel

En 1993, 1<sup>re</sup> année de culture, il était prévu de tester la vesce comme source possible d'engrais vert après la récolte d'orge ; mais cette plante ne pousse plus dès la fin de la saison des pluies ; nous n'avons testé que son effet améliorant pour la culture de céréale.

En 1994, 2<sup>e</sup> année de culture, l'association maïs-fève-haricot a été défavorable pour le haricot, qui s'est peu développé sous couvert maïs-fève. Donc en 1995, 3<sup>e</sup> année de culture, seule l'association maïs-fève a été poursuivie. A partir de cette année, l'effet résidu sur le sol a également été testé. En 1996, 4<sup>e</sup> année de culture, nous avons comparé la même année deux systèmes culturaux : orge + *Medicago polymorpha* (luzerne) / maïs-fève et trois façons culturales : labour à plat / billon cloisonné / billon traditionnel. L'intérêt de ces essais est d'établir une comparaison dans les mêmes conditions climatiques, ce qui n'est pas possible d'une année à l'autre.

La fertilisation minérale (N, P) et organique (fumier) a été volontairement modérée pour être compatible avec l'économie paysanne de cette région. L'apport de fumier, uniquement en T4, a été d'environ 20 t/ha (13 t/ha en sec) chaque année. Mais en 1994 cet apport a été tardif, un peu après le semis et fractionné en deux fois. A partir de 1996, il a été combiné à une fertilisation minérale starter (15-60-00) de manière à activer la vie microbienne et compenser la déficience en P. La fumure minérale, sur toutes les autres terrasses, a été successivement : en 1993 (80-60-00) pour l'orge ; en 1994 et 1995 (70-60-00) pour maïs et fève ; en 1996 (70-60-00) pour l'orge ou maïs + fève. Ces doses en azote sont à peine suffisantes pour l'orge, mais notoirement insuffisantes pour le maïs, s'il n'y a pas d'autre source (effet escompté de la fixation de N par les légumineuses, retour des résidus de récolte).

Le suivi agronomique a consisté en l'observation des divers paramètres de croissance (levée, nombre de plants et de talles, hauteur, nombre de feuilles, dates de floraison, poids de matière sèche) et d'élaboration du rendement (nombre et poids des grains, nombre d'épis et de gousses, rendement en grain, efficacité reproductive). Les observations pendant la croissance ont été faites par échantillonnage aléatoire sur des placettes de 1 m<sup>2</sup> pour l'orge ou de 16 m<sup>2</sup> pour le maïs, en tenant compte du gradient amont-aval de fertilité. L'évaluation du rendement en grain a été obtenue sur l'ensemble de chaque terrasse et aussi par échantillonnage.

### 2.3.2.2. Résultats.

Les résultats sont présentés année par année et accompagnés d'un diagramme de distribution des pluies et des travaux culturaux, afin de mettre en évidence les aléas climatiques interannuels.

#### A. Année 1993.

##### A1. Pluie.

En 1993, les précipitations enregistrées (Fig. 1) ont été particulièrement faibles (421 mm) avec deux périodes marquées de sécheresse .

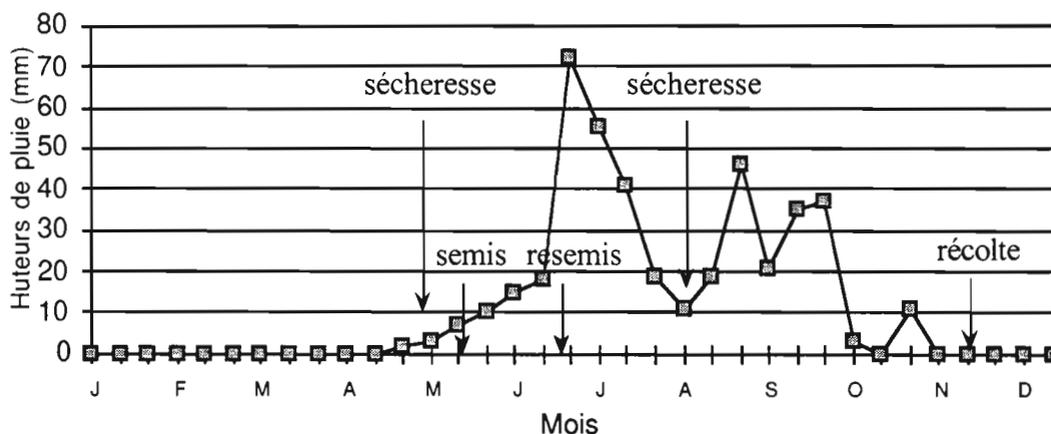


Figure.1. Pluviométrie en 1993 (chaque point correspond à la valeur décadaire).

## A2. Rendements.

Les rendements de l'orge sont présentés dans le tableau ci-dessus (Tab. 14). T6 présente le plus fort rendement en grains (20% de plus que la référence sol T7). Toutes les autres terrasses, sauf T2, ont de meilleurs résultats que la monoculture (T3).

Tableau 14. Rendement de l'orge en 1993.

Terrasse	Plants	Talles	Indice tallage	Jours 50% floraison	Hauteur m	Matière sèche	Rendement en grain	
	----- n/m <sup>2</sup> -----						----- t/ha -----	
T2	191	353	2.0	61	0.39	2.1	1.6	1.6
T3	245	429	1.8	58	0.53	3.5	2.7	2.0
T4	125	334	3.0	60	0.50	2.8	2.6	2.6
T5	132	275	2.3	58	0.57	2.9	2.5	2.2
T6	107	309	3.1	55	0.68	3.7	3.5	3.1
T7	152	305	2.1	57	0.45	2.3	2.2	2.5

En ce qui concerne la vesce, les variations de la production entre terrasses sont sensiblement les mêmes que celles observées dans le cas de l'orge (Tab. 15).

Tableau 15. Rendement de la vesce en 1993.

Terrasse	Plants	Gousses	Matière sèche	Rendement grain	Orge + vesce
	----- n/m <sup>2</sup> -----			----- t/ha -----	
T2	31	83	0.2	0.15	1.75
T3	-	-	-	-	2.00
T4	30	187	0.5	0.39	3.00
T5	36	382	0.8	0.67	2.87
T6	42	399	1.1	0.88	4.00
T7	6	132	0.3	0.23	2.73

Le coefficient de corrélation entre rendements estimés et mesurés est de 0,70 c'est à dire significatif. Toutefois, au sein de chaque terrasse, il existe une certaine variabilité, qui dans le cas de la T4 est extrêmement élevée (T2=20%, T3=29%, T4=41%, T5=20%, T6=17% et T7=20%). Ces résultats obtenus en première année de culture sont comparables, bien que un peu inférieurs, à ceux mesurés à Hueyotlipan (Tlaxcala) en 1<sup>re</sup> année (1991) ; mais ici en année plus sèche (420 mm / 800 mm), avec une fumure organique deux fois moindre (en T4) ou une fertilisation azotée un peu inférieure. Ces rendements en orge sur les terrasses T4, T5, T6 et T7 sont un peu supérieurs à ceux de la moyenne nationale (2 t/ha). Sur la terrasse T6 le rendement en orge (3,1 t/ha) est proche de l'optimum pour cette variété au Mexique. L'effet de la fumure organique en T4 est un peu inférieur (2,6 t/ha) à celui de la fertilisation minérale, sans doute à cause de la dose trop modérée de l'apport de fumier.

La production cumulée orge + vesce est économiquement intéressante dès la première année de culture. On peut espérer un arrière effet bénéfique de la vesce sur la fertilité du tepetate. La production sur les trois meilleures terrasses T4 à T6 de tepetate est un peu supérieure ou égale à celle du sol naturel.

## B. Année 1994.

### B1. Pluies.

Les précipitations en 1994 furent de 692 mm avec des pluies fréquentes et uniquement une petite période de sécheresse peu après le semis (Fig. 2). Les pluies furent parfois très violentes.

La forte pluviosité a favorisé le développement de maladies (pourriture) qui ont sensiblement affecté la fève, mais plus encore le haricot. De plus, suite à un nettoyage tardif des

cultures, une partie importante des plants de haricots a été abîmée, voire détruite rendant ainsi difficile une bonne prise en compte de cette culture.

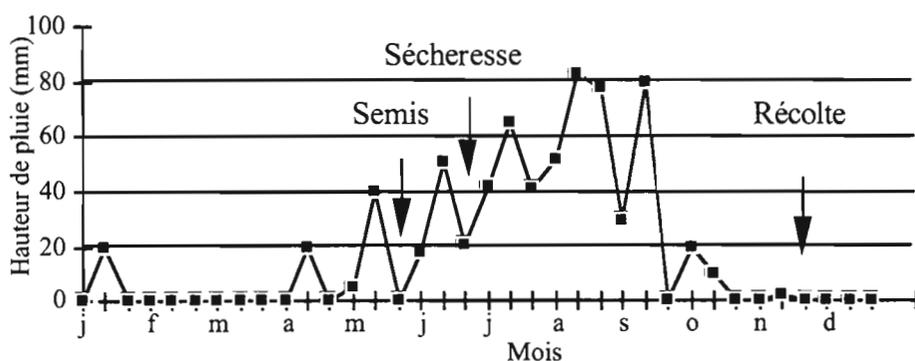


Figure 2. Pluviométrie en 1994 (chaque point correspond à la valeur décadaire).

### B2. Rendements.

Le développement végétatif du maïs et de la fève a été meilleur sur l'ensemble des terrasses de tepetate que sur sol naturel (Tab 16 et 17). Le développement du maïs a été très réduit sur la terrasse T4 en raison sans doute du retard à l'apport de fumier (après le semis).

Tableau.16. Paramètres de croissance de maïs, fève et haricot en 1994.

Terrasses	Plantes			Hauteur			Matière sèche (paille)		
	Maïs n/m <sup>2</sup>	Haricot	Fève	Maïs m	Haricot	Fève	Maïs t/ha	Haricot	Fève
T2	2.3	1.2	3.4	1.8	-	1.32	3.10	0.13	1.93
T3	8.2	-	-	2.2	-	-	7.51	-	-
T4	2.9	1.5	2.9	1.3	-	1.36	1.18	0.08	1.21
T5	2.9	1.8	3.4	1.9	-	1.57	3.34	0.17	1.82
T6	2.9	1.2	4.2	1.9	-	1.49	3.61	0.12	1.98
T7	2.9	1.2	2.7	1.8	-	1.12	2.35	0.05	1.05

La variabilité des estimations au sein des parcelles reste dans les mêmes proportions que l'année précédente, T4 étant toujours la plus hétérogène. Les rendements estimés en maïs-grain sont surestimés par rapport à la réalité en T5 et T6 alors que pour la fève et le haricot, les résultats sont plus proches de la réalité.

Tableau 17. Rendement en grain (t/ha) de maïs, fève et haricot en 1994.

Terrasse	Maïs		Haricot		Fève		Total	
	M	E	M	E	M	E	M	E
T2	0.86	1.06	0.13	0.13	1.21	1.28	2.20	2.47
T3	1.88	1.74	*	*	*	*	1.88	1.74
T4	0.52	0.57	0.08	0.10	1.01	0.87	1.61	1.55
T5	0.81	1.29	0.17	0.19	1.19	1.32	2.17	2.80
T6	0.94	1.46	0.12	0.09	1.09	1.37	2.15	2.90
T7	0.93	1.19	0.05	0.03	0.97	0.66	1.95	1.88
Proportion*	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3

M=Mesuré, E=Estimé

\*Proportion en nombre de plants

Les rendements en maïs (variété noir précoce), en 2<sup>e</sup> année de culture sur tepetate sont relativement médiocres (0,8 t/ha) en culture associée à fève et haricot, en comparaison de ceux obtenus à Hueyotlipan (2,5 en 1992, 2<sup>e</sup> année ; 2,4 en 1995, 5<sup>e</sup> année). Cela ne peut s'expliquer par des conditions climatiques plus arides ; ce n'était pas le cas en 1994. Mais plutôt par la densité des plants, qui est faible dans l'association maïs + fève + haricot ; ainsi en

monoculture (T3), le rendement est de 1,9 t/ha et donc plus proche de la moyenne normale. En outre, il faut invoquer la fertilisation insuffisante. Sur la terrasse T4, l'apport trop tardif et insuffisant de fumier s'est traduit par une mauvaise croissance, un très large écart entre floraison mâle et femelle ( $\approx 40$  jours) et une mauvaise efficacité reproductive (64), en conséquence un rendement de seulement 0,5 t/ha. Sur les terrasses avec fertilisation minérale, cet effet a été moins sensible, la croissance meilleure, le rendement de 0,9 t/ha en association ou de 1,9 t/ha en monoculture. Cependant, l'efficacité reproductive demeure en moyenne de 66% (la normale est 80%) et le rendement est inférieur à la production optimale de cette variété. Cela s'explique par une nette déficience en azote. Le rendement n'est pas meilleur sur sol agricole (T7).

En revanche, les rendements en grain de la fève sont normaux, compte tenu de la densité des plants ; ils sont en moyenne de 1,1 t/ha sur tepetate et de 1,0 t/ha sur sol naturel. La terrasse avec fumure organique produit autant ; en effet la fève est peu exigeante en azote minéral du fait de sa capacité à fixer l'azote atmosphérique via les Rhizobium ; une inoculation de Rhizobium et d'Azospirillum avait été faite sur ces terrasses en 1994.

La production du haricot, qui n'a pu se développer normalement, est négligeable (0,1 à 0,2 t/ha). La production globale moyenne sur les terrasses de tepetate avec fertilisation minérale a été de 2,1 t/ha. Elle paraît convenable en comparaison de la moyenne nationale, mais elle est bien inférieure à celle obtenue avec la même variété de maïs à Hueyotlipan (3,4 t/ha) donc inférieure à l'optimum. Pour la culture du maïs, plante exigeante, du fait de l'incidence de la nutrition azotée sur le retard à la floraison femelle et sur l'efficacité reproductive, une fertilisation organique ou minérale insuffisante est très préjudiciable sur le rendement en grain : l'inoculation microbienne d'azospirillum et l'association avec la fève fixatrice d'azote n'a pas pallié cette déficience. Dans ces conditions avec fertilisation minérale insuffisante, la production de la monoculture de maïs a été un peu inférieure à celle de l'association maïs-fève (1,9/2,1 t/ha).

### C. Année 1995.

#### C1. Pluie.

Le total des précipitations a été de 735 mm en 1995, mais seuls 545 mm sont tombés pendant la saison agricole (Fig. 3). Les pluies furent très irrégulières avec plusieurs périodes de sécheresse après les semis et durant la croissance végétative dont la floraison. Enfin, deux gelées précoces se sont produites mi-octobre, affectant une partie des rendements de maïs.

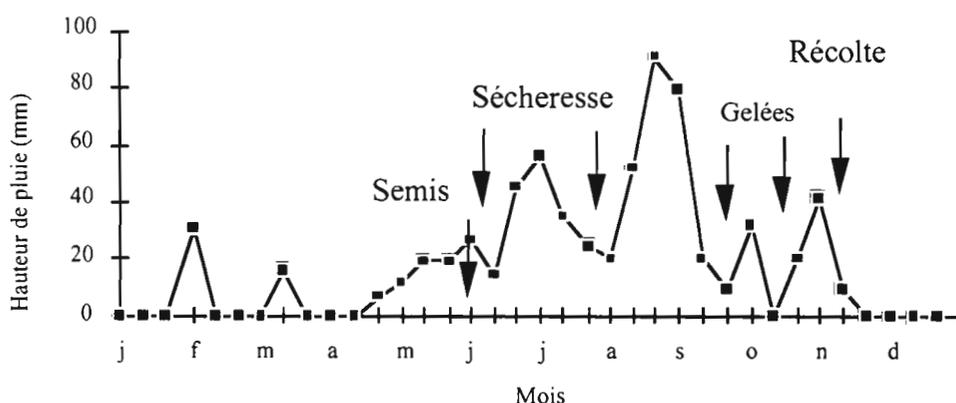


Figure 3. Pluviométrie en 1995 (chaque point correspond à la valeur décadaire).

#### C2. Rendements.

Les cultures se sont mieux développées sur le sol de référence (T7) que sur les autres terrasses (Tab. 18 et 19). Le maïs (variété noir précoce) sur celles-ci a présenté un important déphasage entre floraison masculine et féminine (15 jours) ce qui a entraîné une efficacité reproductive réduite et par conséquent des rendements plus faibles.

Tableau 18. Croissance du maïs et de la fève en 1995.

Terrasse	Plants		Hauteur		Jours à 50% de floraison			Mat. Sèche (paille)	
	Mais	Fève	Mais	Fève	Mais		Fève	Mais	Fève
	----- n/m <sup>2</sup> -----		----- m -----		masc.	fem.		----- t/ha -----	
T2	2.7	1.4	1.86	1.16	90	105	92	3.1	1.1
T3	4.0	-	1.83	-	94	110	-	5.0	-
T4	3.3	1.4	1.76	1.23	96	111	93	2.7	1.2
T5	4.2	1.4	1.96	1.30	89	105	92	3.4	1.3
T6	3.7	1.4	2.06	1.22	87	103	91	2.6	1.4
T6b	4.1	1.3	2.03	1.35	87	102	90	2.7	1.2
T7	3.9	1.3	1.86	1.00	74	81	95	3.1	0.5

Le coefficient de corrélation entre rendements estimés et mesurés est de 0,88 pour le maïs et de 0,97 pour la fève. Globalement, la variabilité au sein de chaque parcelle tourne autour de 30%, sauf pour la T7 où ce coefficient est proche de 50%. En effet, une partie de cette terrasse a souffert d'engorgement par l'eau provoquant d'importants dégâts sur les plantes.

Tableau 19. Rendements du maïs et de la fève en 1995.

Terrasse	Maïs		Fève		Total	
	M	E	M	E	M	E
T2	1.14	0.84	0.58	0.60	1.72	1.44
T3	1.29	1.40	-	-	1.29	1.40
T4	0.61	0.82	0.44	0.48	1.05	1.30
T5	1.06	1.20	0.51	0.50	1.57	1.70
T6	0.97	0.72	0.44	0.41	1.41	1.13
T6b	1.11	0.94	0.60	0.60	1.71	1.50
T7	2.56	2.67	0.26	0.24	2.72	2.91
Proportion*	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1

M=Mesuré, E=Estimé

\*Proportion en nombre de plants

En 1995, sur les terrasses de tepetate avec fertilisation minérale et culture associée (T2, T5, T6 et T6b), la production de maïs a été un peu supérieure à celle de 1994 (1 / 0,8 t/ha), manifestant une légère amélioration de cette production en 3<sup>e</sup> année de culture, malgré des aléas climatiques (sécheresse à la floraison, gelées); le retard à la floraison femelle, d'environ 15 jours par rapport à la floraison mâle a été deux fois plus court qu'en 1994 (environ 35 jours) et l'efficacité reproductive s'est améliorée, sans doute en raison d'une meilleure nutrition minérale. La terrasse T6b, sans résidu de récolte ne se distingue pas de T6; donc l'effet de ces résidus a été nul. La terrasse T4 avec fumure organique seule continue à avoir une mauvaise production (0,6 t/ha seulement), pour la même raison, déficience en N et P. Le mauvais rendement de la monoculture de maïs (T3), 1,3 t/ha est surprenant et inexplicable, sinon comme pour la terrasse T4, par un plus grand retard à la floraison mâle et femelle et donc à une mauvaise efficacité reproductive. Sur la terrasse de sol naturel T7, le rendement du maïs a été multiplié par 2,5, en relation avec une meilleure précocité de la floraison mâle et un écart très réduit, à 7 jours de la floraison femelle.

L'efficacité reproductive étant proche du maximum, le rendement a été proche de l'optimum pour cette variété. On ne sait pas expliquer cette brusque amélioration des conditions nutritives sur cette terrasse.

En revanche, la production de la fève a diminué de plus de moitié par rapport à 1994. Les conditions climatiques plus défavorables en raison de pluies fréquentes qui occasionnent des maladies expliquent probablement cette chute de rendement. Cet effet est plus sensible sur la terrasse T7 en raison du fort développement du maïs, les deux productions étant antagonistes (voir Hueyotlipan). En conséquence, la production sur les terrasses de tepetate a été inférieure en 1995/1994; mais pas sur la terrasse de sol naturel. Il faut donc considérer que la fertilisation minérale ou organique sur tepetate est demeurée inférieure au seuil nécessaire pour

une bonne production du maïs. La culture de fève est sensible à des aléas climatiques et ne peut assurer un bon complément de production chaque année, notamment en cas d'année très pluvieuse.

#### D. Année 1996.

##### D1. Pluie.

En 1996, le total des pluies enregistrées a été faible (560 mm) dont 123 mm tombés en dehors de la période agricole (Fig. 4). De plus, sur ces 463 mm, 5 averses représentent à elles seules près de 40% de ce total. De fait, la saison des pluies n'a réellement commencé qu'à la fin août. Les précipitations furent alors fréquentes, ce qui a permis aux cultures de rattraper leur retard et de ne plus souffrir de stress hydrique. Il y a eu cependant deux aléas climatiques : une certaine sécheresse avant la floraison, des gelées avant la récolte.

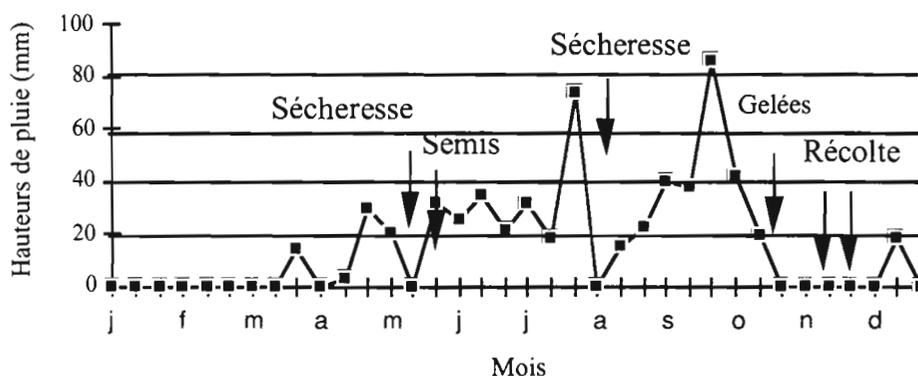


Figure. 4. Pluviométrie en 1996 (chaque point correspond à la valeur décadaire).

##### D2. Rendements.

\* Orge + Médicago

(Terrasses T1, T2, T3, T4 et T7). Le médicago polymorphe (luzerne) est un essai de culture dérobée sous céréale, pour faire bénéficier l'orge de l'aptitude de la légumineuse à fixer l'azote atmosphérique, puis prolonger cette culture et servir ensuite soit de fourrage, soit d'engrais vert. Mais le médicago s'est mal développé en 1996, à cause d'une certaine aridité après le semis ; son installation a été très irrégulière et son rendement très faible. Le tableau suivant (Tab. 20) présente les paramètres du développement végétal de l'orge et du médicago.

Tableau 20. Croissance de l'orge et du médicago en 1996.

Terrasse	Orge							Médicago				Orge+Médicago		
	Plants ----- n/m <sup>2</sup>	Talles ----- n/m <sup>2</sup>	Epis ----- n/m <sup>2</sup>	Indice tallage	Haut. cm	végétal		Plants n/m <sup>2</sup>	Haut. cm	Fourrage		Plant n/m <sup>2</sup>	Végétal	
						Vert t/ha	Sec t/ha			Vert t/ha	Sec t/ha		Vert t/ha	Sec t/ha
T1	127	201	154	1.6	25.4	4,2	1.1	185	8.5	0.8	0.5	312	5.1	1.6
T2	122	237	153	2.0	23.4	4.9	1.3	7	8.7	0.1	0.0	129	5.0	1,4
T3	130	212	158	1.7	26.6	4.4	1.3	-	-	-	-	-	-	-
T4	75	244	189	3.3	43.1	13.3	3.6	29	17.9	0.3	0.1	104	13.6	3.6
T7	145	217	187	1.5	34.5	7.6	2.3	14	6.4	0.1	0.0	159	7.7	2.3

En 1996, la fumure organique a été améliorée par une fertilisation starter sur la terrasse T4. Malgré un faible nombre de plants d'orge après levée, il y a eu une forte compensation au tallage (3,3), suivi d'un très fort développement végétal par rapport aux autres terrasses sur tepetates, en hauteur (+ 70%) et surtout en matière verte et en matière sèche (+ 170%). Cet effet a été visible aussi sur la hauteur du *Médicago*. C'est le signe d'une meilleure nutrition azotée. Le développement de l'orge a été aussi un peu meilleur sur sol naturel que sur tepetate en condition de seule fertilisation minérale. La monoculture d'orge ne se distingue pas de la culture

associée. Un certain retard à l'apport de fertilisation minérale (après le semis) pourrait expliquer cette forte différence en 1996 du développement de l'orge entre la fumure minérale et organique. Le tableau suivant (Tab. 21) présente les paramètres d'élaboration du rendement et le rendement en grain de l'orge en 1996.

Tableau 21. Rendement en grain de l'orge en 1996.

Terrasse	Talle	Epi	Efficienc	100 grains	N grains	Rendement	
	n/m <sup>2</sup>		reproduct.	g	n/m <sup>2</sup>	estimé	mesuré
			%			t/ha	
T1	236	192	82.1	2.9	4951	1.3	0.8
T2	358	274	77.0	3.3	4991	2.0	1.4
T3	322	312	96.7	3.0	4831	1.5	1.6
T4	356	317	96.8	3.2	6070	2.1	1.9
T7	197	179	91.2	-	-	1.3	1.2

Les rendements en grain sont médiocres, même dans le meilleur des cas sur la terrasse T4, si on les compare à ceux obtenus en 1993, pourtant en 1<sup>re</sup> année de culture et en année exceptionnellement sèche : 1,4 / 1,6 t/ha en T2 ; 1,6 / 2,0 t/ha en T3 ; 1,9 / 2,6 t/ha en T4 ; 1,2 / 2,5 t/ha en T7 (sol naturel). Cela s'explique en 1996, comparé à 1993, par un moindre développement des plants, un nombre de grains par épi médiocre (15 à 20) et un poids moyen de 100 grains plutôt médiocre (3,1 g). Ces résultats s'expliquent par deux causes : un retard à la fertilisation minérale, la sécheresse au moment du semis et surtout au moment de l'élaboration du grain (qui a provoqué l'échaudage).

\* Maïs + Fève (terrasses T5, T6 et T6b).

En ce qui concerne la croissance et la production végétale du maïs (var. negro), il n'y a pas de différence significative entre les 3 terrasses, donc pas d'effet du billonnage cloisonné (contreo) et du résidu de récolte. Le rendement en matière sèche est moyen, mais un peu inférieur à l'optimum (3 à 4 t/ha) pour cette variété (essai de Hueyotlipan). La fève a été plus sensible au traitement "contréo" qui permet une meilleure régulation de l'alimentation en eau : le tallage et la production en matière sèche sont quasiment doublés par rapport au billon traditionnel. La conservation des résidus de récolte en T6 / T6b n'a pas amélioré la production végétale (Tab. 22).

Tab. 22. Évaluation de la croissance et de la production végétale du maïs et de la fève en 1996.

Terrasse	Maïs				Fève						Maïs + Fève	
	Plants	Haut.	Végétal		Plants	Talles	Indice	Haut.	Végétal		Végétal	
	n/m <sup>2</sup>	cm	Vert	Sec					tallage	cm	Vert	Sec
			t/ha		n/m <sup>2</sup>				t/ha		t/ha	
T5	4.4	194.5	20.1	2.5	2.9	8.8	3.4	97.2	5.9	1.0	26.0	3.5
T6	4.8	196.3	21.3	2.7	4.1	6.8	1.6	88.8	3.4	0.5	24.7	3.2
T6b	4.4	184.7	19.5	2.5	3.8	6.5	1.7	87.5	4.0	0.6	23.5	3.1

Les tableaux suivants (Tab. 23) présentent les paramètres d'élaboration du rendement en grain et ce rendement pour le maïs et la fève.

Tableau 23. Evaluation du rendement en grain du maïs en 1996.

Terrasse	Plants	Epis	Mat. sèche	100 grains	Grains	Grains	Rendement	Biom	Indice
	-- n/m <sup>2</sup> --	--	t/ha	g	n/m <sup>2</sup>	n/épi	t/ha		récolte
T5	4.0	4.0	4.8	21.8	1040	257	2.5	7.1	0.35
T6	4.1	3.9	4.2	21.7	1048	275	2.4	6.5	0.38
T7b	3.2	3.0	2.9	20.4	773	259	1.7	4.6	0.38

Biom tot biomasse totale (tige + grain).

Les rendements en grain du maïs (Var. noir) sont près de 2,5 fois supérieurs à ceux obtenus en 1994 (2<sup>e</sup> année de culture) sur ces mêmes terrasses et proches de l'optimum obtenu à Hueyotlipan pour cette variété. L'indice récolte (0,38) et le poids de 100 grains (22 g) sont conformes aux valeurs proches de l'optimum. Contrairement à l'orge, le maïs n'a pas souffert d'aléas climatiques et nutritionnels, bien que la formule de fertilisation minérale soit insuffisante en azote. Peut-être est-ce l'effet cumulé sur 3 ans de l'association maïs-fève (Tab. 24). On remarque cependant si les évaluations sont exactes sur la terrasse T6b que sans retour des résidus de récolte, le rendement du maïs a été moindre (mais c'est contradictoire avec l'observation du développement végétal).

Tableau 24. Évaluation du rendement en grain de la fève en 1996.

Terrasse	Plants Talles		Indice tallage	Haut P+V sec		Gousses	Grains	100 grains	Rend grain	Biom totale	Indice récolte
	---- n/m <sup>2</sup> ----	cm		t/ha	----- n/m <sup>2</sup> -----						
T5	3.8	7.3	1.9	120	0.9	25	45	125	0.6	1.4	0.37
T6	3.2	5.5	1.6	108	0.5	15	27	119	0.8	0.8	0.40
T6b	3.4	10.4	3.1	109	1.0	24	46	110	0.5	1.5	0.34

Malgré un bon développement végétatif, le rendement en grain de la fève a été faible (0,3 à 0,6 t/ha), au contraire de ce qui avait été obtenu en 1994 (1 à 1,2 t/ha). Il est donc confirmé que quand le maïs se développe et produit bien, la fève produit peu, ou l'inverse ; sans doute pour des raisons physiologiques et surtout sanitaires. On remarque aussi, quoique modéré, l'effet bénéfique du "contro" en T5. Sur la terrasse T6b, la moindre production du maïs est compensée par un meilleur rendement de la fève.

Globalement le traitement contro a permis la meilleure production (3,1 t/ha, proche de l'optimum). En billon traditionnel avec fertilisation minérale, la production a été meilleure qu'en 1994 et 1995, témoignant d'une amélioration de la nutrition de la plante, surtout le maïs. Elle demeure cependant avec des rendements de 2,7 à 2,2 t/ha en dessous de l'optimum.

Si on compare le rendement en grain de la monoculture (orge ou maïs sur) tepetate (T3) au produit global des cultures associées (T2, T4, T5 et T6), de 1993 à 1995, on observe une légère tendance à un effet bénéfique de la légumineuse et à un accroissement du produit global, bien qu'il y ait une forte variabilité aléatoire d'une terrasse à l'autre et que le bilan économique soit discutable.

Tableau 25. Rendement monoculture/cultures associées.

	1993	1994	1995
Moyenne T2 + T4 + T5 + T6	1.4	1.1	1.1
Variation	0.9 - 2.0	0.9 - 1.2	0.8 - 1.3
Référence	1	1	1

### Conclusion brève

Nous évoquerons d'abord l'effet des différents traitements prévus par le protocole expérimental, puis discuterons de certains facteurs qui sont apparus à l'analyse des résultats.

#### Effet des traitements expérimentés.

Le tepetate cultivé avec fertilisation minérale a été aussi productif que le sol naturel pour l'orge + vesce en 1<sup>re</sup> année de culture ou l'orge + luzerne en 4<sup>e</sup> année, ou maïs + fève et haricot en 2<sup>e</sup> année ; en 3<sup>e</sup> année, exceptionnellement le maïs a produit deux fois plus sur sol naturel (raison inconnue). A Hueyotlipan, nous avons eu le même résultat.

La profondeur du tepetate cultivé à 60 cm n'a eu aucune incidence sur la production ni de l'orge ni du maïs. Un défonçage à 40 cm en culture pluviale suffit donc pour le maïs (variété locale) avec billonnage.

La culture associée orge + vesce ou maïs + fève a une tendance légère à produire globalement un peu plus de grain que la monoculture d'orge ou de maïs. Cette corrélation n'est

pas tout à fait sûre à cause du petit nombre et de la variabilité des parcelles expérimentées. Les deux productions sont complémentaires, l'une compensant l'autre et vice versa. La légumineuse peut enrichir progressivement le stock d'azote minéralisable du tepetate cultivé ; fait sensible pour le maïs en 4<sup>e</sup> année.

La texture plus fine et la pente réduite de la terrasse T5 n'a eu aucun effet sur le rendement ni de l'orge ni du maïs, mais les différences après l'analyse étaient peu importantes.

L'élimination des résidus de récolte de maïs + fève n'a pas eu un effet lors de sa première application en 3<sup>e</sup> année de culture, mais a produit une faible réduction de rendement en grain et matière sèche de maïs en 2<sup>e</sup> année d'application (1996) qui a été partiellement compensée par un meilleur rendement en grain de la fève. Ce résultat cependant, à cause d'aléas de récolte et de l'absence de répétition demande à être contrôlé (le retour en azote du résidu de récolte est minime  $\approx 3$  à 4 kg de N/ha et par an, voir chap. II).

Le billon cloisonné (contreo), en 1996 année suffisamment pluvieuse, n'a pas sensiblement accru le rendement en grain du maïs, mais celui de la fève et donc la production globale. Ce résultat demande à être contrôlé.

#### Autres facteurs apparus à l'analyse.

Le premier concerne la variabilité climatique interannuelle et notamment les aléas de sécheresse ou de gel qui se font sentir différemment selon les plantes et réduisent la signification des variations de production en fonction du nombre d'années de culture ou de la rotation culturale.

Le deuxième facteur est la variabilité importante du potentiel de fertilité ou des façons culturales entre terrasses et sur la même terrasse. Faute de répétition la comparaison des rendements est moins significative.

La fertilisation minérale ou organique a été systématiquement insuffisante, surtout pour le maïs. Dans le cas du maïs, en deçà d'un certain minimum d'apport en azote, la réduction d'efficacité reproductive est rédhitoire sur le rendement. L'association d'une légumineuse fixatrice d'azote (inoculée en *Rhizobium* spécifique) ne pallie pas ce besoin à court terme, mais probablement à moyen terme. En outre l'application tardive de la fumure organique (en 1994) ou minérale (en 1996) a eu des effets négatifs.

La culture associée maïs + fève, dans ces conditions de fertilisation modérée et de haute densité des plants, est complémentaire : en cas de médiocre développement du maïs, la fève produit bien ; en cas contraire elle produit peu. Globalement il y a une légère augmentation de la production, mais peu significative par rapport à la monoculture. L'intérêt économique n'est pas globalement en valeur monétaire, mais plutôt en assurant une rentabilité régulière d'une année sur l'autre.

L'association orge + légumineuse, en vue de prolonger ou améliorer la production de la céréale, n'a pu être éprouvée d'une manière convaincante. Il reste à trouver une légumineuse mieux adaptée aux conditions climatiques locales et à la concurrence de la céréale. Le même problème s'est posé pour l'association blé + *Médicago polymorpha* sur la même station.

#### **2.3.3. Expérimentation en petites parcelles de diverses plantes et rotations culturales, sur tepetate.**

Cette expérimentation a été mise en place dans le prolongement des terrasses destinées à la mesure de l'érosion, dès 1993, en vue d'expérimenter un plus grand nombre de plantes, ou variétés de maïs, et un système de rotation culturale plus complexe de 1993 à 1995. Les résultats ont été présentés partiellement (Márquez et al., 1996). La faible taille des parcelles (4 m<sup>2</sup>), leur grande variabilité et le petit nombre de répétitions (4 par traitement) ne permettent pas une analyse comparative très significative. Nous ne présenterons que certains des résultats de la production de l'orge, orge + vesce, maïs, maïs + fève, fève, haricot, maïs + haricot, petit-pois, luzerne (*Médicago polymorpha*).

Tab. 26. Évolution de la production en monoculture ou culture associée sur tepetate (93 à 95).

Poids en grain t/ha	1993	1994	1995
Orge seule	1.8	3.0	2.9
Orge + vesce	2.1		
Maïs seul	0.2 - 0.0	1.9	1.3
Maïs + fève		2.1	2.1
Fève seule	1.2	2.2	0.8 - 2.0
Fève + maïs		2.8	1.0
Haricot seul	1.0	1.0	-
Haricot + maïs		0.3	
Petit pois seul			0.25
Luzerne seule			0.25

On peut tirer un certain nombre d'enseignements des résultats précédents sur tepetate.

- L'orge produit normalement à partir de la 2<sup>e</sup> année et sa production se maintient en 3<sup>e</sup> année.

- Le maïs commence à produire en 2<sup>e</sup> année ; mais son rendement n'est qu'à 50% du rendement optimum.

- L'association maïs-légumineuse n'est que faiblement significative en amélioration de rendement, en dépit d'une meilleure nutrition azotée. Mais la fertilisation minérale est sans doute insuffisante. C'est pourquoi la production n'augmente pas en 3<sup>e</sup> année bien que les aléas climatiques puissent en être aussi la cause.

- La fève commence à produire en 1<sup>re</sup> année ; le rendement en grain est normal en 2<sup>e</sup> année, malgré la compétition du maïs. Elle est relativement médiocre et très variable en 3<sup>e</sup> année, sans doute à cause de problèmes sanitaires en année pluvieuse.

- Le petit-pois et la luzerne ont un rendement plutôt faible en 3<sup>e</sup> année.

Ces résultats sur petites parcelles ne sont pas significativement différents de ceux obtenus sur terrasses ; ils permettent de les confirmer et de les compléter.

### 3. CAS DE LA CANGAHUA D'ÉQUATEUR, DE TYPE CALCIQUE CLASSIQUE.

L'expérimentation a été faite d'abord sur les deux stations de La Tola (Tumbaco) et de cangahua (Cayambe) selon le même protocole, en 1994-95 et 1995-96, sous la direction de Trujillo et Zebrowski (rapport final, 1997). Ensuite il y a eu une participation à une expérimentation en milieu paysan de réhabilitation de la cangahua pour l'agriculture à Licto près de Riobamba (projet Licto, CESA, Têran, 1996).

#### 3.1. STATIONS DE LA TOLA ET CANGAHUA.

Il y a deux stations : la Tola, près de Quito à 2 500 m d'altitude est plus humide avec 760 mm de pluie en moyenne annuelle, seulement 3 mois arides de juin à août et une petite saison plus sèche de décembre à janvier. Cangahua, plus au Nord à 2 800 m d'altitude est moins pluvieuse avec 550 mm de pluie en moyenne et 4 mois arides de juin à septembre. Le but était de comparer deux conditions climatiques. A Cangahua, il était également prévu de tester une irrigation d'appoint en début de saison agricole (octobre-novembre).

##### 3.1.1. Protocole expérimental.

La cangahua a été ameublie en 1994 par sous-sarclage et labour profond (mécanisé), puis terrassée et affinée, pour obtenir un sol de 35 cm de profondeur à la Tola et 30 cm à Cangahua. En 1995, pour la 2<sup>e</sup> année de culture, le travail a été manuel. Les parcelles sont de 12 m<sup>2</sup>.

### 3.1.1.1. Les différents traitements.

Les différents traitements étudiés sont été les suivantes:

- Fertilisation : T0=Témoin ; T2=Fertilisation chimique (100 N, 60 P, 0 K) ; T1=Fumier de bovin (40 t/ha) ; T1 + T2: En 1995-96, l'apport de fumier est réduit à 20 t/ha.

- Irrigation : elle a été pratiquée systématiquement à Cangahua, station la plus aride, sur toutes cultures, en comparaison avec des témoins non irrigués, mais avec 3 répétitions seulement ; traitements RT1 (+ fumier), RT2 (+ engrais minéral).

- Apport de ponces volcaniques : il est expérimenté en 1994-95 comme test sur la seule culture d'orge, dans les deux stations, et seulement trois répétitions : PT1, PT2 (fertilisation organique ou minérale).

- Sol agricole de référence avec fertilisation minérale : S T2

Au total ce sont 69 parcelles à La Tola et 54 à Cangahua qui sont expérimentées.

### 3.1.1.2. Les différentes plantes cultivées.

Les plantes cultivées ont été les suivantes (Tab 27).

- 1994-95. La luzerne en préculture au cours du premier cycle agricole ne s'est pas développée (sauf parcelle irriguée). En deuxième cycle ont été cultivés : avoine fourragère, orge et maïs.

- 1995-96. Haricot en 1<sup>er</sup> cycle ; orge et maïs en 2<sup>e</sup> cycle.

Tab. 27. Apport en eau (mm) pour les plantes cultivées, à Cangahua et la Tola (1994 à 1996).

	Cangahua		La Tola	
1994-95				
Plante	Orge	Maïs	Orge	Maïs
pluie mm	289	353	518	590
Irrigation	+	+	-	-

1995-96	haricot	orge	maïs	haricot	orge	maïs
pluie mm	417	396	509	497	566	500
irrigation mm	61	68	88	5	23	0
eau totale mm	498	464	597	502	589	500

Les conditions climatiques ont varié fortement en 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> année de culture et en conséquence l'irrigation ; il y a eu aussi plusieurs aléas cultureux.

A Cangahua, en 1994-95, tous les traitements ont reçu une irrigation d'appoint (T1 et RT1, T2 et RT2), faute de pluie en début de saison agricole. En 1995-96 de même.

En 1996, en juin, il y a eu une tornade avec grêle qui a endommagé les récoltes d'orge et de maïs sur la station de la Tola. En outre, en 1996, il y a eu de graves dégâts par suite de pénétration du bétail à la Tola à deux reprises, à Cangahua une fois ; l'estimation de la récolte n'a pu être faite que sur une partie des parcelles. Enfin il y a eu une attaque parasitaire à la récolte du maïs en 1996 qui a réduit la production.

### 3.1.1.3. Les paramètres évalués.

Les paramètres évalués ont été :

1994-95. % levée ; hauteur ; matière verte et sèche ; rendement en grain.

1995-96. entre les précédents, indice de récolte, nombre d'épis ou de gousses et de grains / épi ou gousse.

### 3.1.2. Résultats.

Tableau 28. Rendement des cultures d'avoine de haricot, orge et maïs en 1994-95 et 1995-96 à La Tola et Cangahua.

Culture	Année	Station	Traitements								
			T0	T1	T2	T1T2	RT1	RT2	PT1	PT2	ST2
Avoine (1)	94-95	La Tola	0.45	1.62	1.61	-	-	-	-	-	-
		Cangahua	0.57	-	-	-	2.65*	1.89*	-	-	-
Haricot (2)	95-96	La Tola	0.29	1.03	0.73	-	-	-	-	-	1.26
		Cangahua	0.49	-	-	-	1.18*	0.99*	-	-	1.89
Orge (2)	94-95	La Tola	1.09	2.66	4.12	-	-	-	0.8	2.2	1.54
		Cangahua	0.07	2.80*	1.50*	-	-	-	-	1.5	3.42
	95-96	La Tola	0.06	0.75	1.25	-	-	-	1.31	0.76	-
		Cangahua	0.07	-	-	-	1.96*	1.22*	1.99	3.13	-
Maïs (2)	94-95	La Tola	0.06	0.34	0.75	0.70	-	-	-	-	0.0
		Cangahua	0.03	1.45*	0.66*	-	1.84*	0.58*	-	-	-
	95-96	La Tola	0.04	0.25	0.18	-	-	-	-	-	0.42
		Cangahua	0.04	-	-	-	1.82*	1.50*	-	-	-

(1) : Matière sèche (t/ha) de haricot, orge et maïs ; (2) : Grains (t/ha).

\* A Cangahua, tous les traitements ont reçu une irrigation d'appoint (T1 et RT1, T2 et RT2), faute de pluie en début de saison agricole.

#### 3.1.2.1. Avoine fourragère.

L'avoine fourragère en première année de culture a une production de matière sèche modérée (1,6 à 2,6 t/ha). A La Tola, la fumure organique (T1) ne se distingue pas de la fertilisation minérale. A Cangahua la première produit sensiblement plus, probablement à cause de l'irrigation d'appoint.

#### 3.1.2.2. Haricot.

Le haricot en deuxième année de culture a un rendement convenable (0,7 à 1,2 t/ha) avec une fertilisation minérale ou organique, à La Tola et Cangahua. Le rendement est un peu meilleur à Cangahua avec une irrigation d'appoint. La fumure organique produit un peu plus dans les 2 stations que la fertilisation minérale ; ceci est normal pour une culture de légumineuse. Le sol naturel avec fertilisation minérale a un meilleur rendement que la cangahua en 2<sup>e</sup> année de culture.

#### 3.1.2.3. Orge.

L'orge avec fertilisation minérale ou organique a une production convenable dès la première année de culture (2 à 4 t/ha), à La Tola et à Cangahua. La fumure organique a eu un rendement inférieur à la fertilisation minérale à La Tola, en régime climatique subhumide ; c'est l'inverse à Cangahua en régime subaride, même avec irrigation d'appoint. Les rendements sur sol agricole, comparés à la cangahua, sont inférieurs à La Tola, supérieurs à Cangahua ; mais il est possible que le sol de Cangahua soit plus fertile que celui de La Tola.

En deuxième année de culture la production de l'orge a été sensiblement moindre, surtout à La Tola où cela est dû à des aléas (dommages du bétail, grêle). A Cangahua, l'effet de la fumure organique demeure meilleur que la fertilisation minérale.

L'effet d'un apport de ponce, mélangé à la cangahua, avec fertilisation minérale ou organique afin d'améliorer l'économie de l'eau, n'est pas significativement positif ni à La Tola, ni à Cangahua.

#### **3.1.2.4. Maïs.**

Le maïs a eu une mauvaise production à La Tola, quel que soit le traitement, en 1<sup>re</sup> et en 2<sup>e</sup> année de culture. En 1<sup>re</sup> année cela paraît normal si on se réfère aux résultats obtenus au Mexique. Mais en 2<sup>e</sup> année, c'est plutôt dû aux aléas (bétail, grêle, parasites). Cependant, on a observé une forte hétérogénéité des épis et un mauvais remplissage des grains qui pourraient être dûs à une mauvaise sélection et adaptation de cette variété locale, et notamment à un fort retard à la floraison femelle. La production sur sol agricole avec fertilisation minérale a été également nulle en 1994-95 ou faible en 1995-96 sur cette même station.

A Cangahua, les résultats sont différents. Avec fumure organique et irrigation d'appoint, le rendement de la variété locale a été convenable dès la 1<sup>re</sup> année (1,5 t/ha), mais plutôt faible avec la fertilisation minérale (0,7 t/ha). En deuxième année, le rendement s'est amélioré surtout pour la fertilisation minérale (1,5 t/ha). Donc la productivité du maïs est acceptable en climat subaride avec fertilisation et irrigation. Elle pourrait être accrue par une amélioration variétale.

#### **3.1.2.5. Conclusions.**

En conclusion, l'orge a une bonne production dès la première année de culture sur les deux stations avec fertilisation minérale ou organique. Ce résultat est comparable aux rendements obtenus au Mexique. Le haricot a un rendement convenable avec fertilisation sur les deux stations en deuxième année de culture. La production d'avoine fourragère a été plutôt faible en première année de culture à La Tola ; elle est améliorée à Cangahua par la fumure organique et l'irrigation. Le maïs a eu un mauvais rendement au cours des deux années à La Tola en climat subhumide ; cela peut être dû à une mauvaise adaptation variétale, et aussi à des aléas. En revanche à Cangahua en climat subaride avec irrigation d'appoint la fumure organique permet une production moyenne dès la première année. Cette production augmente en deuxième année dans le cas de la fertilisation minérale et même de la fumure organique. Dans ce cas, le rendement approche celui obtenu au Mexique sur tepetate en 2<sup>e</sup> année de culture ; il pourrait être augmenté par une amélioration variétale. De toute manière les rendements obtenus en haricot, orge et maïs sur Cangahua avec fertilisation sont de 2 à 4 fois supérieurs à la moyenne de production des paysans de cette région d'Equateur.

### **3.2. STATION DE LICTO.**

La station de Licto, au sud de Riobamba est située à 2 900 m d'altitude. Le climat est subaride et la hauteur de pluie moyenne annuelle pendant la saison agricole est de 420 mm seulement.

La cangahua a été défoncée mécaniquement par deux passages croisés de ripper à 40-60 cm de profondeur, puis ameublie par charrue à disque ou manuellement et terrassée en terrasse en pente réduite de formation progressive grâce à un muret de blocs de cangahua à l'aval.

Deux essais ont été expérimentés parallèlement en 1995-96.

#### **3.2.1. Essai 1. Comparaison de différents apports de matière organique.**

Dans ce cas il n'y a qu'un seul mode de préparation de terrasses, entièrement mécanisé de texture fine par deux passages de disques. Il y a 7 traitements de matière organique, à savoir : composts OD : décomposé, OF : frais, OS : semi décomposé à la dose de 10 t/ha ; fumier de poule OG, 5 t/ha ; lisier OR 10 t/ha ; résidus de récolte, RA d'avoine, RM de maïs, 5 t/ha ; qui sont comparés à la fertilisation minérale (100, 60, 00) Fm et au témoin T. Les trois plantes sont : avoine fourragère Af, petit-pois P et orge de brasserie Cc.

Les résultats présentés dans le tableau suivant (Tab. 29) sont en t/ha de matière sèche pour Af, ou de grain pour P et Cc.

Tableau 29. Rendement d'avoine, pois et orge de l'essai 1 de Licto.

Traitement plante	Compost			Fumier	Lisier	Résidus de récolte		Minéral	Témoin
	OD	OF	OS	OG	OR	FA	FM	FM	T
Af	4.1	2.7	2.7	3.1	3.2	1.1	0.8	2.9	2.5*
P	0.28	0.27	0.27	0.20	0.06	0.02	0.03	0.02	0.08
Cc	3.8	2.3	1.9	1.5	1.7	1.7	1.7	2.4	0.4

### 3.2.1.1. Avoine fourragère.

La production d'avoine fourragère est importante (2 à 4 t/ha) sur tous les traitements avec fertilisation minérale et organique de compost, fumier et lisier, malgré leur faible dose (10 à 5 t/ha), sauf les résidus de récolte dont la dose (5 t/ha) et la vitesse de minéralisation sont trop faibles pour assurer un bon développement de l'avoine.

### 3.2.1.2. Petit-pois.

Tous les rendements en petit-pois sont faibles avec fumure organique de compost et de fumier, ou quasi nuls sur les autres traitements, même avec fertilisation minérale. Le problème était probablement physiologique ou biologique (absence de *Rhizobium*) ?

### 3.2.1.3. Orge.

La production d'orge est assez importante dans tous les traitements avec fertilisation (1,5 à 3,8 t/ha). La fumure organique de compost décomposé (OD), malgré la faible dose (10 t/ha) a produit 3,8 t/ha et la fertilisation minérale 2,4 t/ha. Le fumier de poule (5 t/ha) est à dose trop faible pour être efficace ; de même les résidus de récolte. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus sur les stations de La Tola et de Cangahua en première année de culture.

## 3.2.2. Essai 2. Comparaison de différentes préparations des terrasses.

Il y a eu sur les terrasses en pente de formation progressive trois différents modes de pulvérisage de la cangahua, à savoir : traditionnelle ; manuelle à la houe ; fine avec deux passages de disques (Tab. 30). En outre, il y a eu une terrasse plane avec fertilisation minérale. Sur les terrasses de préparation grossière, il y a eu 3 traitements : FO avec fumier (10 t/ha), FM fertilisation minérale (100-60-00) et témoin T. Sur la terrasse traditionnelle il y a eu fertilisation minérale. Deux orges ont été cultivées : CA variété locale Atahualpa et CC orge de brasserie. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant en t/ha.

Tableau 30. Rendement de l'orge de l'essai 2 de Licto.

Traitement	Terrasse en pente				Terrasse plane
	Tradition	Préparation grossière			
	FM	FO	FM	T	
Plante					FM
CA	2.6	2.0	3.4	0.9	5.9
CC	5.0	1.6	3.3	1.6	6.5

Ces résultats sont surestimés, car ils ont été évalués en raison d'aléas au moment de la récolte sur des échantillons non choisis au hasard. Cependant, ils témoignent de l'optimum de production dans les conditions de cette expérimentation. Les meilleurs rendements sont obtenus pour l'orge de brasserie (CC), variété plus rustique, sur les traitements de terrasse plane où le sol est plus profond et plus ameubli, ou traditionnel où le sol est plus ameubli, tous deux avec fertilisation minérale. Sur la terrasse de préparation grossière, la fertilisation minérale a été plus

efficace que la fumure organique (fumier 10 t/ha) dont l'apport est sans doute insuffisant pour une bonne production de l'orge.

Le résultat économiquement le plus intéressant est obtenu avec la terrasse de formation progressive, préparation grossière, fertilisation minérale, orge de brasserie. La préparation traditionnelle et la terrasse plane sont sensiblement plus coûteuses à réaliser. La fumure organique est aussi plus coûteuse que la fertilisation minérale ; son apport devrait être au moins doublé pour être assez productif.

### **3.2.3. Conclusions.**

En conclusion, tous ces essais confirment la bonne productivité des céréales, de l'orge notamment, dès la première année de culture de la cangahua, dans ces conditions climatiques plutôt arides. Il semble que les céréales produiraient mieux en climat subhumide à Tumbaco en particulier. Le maïs produirait mieux en climat subaride et plus ensoleillé, à Cangahua en particulier, mais avec une irrigation d'appoint, et seulement à partir de la deuxième année de culture.

### BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE III

Báez A., Ascencio E., Prat C. y Márquez A., 1996. Analisis del comportamiento decultivos en un tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal 1993-1995. (Texcoco, México). Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito (en publication).

Benitez-Mártinez D. et Navarro H., 1996. Rendimiento de maíz-frijol en tepetate en el segundo año de rehabilitación agrícola. Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito (en publication).

Fechter U. et al. 1996. Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate T3) rehabilitado en Tlaxcala, Mexico. Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito (en publication).

Fechter U. et Werner G., 1997. Informe final. Contrat TS3\* CT93 0252.

Flores-Sánchez D. et Navarro H. 1996. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito (en publication).

Márquez A., Prat C., Baez A. et Ascencio E. 1996. Evaluación de sistemas de cultivo en un tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal (Texcoco, México). Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito (en publication).

Navarro H. et al., 1997. Informe final. Contrat TS3\* CT93 0252.

Prat C. et al., 1997. Rapport final. Contrat TS3\* CT93 0252.

Quantin P. et al., 1992. Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final, CEE n° TS2 A 212 C. 77 p.

Quantin P. et al., 1995. Rapport scientifique année 1995, contrat TS3\* CT93 0252.

Terán G., 1996. La recuperación de suelos cangahuosos en el proyecto Licto. Actes du 3<sup>e</sup> simposio suelos volcánicos endurecidos, Quito 1996 (en publication).

Trujillo G. et Zebrowski C., 1997. Rapport final. Contrat TS3\* CT93 0252.

Trujillo G. et Arias J. Rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos en Ecuador : ensayos agronómicos (1994-1996). Actes du 3<sup>e</sup> symposium sols volcaniques indurés, Quito 1996 (en publication).

## CHAPITRE IV

### ANALYSE SOCIO-ÉCONOMIQUE DE LA RÉHABILITATION DES SOLS VOLCANIQUES INDURÉS

Ce chapitre a été rédigé par C. Zebrowski.

#### 1. MOTIVATION, OBJECTIF.

Les études réalisées au Mexique dans le cadre du précédent programme (TS2A212C) Quantin et *al.* 1992 concernant la productivité en station expérimentale des sols volcaniques indurés ont montré que les rendements de certaines cultures sur tepetate pouvaient être élevés. Par ailleurs les travaux présentés au cours du premier symposium sur les sols volcaniques indurés, 1991 à Mexico, ont montré que la réhabilitation agricole du tepetate et de la cangahua était pratiquée au Mexique et en Équateur et pouvait être rentable à partir de 6 à 8 années de culture.

Il s'agissait dans le cadre du second programme de compléter au Mexique nos connaissances concernant la productivité en milieu paysan du tepetate, de préciser et de comparer les coûts de production sur sol agricole et sur tepetate et il fallait étendre l'étude du milieu rural, réalisée jusqu'alors uniquement dans l'État de Tlaxcala à d'autres régions où le tepetate était présent.

En Équateur la faible étendue des sols volcaniques indurés (240 000 ha), en comparaison de celle du tepetate au Mexique, permettait d'envisager une étude globale du milieu rural intégrant la caractérisation socio-économique de ce milieu, l'intérêt pour la mise en culture de la cangahua ainsi que les méthodes pratiquées et les rendements obtenus.

Par ailleurs il fallait préciser, en Équateur comme au Mexique, les coûts de réhabilitation des sols volcaniques indurés.

#### 2. TRAVAUX REALISES ET METHODES.

##### 2.1. CARACTERISATION DU MILIEU RURAL.

Au Mexique, Navarro et al. (1994, 1995, 1996) ont réalisé durant les années 92 à 95 une étude des Systèmes Économiques Familiaux (SEF) des communautés de Tlalpan et de Hueyotlipan (Tlaxcala). Cette étude comprenait non seulement la caractérisation générale des SEF mais aussi une évaluation précise des rendements au moyen de suivis agricoles, tant sur tepetate que sur sol agricole, ainsi que de celle des coûts de production.

La caractérisation du milieu rural a été étendue à d'autres régions du Mexique. Les études sous forme d'enquêtes, ont été réalisées de façon ponctuelle dans des communautés paysannes. L'approche systémique a été privilégiée.

Ainsi, quatre communautés situées dans des régions où le tepetate était présent (Figure 1) ont été étudiées par des élèves du CNEARC encadrés par Prat (1996) : Ly (1993) à Sta Catarina (Edo de Mexico), Lepigeon (1994) à Tlalpan (Tlaxcala), Faugère (1995) à Las Cruces (Jalisco), Alexandre (1996) à Pedregal (Michoacan).

Il s'agissait de caractériser les communautés par les systèmes de production pratiqués (méthode de l'école Mazoyer-Dufumier comprenant une série chronologique d'études : lecture du paysage, historique, pré-typologie des systèmes de production, enquêtes systématisées, caractérisation des systèmes de production suivant la typologie, calculs économiques).



Figure 1. Localisation des enquêtes au Mexique (Prat et al., 1996)

En Équateur deux séries d'enquêtes ont été effectuées. La première, générale, a été réalisée sur l'ensemble des zones présentant des affleurements de cangahua ; la seconde, plus détaillée, dans des zones témoins représentatives.

L'enquête générale a été effectuée par des étudiants du Département de Géographie de la Faculté des Sciences Humaines de l'Université Catholique (PUCE), sous la conduite de A. Vicuña. Une première enquête a été réalisée dans le Nord de la Sierra (provinces de Carchi, Imbabura et Pichincha) durant l'année scolaire 1994-95, une seconde dans le Sud (provinces de Cotopaxi, Tungurahua et Chimborazo) durant l'année 1995-96.

Les zones d'enquêtes ont été délimitées après avoir reporté sur les cartes topographiques à 1/50 000 les limites, extraites des cartes pédologiques, des zones où sont présents les sols à cangahua (Fig. 8, Chap 1). Dans chacune d'entre elles les enquêtes ont été réalisées au hasard.

Les thèmes d'enquêtes réalisés par les étudiants concernaient : la structure familiale, la tenure et l'origine des terres, la superficie et la composition des UP (nature des terres, équipement, présence d'animaux), les cultures pratiquées (façons culturales, rendements).

Les enquêtes détaillées ont été effectuées par des étudiants du CNEARC et de l'INA-PG (France) suivant une méthodologie identique dans le cadre d'une approche systémique des systèmes de production. La première a été faite dans la région de Bolívar (Coudray et Legeait, 1995) La seconde dans la région de Cangahua (Gasselin, 1995).

## 2.2. COÛTS DE REHABILITATION

Quelques auteurs ont essayé de calculer les coûts de réhabilitation des sols volcaniques indurés. Au Mexique, Sánchez (1992) a exposé les coûts de reforestation, tandis que Calva (1992) mentionnait les coûts de défonçage mécanisé du tepetate. Navarro et Zebrowski (1994) firent une première synthèse comparée, en Équateur et au Mexique, des coûts de réhabilitation de ces terres. Il s'agissait dans le cadre de l'actuel contrat d'actualiser et de compléter les données.

Cette étude a été réalisée par Zebrowski et Sánchez (1996) au moyen d'enquêtes supplémentaires réalisées en Équateur et au Mexique auprès de paysans et d'organismes pratiquant la réhabilitation des sols volcaniques indurés (MATET au Mexique, CESA en Équateur), ainsi que par des mesures personnelles.

### 3. RESULTATS ET INTERPRETATION.

#### 3.1 ANALYSE DES SYSTEMES ÉCONOMIQUES FAMILIAUX.

##### 3.1.1. Au Mexique.

##### 3.1.1.1. Typologie.

Navarro et al. (1994, 1996) et Lepigeon (1994) ont montré qu'il existe dans la région de Tlaxcala, trois groupes de systèmes définis par la surface des Unités de Production agricole (UP) et les cultures pratiquées :

Groupe 1 : UP de petite taille (inférieures à 6 ha) pratiquant des cultures de subsistance (essentiellement maïs).

Groupe 2 : UP de taille moyenne (généralement de 6 à 11 ha), pratiquant des cultures de subsistance et quelques cultures commerciales.

Groupe 3 : UP de grande taille (plus de 11 ha), pratiquant des cultures commerciales tout en conservant une petite partie de leur surface cultivée en maïs (2 à 4 ha).

Les cultures commerciales étaient essentiellement le blé et l'orge jusqu'en 1993 puis le blé seul à partir de 1994. Ce dernier ainsi que le maïs sont en effet à partir de cette date subventionnés par une aide de l'État (PROCAMPO) alors que l'orge ne l'est pas.

Les moyens de production sont toujours faibles dans le groupe 1 (araire), moyens dans le groupe 2 (tracteur souvent présent), importants dans le groupe 3 (tracteur toujours présent, parfois moissonneuse-batteuse).

Le tepetate est présent dans les U.P. et mis en valeur indépendamment du groupe d'U.P.

Cette classification des U.P. en fonction de leur taille et des cultures pratiquées n'est pas générale (Tab. 1). Les études effectuées par Ly (1993), Faugère (1995) et Alexandre (1996) ont montré que d'autres critères peuvent être retenus mais quelque soit la hiérarchie des critères retenus, les exploitations peuvent toujours être regroupées d'une part en petites exploitations tournées vers l'autoconsommation et d'autre part en exploitations, petites ou grandes, qui se sont spécialisées vers des spéculations rentables telles que élevage ou cultures commerciales.

Tableau 1. Les types d'exploitations dans les communautés étudiées.

Sta Catarina (Mex) (Ly, 1993)	Tlalpan (Tlax) (Lepigeon, 1994)	Las Cruces (Jalisco) (Faugère, 1995)	Pedregal (Michoacan) (Alexandre, 1996)
Petites exploitations non spécialisées			
Agriculteurs non spécialisés S<0,5 ha 90% *	Petits agriculteurs (maïs) S<5 ha 62% *	Paysans sans terres (maïs) S=0,5-2 ha 20% *	Petits agriculteurs (polyculture) S<0,5 ha 45% *
Agriculteurs + qq Ax  S=1-2 ha 5% *	Producteurs (maïs+blé et orge) S=4-9 ha 21% *	Polyculture en culture attelée S=1,5-4 ha 35% *	Polyculture+un peu élevage (Medieros) S=1,5-2 ha 35% *
Exploitations spécialisées			
Horticulteurs  S<0,5 ha 5% *	Producteurs mécanisés S=8-15 17% *	Polyculture-élevage (louent tracteur) S=2,5-9 ha 35% *	Arboriculteurs  S=1,7-1,9 ha 10% *
		Polyculture-élevage (possèdent tracteur) S=6-11 ha 10% *	Engraisseurs et négociants  S=2,8-3,5 ha 10% *

\* Importance en % du type d'agriculteur dans la zone étudiée. Les surfaces indiquées sont des surfaces cultivées par actif dans l'UP. Source : Prat et al. (1996).

Les petites exploitations non spécialisées dans lesquelles domine la culture d'autoconsommation sont largement dominantes : 95% des UP de la communauté de Sta Catarina, 83% de celles de Tlalpan, 55% de celles de Las Cruces et 80% de celles de Pedregal.

Toutes les UP possèdent des revenus extérieurs à l'agriculture. Ces revenus indispensables pour la survie des UP sont particulièrement élevés dans le cas des UP de petite taille (Tableau 2).

Tableau 2. Revenu annuel extérieur à l'activité agricole (*in* Navarro et al., 1994).

Caractéristiques des UP	Revenu extérieur (en milliers de pesos)	
	médiane	extrêmes
Autoconsommation (S<5 ha)	14.85	3.8 - 29,7
Autoconsommation et vente (S= 5-11 ha)	7.1	2.16 - 15.6
Vente de la production S>11 ha	9.1	3.9 - 13

### 3.1.1.2. *Le tepetate : une ressource souvent mal utilisée.*

En dehors du cas signalé par Ly (1993) où la communauté étudiée se situe près de la ville et dans laquelle le tepetate est récupéré dans un but essentiellement spéculatif (réserve foncière), les tepetates sont mis en culture afin d'étendre la frontière agricole et de disposer de plus de terres pour les enfants des agriculteurs. La mise en culture du tepetate est surtout pratiquée dans l'État de Tlaxcala où la présence de MATET (Maquinarias para las Tierras del Estado de Tlaxcala), organisme officiel chargé de la réhabilitation des terres érodées, facilite pour le paysan, la récupération agricole de ces sols.

Navarro et al. (1994) ont comparé lors de suivis agricoles dans les communautés de Tlalpan et de Hueyotlipan les itinéraires techniques et la production de maïs, de blé et d'orge sur sol agricole et sur tepetate.

Les paysans cultivent le tepetate sans tenir compte de ses caractéristiques propres. Les itinéraires techniques, en dehors de semis plus tardifs sur tepetate car il retient moins l'eau que le sol agricole (ce qui peut être un avantage dans le cas des années très pluvieuses), sont identiques sur sol agricole et sur tepetate. Fumure organique et engrais azoté et phosphaté ne sont en particulier pas plus importants sur tepetate que sur sol.

### 3.1.1.3. *La productivité : identique sur tepetate et sol agricole après quelques années.*

Les paysans ne font pas de différence entre les rendements obtenus sur sol agricole et sur tepetate.

Tableau 3. Rendements en maïs (t/ha).

Caractéristiques des UP	Tlalpan		Las Cruces (Faugère, 1995)	Pedregal (Alexandre, 1996)
	(Lepigeon, 1993)	(Muñoz, 1996)*		
G1 = petite exploitation	mini : 0.4 moy. : 1.2 maxi : 2	moy. : 0.54	moy. : 2.6 médiane : 3 extrêmes : 0.4 - 4 n= 21	moy. : 2 médiane : 1.9 extrêmes : 1.4 - 3 n= 25
G2 = moyenne exploitation	mini : 0.6 moy. : 1.7 maxi : 2.8	moy. : 0.72		
G3 = grande exploitation	mini : 0.7 moy. : 1.9 maxi : 2.8	moy. : 1.3		

\* Rendements faibles du fait d'une mauvaise année climatique (1995)

Les rendements en maïs obtenus lors des enquêtes effectuées à Tlalpan (Lepigeon, 1994), Las Cruces (Faugère, 1995) et Pedregal (Alexandre, 1996), sont assez variables (Tab. 3). Lepigeon (1993) et Muñoz (1996) notent qu'à Tlalpan les rendements sont légèrement plus élevés dans les UP mécanisées de grande taille (G3) que dans les petites exploitations (G2, G1).

Lors du suivi agronomique des parcelles de tepetate et de sol agricole, Navarro et al. (1994) ont montré que les rendements en maïs sont faibles sur tepetate de 1 et 2 ans de mise en culture puis s'élèvent dès la 3<sup>e</sup> année (ce qui a été confirmé lors des essais expérimentaux). Pour le blé et l'orge les rendements sont corrects dès la première année (Tab. 4).

Tableau 4. Rendements (t/ha) obtenus en parcelles paysannes (moyennes).

Cultures	Tepetate			Sol
	1 à 2 ans	3 à 6 ans	> 25 ans	
Maïs	0.8	1	1.4	1.4
Blé	2.5	2.5	2.3	2.4
Orge	2.5	1.5	3.4	2.5

En fait, Navarro et Zebrowski (1994) ont montré que la différence des rendements entre sols et tepetates est moins forte que la variabilité globale des rendements d'une année à l'autre, du fait des variations climatiques inter-annuelles (Figure 2).

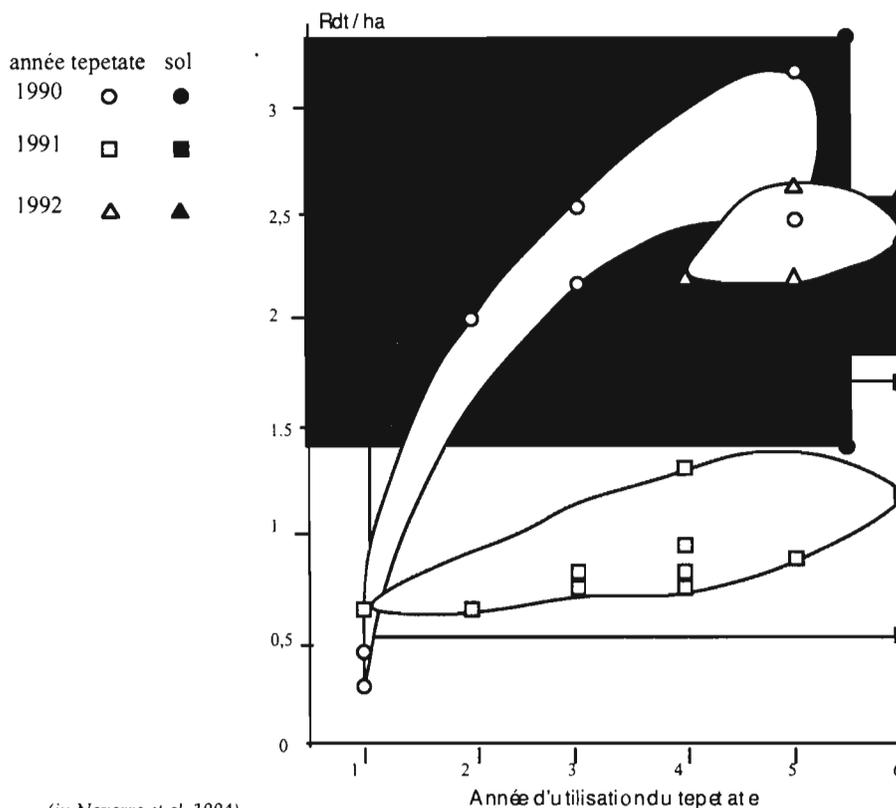


Figure 2. Rendements du maïs sur sol agricole et sur tepetate (différents âges de mise en culture).

#### 3.1.1.4. Les coûts de production.

Ils ont été calculés par Navarro et al. (1994) puis par Muñoz et Navarro (1996) pour le maïs et le blé sur sol agricole et sur tepetate en tenant compte de la nature des U.P. : U.P. de petite taille (G1), de taille moyenne (G2) et de grande taille (G3).

Pour une culture donnée il n'existe pas de différence entre coûts de production et taille de l'exploitation ainsi qu'entre coûts de production et nature du substrat (sol agricole et tepetate).

Navarro et al. notent que le coût de production du blé, calculé en 1992, est légèrement supérieur à celui du maïs (Tab. 5), alors que les calculs effectués en 1995 par Muñoz et Navarro montrent l'inverse (1 466 pesos/ha pour le maïs et 1 208 pesos/ha pour le blé). Mais cette différence n'est pas expliquée.

Tableau 5. Coûts de production par hectare du blé et du maïs.

	Coût total Pesos 1992	Coût (en % du coût total) de chaque façon culturale						Coût de la main d'oeuvre % du coût total
		Préparation du sol	Semis	Fertilisation	Traitements	Buttage	Récolte	
Maïs	683	23.1	14.4	25.5	7.8	9.8	19.4	37
Blé	756	20.3	32.8	26.3	5.5		15.1	14

Source : Navarro et al. (1994).

Les coûts des différentes façons culturales sont assez proches d'une culture à l'autre excepté pour le semis, plus élevé dans le cas du blé du fait des quantités de semences plus élevées pour le blé (100 à 200 kg/ha) que pour le maïs (15 à 30 kg/ha), le prix au kilogramme étant identique. Mais le coût de la main d'oeuvre étant plus élevé pour le maïs que pour le blé, le coût total de production est en fait sensiblement identique pour ces deux cultures.

La fertilisation représentant une part importante du coût total de production (plus du quart), celle-ci devrait être appliquée de façon rationnelle, ce qui est loin d'être le cas.

### 3.1.1.5. La rentabilité.

Les calculs de rentabilité effectués par culture (Navarro et al., 1994), en incluant les coûts de production, la rente de la terre ainsi que les intérêts du capital anticipé, mais sans inclure le coût de récupération du tepetate, ont montré que :

- Pour que la culture du maïs soit rentable, il faut un rendement > 1,5 t/ha. Si ce rendement est couramment atteint (Tab. 3) par de nombreux paysans, en particulier ceux des U.P. de grande taille, il est souvent inférieur dans le cas d'année climatique mauvaise.

- Pour que la culture du blé et de l'orge soient rentables, il faut un rendement minimum de 1,8 t/ha qui est une valeur généralement atteinte et dépassée dans la plupart des UP, même dans le cas d'année sèche.

Grâce à ces cultures, pratiquées dans les U.P. de grande taille (>10 ha), les revenus par UP sont corrects, supérieurs au salaire minimum.

Ly (1993), Le Pigeon (1994), Faugère (1995) et Alexandre (1996) arrivent à des conclusions très semblables (Fig. 3).

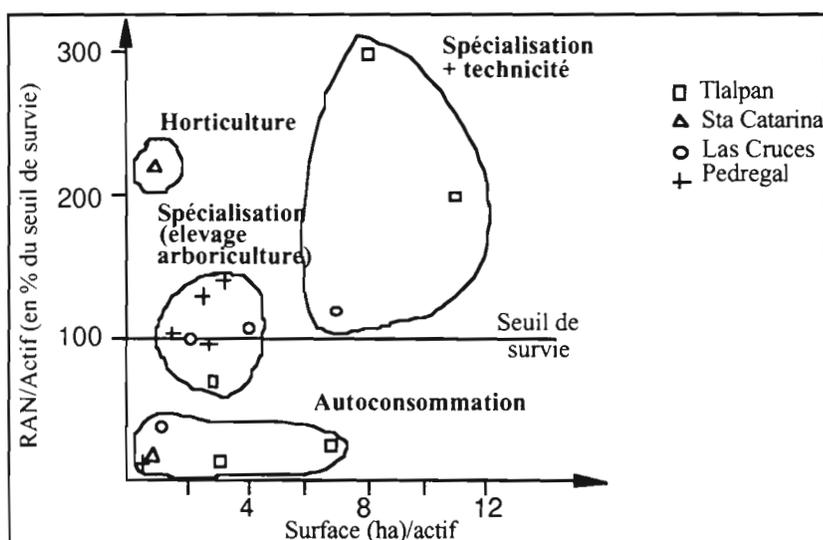


Figure 3. Revenu agricole net (les différents points de chaque ensemble correspondent aux médianes des résultats obtenus dans les enquêtes).

La synthèse des résultats obtenus par ces auteurs montrent que dans les exploitations de petite taille, dans lesquelles les cultures sont essentiellement d'autoconsommation, le revenu agricole net (RAN) par actif est nettement inférieur au seuil de survie. Ce revenu n'est voisin du seuil de survie que dans les exploitations pratiquant un élevage, complémentaire des cultures. Il est supérieur au seuil de survie (salaire minimum de un ouvrier) pour les exploitations spécialisées, souvent technicisées, dans lesquelles les cultures de rente sont pratiquées. C'est en particulier le cas dans la région voisine de Mexico où les horticulteurs vivent sur de très faibles surfaces sans nécessité d'activité secondaire non agricole.

### 3.1.2. En Équateur.

#### 3.1.2.1. Enquête générale.

L'enquête générale effectuée sur l'ensemble des régions où la cangahua est présente (Fig. 8, Chap 1) a porté sur 799 U.P. Les résultats ont été présentés (Zebrowski et Vicuña, 1996), globalement pour la région située au nord de Quito (provinces du Carchi, d'Imbabura et du Pichincha), par provinces, lorsque celles-ci présentent une différence, pour la région située au sud de Quito (provinces du Cotopaxi, du Tungurahua et du Chimborazo). Les résultats sont présentés suivant les différents thèmes enquêtés (structure familiale, tenure et origine des terres, superficie et composition des U.P., cultures pratiquées, façons culturales, rendements).

#### A. Structure familiale.

Les familles enquêtées présentent de 1 à 15 membres avec une moyenne, relativement constante, comprise entre 4,7 et 5,7 membres par famille. Le niveau d'instruction (Tab. 6) des parents est peu élevé, surtout dans le milieu indigène pour lesquels plus de la moitié des pères de famille et près de 70% des mères de famille n'ont reçu aucune instruction scolaire.

Tableau 6. Niveau d'instruction (en %).

Niveau instruc.	Parents				Enfants					
	Père		Mère		6-12		12-20		> 20 ans	
	I	M	I	M	I	M	I	M	I	M
N	52.7	28.6	69.6	45.3	18	1.5	5.9	2.3	16.9	3
P	45.2	63.3	29.6	51.7	82	98.5	81.2	68.5	61.9	59.4
S	2.1	5.4	0.8	4.1	-	-	12.9	29.2	18.7	30.3
U	0	2.7	0	0.7	-	-	-	-	2.5	7.3

N=aucune, P=primaire, S=secondaire, U=université ; I=indigènes, M=métis

Par contre, la majorité des enfants est actuellement scolarisée ; certains d'entre eux poursuivent des études secondaires voire universitaires.

#### B. Origine des terres.

La quasi totalité des paysans sont propriétaires de leurs terres (93,2% des UP totales). La location de terre et le métayage ("al partir") sont assez peu répandus (< à 4%). Quelques paysans ne possèdent pas de terre. Un fort pourcentage d'exploitations ne sont formées que de terres héritées (héritages postérieurs à la réforme agraire de 1973) : 46,7 à 68,3% suivant les régions (Tab. 7).

Tableau 7. Origine des terres (en % des UP totales).

	Héritage	Héritage et achat	Achat (une fois)	Achat (plusieurs fois)
Nord	38.0	8.7	43.7	9.6
Cotopaxi	43.5	14.8	40.6	1.1
Tungurahua	33.5	11.6	54.7	0.2
Chimborazo	55.9	12.4	28.8	2.9

L'achat des terres est un phénomène important. Si la majorité des paysans ont acheté leurs terres en une seule fois, une part importante ont agrandi leur exploitation par des achats postérieurs. Il semblerait donc que les agriculteurs aient tendance à augmenter la taille de leurs exploitations plutôt qu'à les vendre. Sur l'ensemble de la zone enquêtée seuls 5,5% des chefs de famille seraient disposés à vendre leurs exploitations.

Ce serait avant tout l'abandon d'exploitations trop petites pour une migration définitive qui expliquerait l'importance des transactions de terre de la dernière décennie (Tab. 8).

Tableau 8. Date d'achat (en % des achats totaux).

	< 1954	54-63	64-73	74-83	84-95
Nord	2.0	12.0	21.0	38.0	53.0
Cotopaxi	10.0	16.7	3.3	36.7	33.3
Tungurahua	7.9	9.2	19.7	30.3	32.9
Chimborazo	9.2	9.2	26.3	26.4	28.9

### C. Superficies et nature des terres.

Les superficies des UP sont faibles puisque plus de 75% des UP ont une surface inférieure à 3 ha et plus de la moitié inférieure à 1 ha (Tab. 9).

Tableau 9. Superficies des U.P. (en %).

	<1	1-2,99	3-5	5,01-10	10,01-50	>50	S. moyenne
	----- ha -----						
Nord	50.6	26.1	8.4	6.8	7.5	0.6	3.91
Cotopaxi	54.5	32.3	7.1	5.1	1.0	0.0	1.42
Tungurahua	62.7	23.9	10.4	0.7	1.6	0.7	2.15
Chimborazo	63.5	31.9	4.2	0.7	0.0	0.0	0.90

### D. La cangahua dans les UP.

La proportion de cangahua dans la composition des terres des U.P. est importante. Près de 60% des UP de la région Nord présentent de la cangahua. Mais cette proportion est beaucoup plus élevée dans les trois provinces de Cotopaxi, Tungurahua et Chimborazo (74,8 à près de 90%) dans lesquelles la surface des UP est plus faible. Il est donc tout naturel que ce soit surtout dans ces provinces que les paysans aient mis en culture la cangahua : 93 à 96,5% des paysans ayant de la cangahua l'ont mise en culture, en partie ou en totalité (Tab. 10).

Tableau 10. Nature des terres.

	Superficies (en % de la superficie totale)				% des UP avec cangahua	% de UP avec cangahua cultivée
	SA	CR	CN	CN + CR		
Nord	64.9	21.7	13.5	35.2	59.0	72.0
Cotopaxi	23.5	71.2	5.3	76.5	89.9	95.5
Tungurahua	65.5	26.4	8.1	34.5	74.8	93.0
Chimborazo	41.8	48.4	9.8	58.2	79.0	96.5

SA=sol agricole, CR=cangahua cultivée, CN=cangahua non cultivée.

La récupération de la cangahua est donc un phénomène courant et représente une nécessité pour les paysans afin d'augmenter leur superficie agricole utile.

Rares sont les agriculteurs qui défoncent la cangahua au moyen d'un sous-solage avec bulldozer. Le défonçage de la cangahua est en effet réalisé de façon manuelle chez le paysan de faibles ressources économiques. La cangahua est cassée au pic, généralement durant la saison des pluies car elle présente alors une résistance moindre.

Sur la surface ainsi retournée, la majorité des paysans (52,6 à 91,6% ) étende dans la mesure de leurs moyens, de faibles quantités de fumier provenant de leur bétail et le laissent se décomposer quelques mois avant de semer.

## E. Les moyens de production.

### E1. Matériel dans les Unités de production.

En dehors de quelques UP de grande taille, le matériel agricole, autre que rudimentaire, est peu fréquent. Si 12,5% des UP du Tungurahua possèdent un tracteur, cette proportion est plus faible dans les UP des autres provinces (2 à 7,6%). La présence d'araire est plus fréquente : 17,8 à 58,1% (dans le Tungurahua) des UP en possèdent (Tableau 11).

### E2. Animaux.

La présence d'animaux dans les exploitations est générale, même dans celles de faible surface. La proportion des UP possédant des bovins est élevée ; bien qu'ils soient surtout présents dans les exploitations de taille supérieure à 3 ha (plus de 70% des UP en possèdent), ils sont également présents dans les UP de très petite taille, où l'on "élève les vaches sans pâturage" le long des chemins.

Tableau 11. Matériel dans les U.P. (en % des UP totales).

	Araire	Tracteur
Nord	17.8	2
Cotopaxi	17.1	7.6
Tungurahua	58.1	12.5
Chimborazo	47.7	4.5
Bolivar	41	4.1
Cangahua	13	0

Alors que les porcins et ovins (viande et laine) peuvent être vendus lors de besoins financiers, les animaux de basse-cour et le lait sont généralement auto consommés. Les petits agriculteurs, comme le souligne Gasselín (1995), "cherchent d'abord à maximiser leur sécurité alimentaire avant de raisonner en terme de revenu".

## F. Les cultures.

La culture de loin la plus fréquente dans les UP est le maïs (Tab. 12), ce qui est tout à fait normal puisque les enquêtes ont eu lieu dans "l'étage du maïs". Dans cet étage le haricot est surtout cultivé dans la région nord (en particulier dans les provinces du Carchi et de l'Imbabura), les céréales telles que le blé et surtout l'orge dans la province du Chimborazo, et la pomme de terre dans la province du Tungurahua.

Tableau 12. Cultures et préparation du sol.

	Maïs	Haricot	Pomme de t.	Orge	Blé	Fève	Petit pois
Importance des cultures dans les UP (en %)							
Nord	76.3	39.9	21	14.4	10.2	-	10.5
Tungurahua	66.3	8.3	44.2	23.2	7.4	8.3	8.3
Chimborazo	72.3	11.8	24.7	43.8	21.3	16.9	14
Emploi du tracteur pour la préparation du sol (en %)							
Nord	39.2	62.8	34.5	68.8	71.4	-	42.9
Cotopaxi	62.5	-	59	42.8	-	-	-
Tungurahua	26.9	0	37.5	35.9	41.7	21.4	0.8
Chimborazo	32.1	61.9	18.2	23	23.7	20	36

## G. Façons culturales.

La préparation du sol bien que principalement manuelle, est, en dépit du nombre peu élevé de tracteurs et d'araires dans les U.P., réalisée de façon fréquente au moyen de ces instruments qui sont loués pour cette façon culturale. Les divers traitements et les récoltes sont réalisées manuellement.

L'incorporation du fumier est très répandue : 74 à 92%, selon les cultures, de la totalité des agriculteurs la réalise (Tab. 13), mais souvent à des doses faibles à très faibles. L'emploi de fertilisants et de traitements chimiques (herbicides, fongicides) est beaucoup moins fréquent sauf pour la pomme de terre (58% des agriculteurs la fertilisent, 50% emploient des fongicides).

Les apports de fumier et la fertilisation des cultures sur cangahua, en dépit de la pauvreté de ce matériau en azote et phosphore, ne sont pas plus élevés que sur sol agricole normal.

Tableau 13. Utilisation de fumier et de fongicides (en %).

	Maïs			Haricot			Pomme de t.			Orge			Blé			Fève			Petit pois		
	MO	Fe	Fo	MO	Fe	Fo	MO	Fe	Fo	MO	Fe	Fo	MO	Fe	Fo	MO	Fe	Fo	MO	Fe	Fo
Nord	88	28	23	71	42	35	90	57	57	75	25	50	56	56	29	-	-	-	80	34	37
Cotopaxi	83	50	17	-	-	-	73	64	36	86	28	14	50	0	0	50	0	0	-	-	-
Tungura.	94	48	39	99	43	14	93	63	57	95	51	46	83	67	50	93	64	57	93	43	43
Chimbo.	99	20	12	99	43	28	98	48	34	96	20	23	99	26	24	93	23	13	100	28	28
Total	92	31	23	74	42	32	91	58	50	90	27	32	79	50	29	91	35	26	89	34	35

MO=fumier, Fe=fertilisant, Fo=fongicide

L'irrigation est relativement fréquente ; elle est pratiquée, par gravité, dans 49% des UP. Mais elle ne concerne que 28% des UP de la province du Chimborazo.

L'érosion est un phénomène courant : 65% des agriculteurs la remarquent, mais ne prennent aucune mesure pour la limiter.

#### H. Les rendements.

Un essai d'évaluation des rendements a été réalisé, sans succès, au cours des enquêtes du fait de la difficulté d'obtenir des résultats fiables, due en partie au fait que les agriculteurs ignorent les rendements ou les expriment de façons différentes, rarement en quintaux, souvent en "bultos" ou "cargas" de taille et poids différents d'un agriculteur à l'autre. Les résultats présentés dans le tableau 14 pour chacune des provinces proviennent des statistiques de l'INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos) de 1993. Ils sont assez proches de ceux obtenus dans les enquêtes détaillées réalisées par Coudray et Legeait (1995), pour Bolivar et par Gasselin (1995), pour Cangahua.

Tableau 14. Rendements (t/ha).

	Maïs doux (sec, grain)	Haricot (sec, grain)	Pomme de terre	Orge	Blé	Fève (sec, grain)	Petit pois (sec, grain)
Carchi	1.06	0.62	11.78	1.10	1.84	0.63	0.44
Imbabura	0.70	0.78	2.80	0.79	0.66	0.36	0.28
Pichincha	0.43	0.81	9.97	0.73	1.02	0.61	0.21
Cotopaxi	0.35	0.26	6.86	0.50	0.44	0.34	0.35
Tungurahua	1.07	0.71	8.50	0.58	0.61	0.53	0.39
Chimborazo	0.37	0.56	4.95	0.82	0.40	0.26	0.17
Bolivar	0.99	0.85	10.60	1.10	1.30	-	0.78
Cangahua	0.22-0.6	0.1-0.6	4-9.5	0.3-1.4	0.3-0.65	0.3-0.85	-

Source : INEC 1993, pour les provinces ; Coudray et Legeait 1995, pour Bolivar ; Gasselin 1995, pour Cangahua.

Les rendements sont généralement faibles à très faibles. Ce qui s'explique par une série de contraintes depuis la préparation du sol jusqu'à la récolte en passant par des semences non adaptées, une fertilisation et des traitements déficients, etc..

Aucun résultat fiable n'a pu être établi en ce qui concerne les différences possibles de rendements entre les cultures sur sol agricole et sur cangahua. Mais de nombreux paysans ont certifié que les rendements étaient identiques dans des conditions climatiques et de traitements égales. Néanmoins ces rendements sont généralement plus faibles que ceux mentionnés pour l'ensemble de la province. Les sols à cangahua se trouvent en effet dans des régions sèches où, en l'absence d'irrigation, les rendements sont faibles du fait du déficit hydrique. Ainsi, dans la

région de Cangahua, la fourchette des rendements des céréales (maïs, blé) et du haricot, cultivés à moins de 3 200 m d'altitude, est plus faible que les rendements moyens de la province du Pichincha.

### 3.1.2.2. Les enquêtes détaillées.

#### A. Enquêtes détaillées de la région de Bolivar (Coudray et Legeait , 1995).

L'étude réalisée par Coudray et Legeait (1995), a permis de classer les 73 UP étudiées dans la région de Bolivar en quatre types selon la destination de la production :

- Type 1 : (14 UP étudiées)
  - représentatives de 25% de la zone d'étude.
  - UP paysannes dans lesquelles la production est auto consommée.
- Type 2 : (37 UP)
  - représentatives de 54% de la zone d'étude.
  - UP paysannes dans lesquelles une partie de la production est auto consommée et une partie vendue.
- Type 3 : (15 UP)
  - représentatives de 17% de la zone d'étude.
  - UP paysannes dans lesquelles la production est vendue.
- Type 4 : (7 UP)
  - représentatives de 5% de la zone d'étude.
  - UP patronale dans lesquelles la production est vendue.

#### A1. Superficies.

Si l'éventail des résultats est large, de moins de 1 à 37 ha. Les surfaces inférieures à 1 ha caractérisent les exploitations de type 1. Dans la région de Bolivar celles-ci sont deux fois moins fréquentes que dans le cas général (24,7% / 50,6%).

Tableau 15. Surfaces des UP.

Dans l'ensemble de la zone	<1	1 - 2,99	3 - 5	5,01 - 10	11 - 37
	----- ha -----				
Nb d'UP	18	18	10	16	11
en % du total	24.7	24.7	13.7	21.9	15.1

Par type d'UP	1	2	3	4
Surface moyenne	1.0	6.4	1.9	20.6
médiane	1.0	6.0	1.0	18.5
extrêmes	0.01 - 2.5	0 - 27	0 - 6.5	4 - 37

#### A2. Les moyens de production.

Quelque soit leur type les UP possèdent rarement un tracteur, la préparation du sol est néanmoins réalisée de façon quasi générale au tracteur (location) pour les U.P. du type 2 à 4.

Tableau 16. Moyens de production et préparation du sol.

Type d'UP	1	2	3	4
Tracteurs ds UP	0/14	3/37	0/15	0/4
Araire	3	20	4	3
Animaux de traction	0	17	2	3
Préparation du sol				
Tracteur	7	31	14	4
Yunta	3	6	1	0
Manuelle	4	0	0	0

### A3. Les cultures.

Le maïs reste une culture très importante (il est cultivé, parfois associé avec le haricot, par tous les agriculteurs du type 1). La zone de Bolivar est caractérisée cependant par l'importance des cultures de vente telles que pois, haricot, oignon. La proximité de la route nationale, avec exportation sur la Colombie, le dynamisme de certains agriculteurs expliquent ce fait.

Les cultures de vente ainsi que la pomme de terre sont fertilisées et traitées phytosanitairement quel que soit le type d'UP. Les céréales sont l'objet de moins de soins.

Il n'existe pas de différence de comportement entre les types d'UP sauf peut être en ce qui concerne la fumure du maïs : les agriculteurs du type 1 sont moins nombreux que ceux des autres types à apporter des engrais. Ils apportent surtout de la matière organique, mais à doses toujours très faibles.

Tableau 17. Cultures dans les UP.

UP réalisant		Fertilisation (% des UP)				Trait	Destination Product.			Rendements (t/ha)					
cette	culture (%)	MO seule	Engr. seuls	M.O. + F	sans fertil	phyt	A	AV	V	moy	médi	extrêmes	Prov	Natio	
Pois	75.3	3.6	56.4	38.2	1.8	100	6.1	6.1	87.8	vert sec	3.2 0.87	3 0.78	1.8-4.6 0.28-2.1	1.82 0.44	1.09 0.23
Haricot	69.9	5.9	58.8	35.3	0	94	9.8	7.8	82.4	vert sec	3.1 0.85	4 0.78	0.55-4.6 0.3-1.84	1.78 0.62	1.51 0.53
Maïs	72.6	49.1	17	13.2	20.8	22.6	65.9	27.3	6.8		0.99	0.69	0.09-3.2	1.56	0.85
Blé	43.8	7.4	11.1	40.7	40.7	70.4	40.7	44.6	14.8		1.3	1.3	0.46-2.8	1.84	0.67
Orge	19.2	22.2	33.3	33.3	11.1	77.8	22.2	22.2	55.6		1.1	0.92	0.46-2.1	1.10	0.70
P de T	38.4	14.3	39.3	46.4	0	96.4	25	25	42.9		10.6	9.2	1.8-23	11.78	7.49
Oignon	30.1	0	68.2	31.8	0	95.5	0	0	100		8.9	7.8	2.3-20.7	4.95	5.39
Carotte	8.2	33.3	50	16.7	0	83.3	16.7	16.7	83.3		17.7			9.39	7.55

Tableau 18. Fumure du maïs par types d'UP.

Type de fumure	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
MO seule	9/14	11/24	1/1	0/3
engrais seul	0	6	0	1
MO + engrais	1	4	0	1
sans fertilisation	4	3	0	1

Pour chaque culture la fourchette des rendements est très large : la difficulté d'obtenir des valeurs fiables peuvent expliquer en partie ce fait. Les rendements moyens calculés sont assez proches de ceux de la province du Carchi qui sont eux mêmes généralement plus élevés que les rendements nationaux (Tab. 17).

Les revenus moyens sont très faibles pour les paysans du type 1, faibles pour ceux des types 2 et 3, plus élevés pour ceux du type 4 (Tab. 19).

Tab. 19. Revenus par type d'U.P. (millions de sucres/an) et pourcentage de main d'œuvre familiale.

Type d'UP		1	2	3	4
Revenus (RA/Tf)	moyens	1.40	4.38	3.51	10.4 et 11.7
	médiane	1.13	3.71	2.57	
	extrêmes	- 0.49 à 5.24	-0.69 à 14.7	0.27 à 13.2	
Main d'oeuv. fam	dans l'UP (%)	92.8	71.5	56	5.3

### B. L'enquête détaillée dans la région de Cangahua (Pichincha) (Gasselin, 1995).

L'étude a été réalisée dans 8 communautés comportant 384 exploitations agricoles s'étageant du climat tempéré (2 600 à 3 200 m) au climat froid (3 200 à 3 800 m).

Les superficies des UP sont très faibles : plus de 67% ont une surface cultivable inférieure à 1 ha ; 1,8% ont une surface cultivable supérieure à 5 ha.

Les moyens de production sont manuels ; aucune des exploitations ne possède de tracteur et des outils aratoires associés. Il n'y a jamais recours à une main d'oeuvre salariée. La préparation du sol est surtout manuelle ; mais 23% des agriculteurs louent un tracteur pour les labours. L'emploi d'engrais chimiques est très rare, sauf pour la culture de la pomme de terre.

Les cultures sont toutes vivrières : maïs, blé et orge dans l'étage tempéré ; pomme de terre, orge et fève dans l'étage froid. Les rendements sont très faibles (Tab. 14) : 0,2 à 0,6 t/ha de maïs ; 0,3 à 0,65 t/ha de blé.

La cangahua affleurante est située dans l'étage tempéré dans lequel 65% des UP possédant de la cangahua l'ont récupérée.

Les systèmes de production, subdivisés selon présence ou non de cangahua, la taille de l'exploitation, le pourcentage du capital d'installation et la motorisation du travail du sol, sont en fait tous des systèmes d'autoconsommation. A quelques rares exceptions près les U.P. sont en dessous du seuil de survie et donc ont toutes, un revenu agricole inférieur au seuil de reproduction ; d'où la nécessité d'une double activité : 92% des exploitations ont au moins un de leur membre travaillant à l'extérieur.

### 3.1.2.3. Conclusion

Dans les zones où la cangahua est présente à faible profondeur le milieu rural est caractérisé par :

- un minifundio typique : 82,3% de l'ensemble des U.P. enquêtées ont en effet moins de 3 ha ; 55% moins de 1 ha.
- un degré d'instruction des agriculteurs faible, surtout dans le milieu indigène, mais leurs enfants ont un niveau d'instruction supérieur.
- des moyens de production quasi inexistants (en dépit de la présence de l'irrigation dans 49% des exploitations) excepté dans quelques rares U.P. de grande taille.
- une faible productivité agricole due, entre autres, à de mauvaises pratiques culturales.

Dans ces conditions la production est destinée principalement à l'autoconsommation, mais encore plus qu'au Mexique le paysan doit faire appel à des revenus extérieurs pour vivre. D'après les enquêtes 60% des agriculteurs ont une double activité, mais d'après Gasselin celle-ci concerne 92% des agriculteurs de la région de Cangahua. La double activité est caractéristique des agriculteurs ayant moins d'un hectare. Pour ces agriculteurs plus de 65% des revenus totaux familiaux seraient, d'après le rapport MAG-ORSTOM (1982), de source extérieure à l'U.P. A quelques rares exceptions près le seuil de reproductivité économique (de 3,98 millions de sucres soit environ 1 675US\$ d'après Gasselin) ne serait en effet pas atteint dans de telles exploitations, ce qui explique la migration temporaire et parfois même définitive des paysans.

Néanmoins, certains agriculteurs, parmi les plus jeunes et les plus dynamiques, se tournent vers une production destinée à la vente, faisant d'ailleurs appel à des intrants largement utilisés et à une main d'oeuvre non familiale, et atteignent le seuil de reproductivité sur des surfaces parfois inférieures à un hectare, surtout si la spécialisation est orientée vers l'élevage comme l'ont observé Coudray et Legeait à Bolivar. Ce phénomène est fréquent dans cette région grâce à la proximité de la panaméricaine et du marché colombien. Il existe également dans la province du Tungurahua du fait de la spécialisation de certaines UP dans la production fruitière, mais est très rare dans la province du Chimborazo.

La mise en culture des zones érodées à cangahua est donc, dans ces régions de minifundio, primordiale afin d'augmenter la surface agricole utile. Des 69% de la totalité des U.P. enquêtées qui présentent de la cangahua, 86,8% d'entre elles l'ont en effet récupérée, essentiellement manuellement faute de connaissances et surtout de moyens économiques pour effectuer une mise en culture correcte comportant un sous-solage profond.

### 3.2. COUT DE LA REHABILITATION.

Zebrowski et Sánchez (1996) ont inventorié les méthodes de réhabilitation des sols volcaniques indurés au Mexique et en Équateur. Ensuite ils ont comparé dans ces deux pays les coûts des travaux relatifs au défonçage et à la réalisation d'ouvrages de conservation des sols réalisés de façon manuelle ou mécanisée.

#### 3.2.1. Méthodes de réhabilitation des sols volcaniques indurés.

##### 3.2.1.1. *Mise en culture.*

###### *A. Le défonçage des horizons indurés.*

Le défonçage réalisé expérimentalement au moyen d'explosifs n'est actuellement plus utilisé. Il est en effet délicat d'emploi et onéreux. Seules, sont réalisées, les méthodes manuelles et mécanisées .

###### A1. Méthodes manuelles.

Pratiquement abandonnées au Mexique, elles sont encore utilisées de façon générale en Équateur par les paysans ayant de faibles ressources économiques. Le défonçage est pratiqué durant la saison des pluies, période au cours de laquelle la cangahua, humide, est plus facile à travailler. Celle ci est cassée à l'aide du pic sur une profondeur de 20 à 30 cm. Le paysan laisse ensuite les blocs de cangahua se désagréger quelques mois, ajoute généralement de faibles quantités de fumier provenant de son bétail et le mélange au sol en rompant les blocs de cangahua résultant du défonçage avant d'effectuer le semis. La préparation du sol reste généralement grossière et peu propice à une bonne levée des plantes.

###### A2. Méthodes mécanisées

Elles sont d'usage commun au Mexique mais ne sont réalisées en Équateur que par quelques agriculteurs. Elles ont été néanmoins pratiquées dans le cadre de quelques projets gouvernementaux de mise en culture de la cangahua dans la décennie 70 et sont de nouveau employées dans le cadre d'un projet réalisé par CESA (Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas) concernant la mise en culture de 600 ha de cangahua.

Le défonçage est réalisé par un sous solage croisé au moyen d'un bulldozer. La puissance du bulldozer doit être suffisante. Sánchez (1992) recommande une puissance équivalente à celle de caterpillars de type D4 à D8. Néanmoins le D4 est un peu faible pour des sols dont la dureté est élevée et ne peut travailler sur des pentes supérieures à 30%. Ainsi, au Mexique, MATET (Maquinaria para las Tierras del Estado de Tlaxcala) utilise surtout des D5 et des D7 et en Équateur les travaux actuellement en cours sont réalisés avec des bulldozers ayant une puissance minimum égale à celle du D6 ; la longueur des dents est de 80 cm ce qui conduit à une profondeur effectivement sous solée de 40 à 50 cm. Bien que ce soit plus facile de réaliser le sous solage à l'état humide, la fracturation des horizons indurés est plus complète à l'état sec. Les blocs résultant du sous solage sont pulvérisés par plusieurs passages avec des disques montés sur un tracteur.

###### *B. Mesures anti-érosives.*

Les méthodes de conservation utilisées consistent en terrasses, planes ou de formation progressive avec un ados ou un muret à l'aval. Elles sont différemment répandues en Équateur et au Mexique.

En Équateur, jusqu'à une époque récente les mesures anti-érosives étaient très peu pratiquées ni par les paysans, ni même dans les quelques programmes officiels de réhabilitation de la cangahua. Elles ont été promues durant la décennie des années 80 dans le cadre de quelques programmes de conservation, notamment PROMUSTA (Proyecto de Manejo y Uso Sostenible de Tierras Andinas) et PROCOSA (Proyecto de Conservación de suelos y Sistemas Agrosilvopastorales). Les terrasses sont généralement élaborées manuellement, les blocs de

cangahua, dégagés au cours de la réalisation de la terrasse, sont disposés sous forme de mur d'arrêt à l'aval (pirca). La terre s'y accumule progressivement.

Des essais de terrasses à formation progressive ont été réalisés par le Ministère de l'Agriculture, puis dans le cadre du projet ORSTOM-CEE de réhabilitation des sols volcaniques indurés. Cette technique s'avère intéressante (De Noni *et al.*, 1992, 1996) quant à la protection de la cangahua mise en culture. Elle est 5 fois moins onéreuse que la construction de terrasses planes. CESA emploie actuellement cette méthode dans son programme de réhabilitation des zones érodées.

Au Mexique, les terrasses sont planes ou en pente réduite et sont réalisées au moment du sous-solage. Il est coutume de les limiter par des ados de terre dressés avec la lame du bulldozer. Leur élaboration étant onéreuse, les terrasses ne sont généralement faites que dans le cadre de programmes où une institution officielle (tels MATET ou CLT, "Plan del Lago de Texcoco") est le maître d'oeuvre. Le paysan finançant intégralement le défonçage de sa parcelle de tepetate se contente d'effectuer un pulvérisage et d'édifier un ados de terre à son pied, comme unique moyen de protection contre l'érosion.

### *C. Amélioration des propriétés chimiques.*

#### C1. Création d'un stock de matière organique.

La désagrégation des agrégats entraîne avec le temps une compactation et donc une diminution de la porosité et de la rétention en eau créées par le sous-solage. Seule la stabilisation de la structure par apport de matière organique permettrait d'éviter ce problème. Mais l'apport de fortes doses de fumier est en général incompatible avec la réalité du monde paysan latino-américain. Le fumier, disponible en faible quantité, est cher et n'est apporté qu'à très faible dose. Au Mexique comme en Équateur, seuls les terrains situés près des lieux d'habitation en bénéficient. Par contre dans l'État de Tlaxcala (Mexique) quelques agriculteurs incorporent les pailles et en Équateur le compost de lombrics (appelé localement "humus de lombrics") est fréquemment utilisé dans certaines régions.

#### C2. Apport de fertilisants.

Les agriculteurs, tant en Équateur qu'au Mexique, ne tiennent pas compte des propriétés spécifiques de la cangahua ou du tepetate et fertilisent les cultures de la même façon que celles sur sol agricole. Les apports sont souvent suffisants, parfois même trop forts, au Mexique, presque toujours trop faibles, voire nuls en Équateur.

#### *3.2.1.2. La reforestation des sols volcaniques indurés et érodés.*

Tout comme la mise en culture, la reforestation implique un défonçage du matériau, une protection contre l'érosion et une fumure. Ces différentes opérations sont plus ou moins réalisées en Équateur et au Mexique.

En Équateur les essais de reforestation de la cangahua ont été réalisés par le ministère de l'agriculture au moyen d'Eucalyptus. Ceux-ci étaient plantés, sans engrais, dans des trous dont le volume (20x20x20 cm) n'était pas suffisant pour assurer une bonne croissance des arbres. Aucun ouvrage de protection contre l'érosion n'a été mis en place. Aucun chiffre concernant les surfaces boisées n'est disponible. Certains techniciens du MAG ont avancé le nombre de 500 ha de cangahua reboisée, ce qui paraît peu ; De Noni *et al.* (1992) estiment un total de 1 500 ha.

Au Mexique, il n'existe pas non plus d'inventaire complet concernant la reforestation des zones à tepetate. Mais celle-ci a mis en oeuvre des techniques variées de conservation et de nombreuses espèces ont été plantées : pin, eucalyptus, cyprès, frênes, etc. La reforestation a été particulièrement efficace dans certaines zones critiques telle la Vallée de Mexico dans laquelle les 5 000 ha reboisés par le "Proyecto Lago de Texcoco" ont permis de réduire de façon presque totale l'érosion (Llerena et Sánchez, 1992).

Aucun apport d'engrais n'est effectué mais la réalisation de mesures anti-érosives est générale. Ces dernières consistent en replats dans la pente, tranchées, terrasses.

Actuellement Sánchez recommande l'élaboration de tranchées sur des pentes supérieures à 15% ou un sous-solage avec terrasses sur des pentes inférieures à 15%.

#### A. Les tranchées.

Elles sont réalisées à la main et doivent être de 40 cm de large sur 40 cm de profondeur. La terre évidée est disposée en talus à l'aval de la tranchée sur lesquels sont plantés les jeunes arbres. Mais il est préférable de remettre la terre dans la tranchée et d'y planter les arbres.

Deux types de tranchée sont effectués :

- "Zanjas trincheras" : tranchées de 5 à 7 m de long séparées par des bourrelets de terre non travaillée de 10 cm de large.

- "Tinas ciegas" : tranchées de 5 m de long disposées en quinconce. L'espace entre deux tranchées est de 5 m, l'écartement entre deux files de tranchées est de 8 à 10 m. On plante 4 arbres par tranchée soit une densité de 400 plants à l'hectare.

#### B. Sous-solage et terrasses.

De réalisation plus onéreuse que les tranchées, cette technique est néanmoins plus efficace pour la reprise des arbres. Bien que la reforestation puisse être effectuée après le sous solage sans élaboration de terrasses (on plante alors les arbres dans les raies du sous-solage), la protection contre l'érosion est plus efficace si l'on fait des terrasses. Celles-ci, réalisées conjointement au sous-solage, doivent avoir une largeur maximum de 4 m. Il est recommandé de séparer trois terrasses d'absorption (terrasses planes) par une terrasse à contre pente qui sert de canal d'évacuation des eaux. Les arbres sont plantés sur les terrasses d'absorption mais également sur les terrasses canal, à raison de 1 000 arbres par hectare.

### 3.2.2. Coûts des travaux.

Les coûts ont été établis à partir de publication ou d'enquêtes effectuées auprès de particuliers ou d'organismes ayant effectué des travaux de réhabilitation des sols indurés et de mesures réalisées au cours des études effectuées dans le cadre des deux contrats U.E. Les coûts unitaires des travaux (Tab. 20) sont assez semblables selon les auteurs en Équateur comme au Mexique, mais les temps nécessaires aux travaux sont variables selon les sources.

Tableau 20. Coûts unitaires (en US \$) en 1996.

Pays	Manoeuvre/jour	Coût horaire du bulldozer	
		D5	D7
Mexique	3	30	
Équateur	3	60	55

#### 3.2.2.1. Cas de la mise en culture.

##### A. Défonçage.

Le temps nécessaire pour sous-soler un hectare dépend évidemment de la dureté de l'horizon, de la pente, de l'état de la surface de la zone (présence de buttes témoins, dénivelées, etc.) et du type de bulldozer.

Sur des pentes inférieures à 20%, avec un D7, le temps nécessaire est estimé entre 5 et 10 heures par les différents auteurs. Mais ce temps peut s'élever à 30 h/ha dans des conditions difficiles (terrain irrégulier). Avec un D5 le temps serait, d'après MATET (enquête d'avril 96), deux fois plus élevé. Cet organisme mentionne en effet un temps de 5 à 6 heures avec un D7 et de 8 à 12 heures avec un D5.

Les coûts horaires étant de 30US\$ pour un D5 et de près de 60US\$ pour un D7 (55US\$ en Équateur), les coûts par hectare sont sensiblement identiques pour ces deux types de

bulldozer. C'est pourquoi tous les auteurs recommandent l'emploi du D7, voire du D8 (gain de temps et sous solage plus profond).

Dans les conditions moyennes optimales des travaux les coûts du sous-solage sont donc compris entre 350 et 550US\$/ha. Mais ils peuvent tripler dans des conditions difficiles.

Les coûts du défonçage manuel sont difficiles à évaluer car le temps nécessaire au défonçage d'un hectare dépend fortement de la dureté du matériau. Ainsi le défonçage d'un hectare effectué au pic dans un projet réalisé par CESA a nécessité 100 hommes durant une journée de 8 heures (12,5 m<sup>2</sup>/homme/heure). Le salaire étant de 3US\$ par homme et par jour le coût total du défonçage s'élève à 300US\$/ha. Mais nos propres mesures, effectuées probablement sur cangahua plus dure, ont montré qu'il faut quatre fois plus de temps car un homme n'a travaillé que 3 m<sup>2</sup> par heure ; le coût serait dans ce cas de 1 200US\$/ha.

### *B. Défonçage et terrassement.*

Le prix des terrasses réalisées avec sous-solage, sur une pente moyenne de 15% était évalué par MATET entre 1 600 et 2 100US\$/ha en 1992. Il est assez semblable à celui calculé lors de travaux réalisés au Mexique qu'en Équateur (2 100 à 2 20US\$/ha). Ces coûts sont nettement inférieurs à ceux des terrasses réalisées manuellement. PROCOSA cite en effet des coûts de 22 500US\$/ha.

La réalisation de terrasses planes au moment du sous-solage augmente donc fortement le coût de mise en culture des sols volcaniques indurés. Il semble préférable de faire des terrasses de formation progressive. En effet la réalisation de murets d'environ un mètre de haut et de 50 cm de large ne revient d'après CESA qu'à 500US\$/ha, sachant qu'un homme payé à 3US\$/jour construit 3 m<sup>2</sup>/jour et que sur une pente de 20% il suffit d'espacer les murets de 25 m les uns des autres. Le coût total du sous-solage et de la terrasse à formation progressive est donc dans ce cas de 830 à 1 050US\$/ha. Sur des pentes plus faibles les prix sont évidemment moindres.

### *C. Préparation du sol avant semis.*

Elle consiste en un ou deux passages de pulvérisateur à disques afin de rompre les blocs indurés résultant du sous solage. Le coût de cette opération est minimum par rapport à celui du défonçage et de la réalisation de terrasse. MATET estime en effet à une heure le temps nécessaire à cette opération pour un hectare et la facture 9US\$ (en 96). Mais une pulvérisation bien faite peut durer de 2 à 3 heures ce qui revient, en Équateur comme au Mexique, entre 20 et 30US\$/ha.

#### *3.2.2.2. Cas de la reforestation.*

D'après Sánchez, le coût de reforestation d'un hectare de tepetate est très différent selon la méthode employée.

Dans le cas de terrasses avec sous solage réalisées avec un D8, les prix sont de 945 à 1 280US\$/ha. Il faut en effet compter 810 à 1 080US\$ pour la préparation du sol. Le coût de production et de plantation des 1000 arbres est de 135 à 200US\$.

Les coûts de reforestation après élaboration de tinas ciegas n'est par contre que de 255 à 310US\$/ha ; soit 160 à 200US\$ pour le creusement des tinas ciegas et 95 à 110US\$ pour la production et la plantation de 400 arbres. Ces derniers prix sont à peine supérieurs à ceux indiqués par EMDEFOR (Empresa de Desarrollo Forestal) en Équateur pour une reforestation en sol non induré. Cette entreprise l'estime en effet à 235 \$/ha, dont 45% pour la main d'oeuvre.

Tableau 21 : Coûts moyen des travaux.

Travaux	Prix en US \$ par ha (en 96)	
	Mexique	Équateur
Mise en culture		
Défonçage	mécanisé 360	330 a 550
	manuel	300 a 1200
Défonçage + terrasse plane	mécanisé 1 600 a 2 100	2 100 a 2 200
	manuel	22500
Sous solage		330 a 550
terrasse formation progressive (p=20%, 4 murets)		500
total		830 a 1 050
Reforestation		
Sous-solage + terrasses	810 a 1 080	
Coût des plantes (1000/ha)	135 a 200	
total	945 a 1 280	
Tinas ciegas	160 a 200	
Coût des plantes (400/ha)	95 a 110	
total	255 a 310	

#### 4. CONCLUSION.

Les études socio-économiques réalisées en Équateur et au Mexique concernent les coûts de réhabilitation des sols volcaniques indurés et érodés et une caractérisation du milieu rural. Cette dernière a été faite de façon différente dans les deux pays. En Équateur l'étude a été générale sur l'ensemble de la zone où la cangahua est présente. Au Mexique, du fait de l'immensité des zones à tepetate, seules quelques enquêtes ont pu être réalisées dans des zones témoins. Ces travaux ont pu être plus approfondis dans la commune de Tlalpan (Edo. de Tlaxcala), grâce à l'étude de système familiaux d'exploitation. Ainsi, en plus d'une caractérisation générale des systèmes de production, les façons culturales pratiquées, les rendements, les coûts de production et la rentabilité de certaines cultures, ont été évalués sur tepetate et sur sol agricole.

Les caractéristiques du milieu rural et la mise en valeur des sols volcaniques indurés et érodés présentent, en Équateur et au Mexique des similitudes mais aussi des divergences.

Dans les deux pays le minifundio est caractéristique des régions présentant des sol volcaniques indurés et érodés. C'est plus spécialement le cas de l'Équateur où plus de 80% des exploitations ont moins de 3 ha. Les moyens de production sont faibles ; seuls quelques agriculteurs possèdent des tracteurs, en particulier au Mexique dans les U.P. de plus de 10 ha.

La production agricole, à base de maïs est essentiellement destinée à l'autoconsommation. Les rendements, faute de techniques adéquates, sont très faibles en Équateur (500 kg de blé ou de maïs par hectare), mais plus élevés au Mexique (moyennes de 1,8 t/ha de maïs et de 2 t/ha de blé) du fait que l'emploi d'engrais est généralisé dans ce pays alors qu'ils sont peu ou pas employés en Équateur et la sélection variétale y est meilleur.

Les petites exploitations, inférieures à 3 ha, sont en dessous du seuil de survie à l'exception de quelques unes qui se sont spécialisées dans l'élevage ou dans des cultures de rente. Dans ces conditions presque toutes les exploitations ont des revenus extra agricoles, qui permettent entre autres de financer la réhabilitation des sols indurés.

La plupart des petites et moyennes exploitations ne peuvent survivre que grâce à l'apport d'argent "extérieur". Cette situation implique généralement une migration vers les villes ou vers d'autres pays (les USA le plus souvent) et concerne un ou de plusieurs membres de la famille, de façon temporaire ou permanente.

La réhabilitation des terres indurée et érodées est une nécessité et est de pratique courante mais de façon différente dans les deux pays :

- Au Mexique la réhabilitation est mécanisée en dépit de son prix élevé : 350 à 550US\$/ha pour le sous-solage, lorsque le terrain n'est pas trop accidenté. Les paysans se contentent souvent de cette seule pratique et ne réalisent pas ou peu d'ouvrages de conservation. L'édification de terrasses planes ou en pente réduite (seule méthode pratiquée au Mexique) revenant en effet à 1 600 - 2 100US\$/ ha.

- En Équateur la réhabilitation de la cangahua est surtout manuelle. Il existe néanmoins un programme de mise en culture de la cangahua en milieu paysan avec sous solage mécanisé et édification de terrasses de formation progressive avec muret à l'aval dont le coût, de 830 à 1 050US\$/ha, est 5 fois plus faible que celui de la terrasse réalisée au moment du sous-solage.

La cangahua tout comme le tepetate sont cultivés sans tenir compte des spécificités de ces matériaux, de la même façon que les sols agricoles.

En fait l'incorporation à l'agriculture des sols volcaniques indurés pose moins de problème technique que la rentabilité de l'agriculture. La productivité doit être améliorée par la recherche de tous les facteurs limitant les rendements depuis le choix de variétés adaptées aux conditions du milieu, et par l'adoption de pratiques culturales performantes. Elle doit permettre dans les conditions socio-économiques actuelles de résoudre le premier problème, celui de la ressource en sol, puis d'assurer la rentabilité de l'investissement (en capital et en travail) dans un délai raisonnable. Ce projet nécessite une certaine promotion de techniques adaptées et éprouvées, l'encadrement des petits paysans, une aide à l'investissement puis à la commercialisation des produits.

## BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE IV

Alexandre J-L., 1996 - Etude d'une communauté paysanne de l'Etat du Michoacan. Rapport d'ESAT 1, CNEARC. Montpellier, France. 70p.

Coudray J. et Legeait.V. 1995 - Analyse-diagnostic des systèmes agraires passés et actuel d'une petite région andine d'Equateur. Mémoire de fin d'études. INA-PG, Paris. 46 p. + annexes.

Faugère G., 1995 - Etude d'une communauté paysanne de l'Etat de Jalisco (Mexique). Rapport d'ESAT 1, CNEARC. Montpellier, France. 70p.

Gasselin P. 1995 - Systèmes de production minifundistes sur sols volcaniques indurés et érodés en Equateur. Mémoire de fin d'études présenté à l'ESAT (CNEARC) de Montpellier. 57 p + annexes.

Lepigeon I., 1994 - Structures agraires de l'ejido Tlalpan, Etat de Tlaxcala, Mexique. Rapport d'ESAT 1, CNEARC. Montpellier, France. 70p.

Ly B T., 1993 - Evolution d'un système agricole péri-urbain et études des systèmes de production de la commune de Santa Catarina del Monte. Rapport d'ESAT 1, CNEARC. Montpellier, France. 70p.

Muñoz S. y Navarro H. 1996. Usos de recursos, rentabilidad y sustentabilidad en los sistemas económicos familiares (SEF). A paraître dans les actes du 3<sup>e</sup> symposium Sols volcaniques indurés.

Navarro H. y Prat C. 1996. Habilitacion agricola de los tepetates de los valles de Mexico y de Tlaxcala. *In*: El campo Mexicano, P. Bovin (Ed.). CEMCA-ORSTOM, Mexico. pp 253-292.

Navarro H., Zebrowski C., Pérez MA. 1995. La réhabilitation des tepetates: une solution viable dans les systèmes de production agricole des hauts plateaux mexicains. 21 p. En cours de publication dans la revue "Terra".

Navarro, H. et C. Zebrowski. 1994. La réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés et érodés en Equateur et au Mexique. 15<sup>e</sup> Congrès mondial de la Science du sol. Acapulco. pp 592-612.

Prat C., Ly B.T., Lepigeon I., Faugère G. et Alexandre.J.L. 1996. Los sistemas de producción agropecuarios con tepetate de 4 comunidades del altiplano mexicano. A paraître dans les actes du 3<sup>e</sup> symposium Sols volcaniques indurés.

Zebrowski C. y Sánchez B. 1996. Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos. A paraître dans les actes du 3<sup>e</sup> symposium Sols volcaniques indurés.

Zebrowski C. y Vicuña A. 1996. El cultivo de la cangahua en el medio campecino tradicional en Ecuador. A paraître dans les actes du 3<sup>e</sup> symposium Sols volcaniques indurés.

## CHAPITRE V

### ERODIBILITE ET CONSERVATION DES MATERIAUX INDURES DE SOLS VOLCANIQUES CULTIVES

#### 1. OBJECTIFS, STATIONS ET METHODES.

Le but de cette étude est de déterminer la susceptibilité à l'érosion des sols volcaniques indurés après leur mise en culture. Elle comporte d'une part l'analyse des pluies et leur érosivité, d'autre part la mesure de l'aptitude au ruissellement et à l'érosion des matériaux cultivés indurés, selon différentes façons culturales, divers types de plantes et aménagements anti-érosifs. Ces traitements sont choisis en fonction de pratiques locales traditionnelles et de nouvelles techniques à promouvoir. L'analyse des résultats doit aussi permettre de déterminer les facteurs du ruissellement et de l'érosion ainsi que l'impact sur le régime hydrique du sol et de la conservation de la fertilité.

Dans le cadre du précédent programme, au Mexique seulement (Quantin et al., 1992, rapport scientifique final), l'expérimentation avait été faite uniquement en petites parcelles de référence de type Wischmeier (24 m<sup>2</sup>) sur des tepetates naturels et cultivés et sous pluie naturelle. Elle avait pour but d'établir des données de base comparables entre plusieurs stations et à d'autres régions semblables. Il y avait quatre stations : une dans la vallée de Mexico à San Miguel (Texcoco), trois dans la région de Tlaxcala à Matlalohcan, El Carmen et Tlalpan.

Pour ce deuxième programme, l'étude a été étendue à la cangahua en Équateur et aux andosols du Sud-Chili. L'objectif plus pragmatique a été d'obtenir des données à l'échelle des parcelles paysannes, en agriculture traditionnelle ou améliorée afin d'obtenir une mesure plus objective des risques d'érosion.

Au Mexique il s'agit de parcelles de 500 à 1 500 m<sup>2</sup> aménagées mécaniquement en terrasse à pente réduite (3 à 6%), sur les stations de San Miguel Tlaixpan et de Tlalpan ; ces stations diffèrent un peu par le régime des pluies, plus intense à Tlalpan. En Équateur les parcelles n'ont que 100 m<sup>2</sup> ; elles sont aménagées manuellement suivant leur pente naturelle (15%) ou en pente réduite ; il y a deux stations à La Tola (Tumbaco) et à Cangahua (Cayambe), qui diffèrent par leur régime des pluies (subhumide à subaride) ; en outre on y a testé l'effet d'une préculture irriguée. Au Chili, les parcelles n'ont que 100 m<sup>2</sup> et sont aménagées manuellement suivant leur pente naturelle (25%) ; il n'y a qu'une seule station à Fundo Paillahuente (Valdivia), en climat très pluvieux.

Sur les parcelles de dimension paysanne les mesures ont été faites sous pluie naturelle. Au Mexique, à Tlalpan sur trois terrasses (de 1 500 m<sup>2</sup>), pour une seule culture de maïs avec fertilisation minérale, ont été comparées trois façons culturales : labour mécanisé traditionnel avec sarclage et buttage, labour mécanisé minimum (sans buttage) avec ou sans couverture végétale intercalaire (*Medicago polymorpha*). Tandis qu'à San Miguel Tlaixpan sur six terrasses (de 500 à 800 m<sup>2</sup>) de tepetate le protocole plus complexe avait pour but d'expérimenter : une rotation culturale d'orge, puis maïs ou maïs associé à légumineuses, puis orge ou maïs ; diverses façons culturales ; divers traitements tels que fertilisation minérale ou organique. En outre il y avait une terrasse en sol agricole et une parcelle naturelle de tepetate nu de 1 800 m<sup>2</sup>, pour servir de comparaison avec le tepetate cultivé. En Équateur sur trois parcelles en pente naturelle, à Cangahua et à La Tola, ont été testés l'effet d'une préculture irriguée et celui d'un muret filtrant de cangahua en bas de pente ; en outre à La Tola il y avait une terrasse en pente réduite ; les cultures ont été faites selon le mode traditionnel sans fertilisation. Au Chili sur cinq parcelles en pente naturelle ont été comparés une prairie naturelle, une prairie améliorée, un sol nu et deux rotations culturales (avec fertilisation).

En outre au Mexique, les observations en parcelles de référence (Wischmeier) sous pluie naturelle ont été poursuivies dans la région de Tlaxcala sur les stations de El Carmen et Tlalpan. D'autre part sur la station de S. Miguel Tlaixpan (Mexico) une nouvelle série de 22 parcelles de type Wischmeier a été installée pour comparer la susceptibilité au ruissellement et à l'érosion du tepetate naturel et du tepetate cultivé, suivant divers traitements, notamment avec ou sans protection d'un filet, de manière à préciser les processus et à mettre au point un modèle de prédiction de l'érosion.

Enfin au Mexique et en Équateur, quelques mesures ont été faites sous pluie simulée au champ en miniparcelles (7 m<sup>2</sup> au Mexique, 1 m<sup>2</sup> en Équateur), afin d'établir la relation entre intensité des pluies, ruissellement et érosion. En outre, sous pluie naturelle sur les terrasses ou parcelles au Mexique et en Équateur, des observations ont été faites sur l'évolution des états de surface et des propriétés hydriques superficielles, afin de mieux comprendre l'évolution du comportement au ruissellement et à l'érosion. Au Mexique encore, des prélèvements périodiques de sol, sédiment et pollution ruisselée ont été analysés pour faire un bilan des éléments érodés.

Les résultats ont été produits séparément par station et par équipe de travail, à savoir :

- Au Mexique sur la station de San Miguel Tlaixpan (Mexico), les essais en terrasse ont été conduits par Prat et son équipe du CP (Colegio de Postgraduado de Montecillo) et de l' ORSTOM (Prat, rapport final 1997) ; les essais en parcelles de type Wischmeier ont été réalisés par Oropeza-Mota et son équipe du CP (Oropeza, rapport final 1997). Sur les stations de Tlalpan et El Carmen (Tlaxcala) les essais en terrasse et en parcelles de type Wischmeier ont été faits par Fechter et son équipe de l'Université de Tlaxcala (Werner et Fechter, rapport final, 1997).

- En Équateur sur les stations de Cangahua et La Tola les essais ont été menés par Custode, Trujillo et leur équipe de l'Université Centrale d'Équateur et supervisés par Viennot et Zebrowski ; l'interprétation et la rédaction ont été faites par de Noni, Viennot, Trujillo et Custode (1996).

- Au Chili sur la station de Paillahuente les essais ont été conduits par Oyarzún, Huber, Peñaloza et leur équipe de l'Université de Valdivia (Oyarzún et al., 1996)

La rédaction de cette partie a été faite avec la participation de Prat et Viennot pour leur contribution respectives au Mexique et en Équateur. Nous traiterons successivement des expérimentations au Mexique, en Équateur et au Chili. Dans chaque pays et par station nous présenterons d'abord les méthodes, installations et protocoles, puis les résultats : régime des pluies et érosivité ; mesure du ruissellement et de l'érosion ; observation des propriétés et état de surface ; éventuellement, analyse des eaux de ruissellement et des sédiments.

## **2. ÉRODIBILITE DES TEPETATES DE TYPE FRAGIPAN DU MEXIQUE.**

### **2.1. STATIONS, INSTALLATIONS ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.**

#### **2.1.1. Station de San Miguel Tlaixpan, Texcoco (Mexico).**

##### ***2.1.1.1. Installations et méthodes de mesure.***

###### ***A. Station agroclimatologique automatisée.***

Cette station installée par Prat en 1996, elle n'a fonctionné qu'au cours de cette même année. Elle comporte des mesures de température, humidité, pluie et vitesse du vent ; il manquait la mesure d'insolation.

###### ***B. Mesure de la pluie.***

La station est équipée au centre du bloc de parcelles de type Wischmeier d'un pluviographe à enregistrement quotidien et d'un pluviomètre pour contrôle, ainsi que deux autres pluviomètres situés aux extrémités amont et aval du bloc de terrasses de type paysan,

pour contrôler la variabilité de la pluie. En outre, comme le pluviographe n'a fonctionné que de mai à octobre pour raison de surveillance, les pluviomètres ont permis de mesurer les pluies exceptionnelles avant ou après la saison des pluies agricoles.

### C. Mesure du ruissellement et de l'érosion.

Les deux blocs ont été équipés différemment.

#### C. 1 - Parcelles de type Wischmeier.

Il y a 22 parcelles de 44 m<sup>2</sup> (2 x 22 m), dont 16 parallèles sur le tepetate cultivé et 6 sur le tepetate naturel. Chacune comporte à l'aval un canal récepteur calibré de type LH à débit maximum de 2 l/s, un limnigraphe à enregistrement quotidien et deux cuves de réception reliées par un partiteur calibré pour recevoir le ruissellement d'une pluie de maximum décennal. Le ruissellement est évalué par pluie, à partir des mesures du limnigraphe. Il peut être contrôlé globalement en cuve. Le sédiment est évalué en cuve (volume, échantillonnage puis poids sec et analyse chimique de N et P en laboratoire. Les mesures ont été faites pendant 3 ans de 1994 à 1996.

#### C.2 Terrasses de type paysan.

Il y a 6 terrasses sur tepetate cultivé de 400 à 800 m<sup>2</sup>, une de 700 m<sup>2</sup> sur sol agricole, et une de 188 m<sup>2</sup> en tepetate naturel nu. Les mesures ont été faites pendant 4 ans de 1993 à 1996.

Chaque terrasse présente une pente générale de 3 à 6% dirigée vers un canal calibré (seuil) type H, lequel débouche dans un répartiteur d'environ 1 m<sup>3</sup>. 1/20 ou 1/10 (selon le modèle) du trop plein de cette cuve se déverse dans une seconde cuve aux caractéristiques similaires. Finalement, le trop plein de ce second répartiteur va lui aussi se déverser dans les mêmes proportions dans un demi baril de 100 litres. Réalisées en béton, les cuves ont été peintes en 1994 afin d'éviter une contamination de l'eau par le ciment. Au niveau de l'exutoire se trouve un limnigraphe Stevens horizontal à quartz dont la vitesse de défilement est de 24 h, avec un rapport 1/1 (Figure ci-dessous).

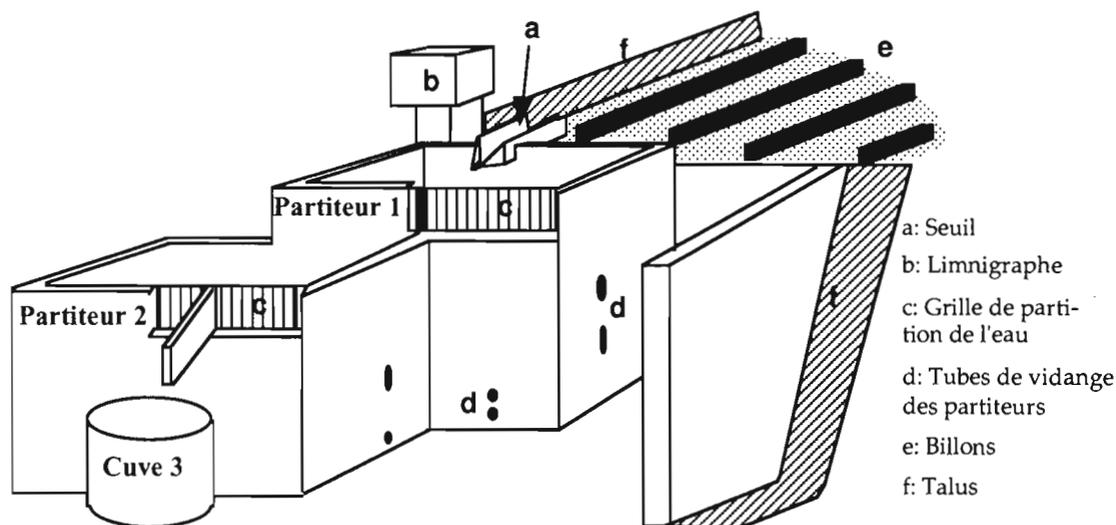


Fig. 1. Schéma du système de capture des eaux de ruissellement et des sédiments transportés.

On mesure l'eau dans les cuves après chaque pluie et l'on récupère **tous** les sédiments dans des sacs en plastique. On transvase ensuite ces sédiments dans des plateaux en zinc que l'on place dans des étuves à 105 °C de 1 à 3 jours, en fonction de leur charge en eau.

Les enregistrements des limnigraphes ont été saisis manuellement sur une table à digitaliser connectée à un ordinateur à travers le programme "Hydrom" développé par l'ORSTOM. Les données ont été ensuite traitées et analysées par ce même programme.

Afin de compléter et améliorer l'interprétation des données, des séries de mesures, d'analyses et d'observations ont été réalisées tout au long de l'année.

C'est ainsi que des échantillons d'eau ont été pris systématiquement après chaque pluie. Ceux-ci ont été analysés dans un premier temps au laboratoire de physique des sols du CP, puis à partir de 94, au laboratoire de fertilité du CP dont les méthodes d'analyse sont beaucoup plus précises. Les paramètres suivants ont été déterminés : charge solide, pH, conductivité électrique, N, P, principales bases, carbone organique.

A partir de 1994, un levé semi quantitatif de l'état des billons en long et en travers des terrasses a été assuré. Afin d'étudier son comportement au cours de ces 4 ans, un système de capture des sédiments et de l'eau de ruissellement provenant du talus séparant 2 des terrasses (entre T2 et T3) a été réalisé. Enfin, l'humidité du sol dans chacune des terrasses a fait l'objet d'un suivi (3 mesures par terrasses 1 à 2 fois par semaine pendant la saison des pluies).

#### *D. Observation des propriétés et états de surface sur les terrasses de type paysan.*

Suite aux travaux de G. Jérôme et JL Janeau (1992), nous avons fait des mesures et observations des états de surface de 1994 à 1996 (Leroux, 1995 ; Lauffer, 1995 ; Prat, 1996).

L'évolution des états de surface des sols est intéressante à plus d'un titre : connaître cette évolution pour un sol qui vient d'être créé en fonction de différents paramètres (notamment de l'apport de matière organique), fournir des informations indispensables à une bonne interprétation des processus d'érosion, d'hydrodynamique et de la production agricole. Il est de plus intéressant de souligner que ce genre d'essais et de prise en compte des états de surface sont tout à fait novateurs au Mexique.

L'étude de l'évolution des états de surface a été effectuée selon la méthode des "points quadrats" (Casenave et Valentin, 1989) à partir d'un rugosimètre de 2 m<sup>2</sup>, chaque point de mesure correspondant à une surface de 10 cm<sup>2</sup>. La couverture végétale a été déterminée sur le même appareil à l'aide de mires quadrangulées. Les lectures des états de surface ont été réalisées après chaque forte pluie alors que celles concernant la végétation ne l'ont été qu'une fois par semaine. Ces mesures ont été interrompues quand la couverture végétale représentait environ 80% de la surface totale et/ou quand la hauteur des plantes empêchaient l'installation du système. Nous ne présentons ici que les résultats des travaux effectués en 1994 et 1995 portant sur des cultures de maïs et maïs-fève, ceux de 1996 étant en cours d'analyse. Les parcelles étudiées se localisent selon le plan suivant :

Tab. 1. Caractéristiques des parcelles d'étude du micro-relief et de la couverture végétale ('94 à '96).

Localisation	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Près de l'exutoire				'94-'95		'94-'95	
Partie centrale de la terrasse	'94	'96	'94-'96	'96	'96	'96	'94-'95-'96
Côté opposé à l'exutoire				'94-'95		'94-'95	

A partir de la classification des états de surface proposée par Casenave et Valentin, nous avons décrit et classé ces organisations superficielles en chacun des points quadrats.

Afin de compléter ces données, des mesures complémentaires ont été effectuées telles que la détermination de la teneur en eau des dix premiers centimètres de sol, le pourcentage de superficie occupée par les plus petits agrégats non incorporés aux croûtes (diamètre minimum) ; l'évolution dans le temps de ce diamètre minimum ; l'observation qualitative et quantitative des états des billons avec mesures du nombre, emplacement et taille des ruptures.

#### **2.1.1.2. Traitement des données.**

##### *A. Parcelles de type Wischmeier.*

Les mesures de pluie, ruissellement, sédiment et pertes de nutriments sont enregistrées par événement pluvieux ou érosif. Pour la pluie il y a une analyse des caractéristiques à savoir : heure et durée, hauteur, intensité maximum et moyenne, coefficient EI<sub>30</sub> de Wischmeier ; pour

le ruissellement : heure et durée, volume, débit maximum et moyen, taux de ruissellement en pourcentage de pluie ; pour l'érosion : taux de sédiment en kg/ha, perte en azote et phosphore.

Le traitement des données pluie et ruissellement, à partir des enregistrements pluviométriques et limnigraphiques, a été réalisé à l'aide du programme "SIMPLE" mis au point au laboratoire du CP (Lopez et al., 1996).

### *B. Terrasses de type paysan.*

De même les enregistrements de pluie, ruissellement, érosion, etc, sont faits par événement pluvieux et en fonction du temps, mais séparément. Les enregistrements pluviographiques ont été digitalisés et traités par les logiciels de l'ORSTOM "Pluviom" et "Ares".

Une analyse a été faite de la distribution des pluies diurne, mensuelle et annuelle ; de l'intensité et de l'érosivité de chaque pluie (intensité et énergie cinétique avec un pas de temps de 5, 10, 15 et 30 minutes).

Les enregistrements des limnigraphes ont été saisis manuellement sur une table à digitaliser connectée à un ordinateur à travers le programme "Hydrom" développé par l'ORSTOM. Les données ont été ensuite traitées et analysées par ce même programme. Le coefficient de ruissellement a été calculé par pluie ruisselante (et érosive) et pour l'ensemble des pluies ruisselantes, mensuel et annuel.

La mesure des sédiments a comporté séparément la partie solide en suspension (charge solide) et le sédiment global. La charge solide doit permettre d'expliquer le processus d'érosion en fonction de l'intensité des pluies, de l'érodibilité du tepetate et de l'intensité du ruissellement.

## **2.1.1.3. Protocoles expérimentaux.**

### *A. Parcelles de type Wischmeier.*

Il y a un ensemble de 16 parcelles sur tepetate cultivé (roturé) en pente homogène (5 à 6%) et de 6 parcelles sur tepetate naturel nu en pente irrégulière (8 à 9%).

Le tepetate cultivé (défoncement par sous-solage à 40 cm puis labour et passage de disques pour obtenir un agrégat moyen de 3 à 4 mm), comporte deux blocs : l'un de 12 parcelles non plantées, en pente moyenne de 4,7%, l'autre de 4 parcelles plantées en orge, en pente moyenne de 6,7%. Toutes les parcelles sont situées parallèlement sur une même courbe de niveau.

Sur le bloc cultivé non planté sont testés des effets physiques superficiels à savoir : le tepetate "roturé" initial, l'effet d'un sarclage manuel superficiel renouvelé de temps à autre pour détruire la formation de croûte et entretenir l'agrégat optimum, l'effet croisé sur les deux précédents traitements d'un filet superficiel pour réduire l'impact des gouttes de pluie, à l'égal d'un couvert végétal permanent. Il y a donc 4 traitements : roturé sans sarclage, avec ou sans filet, roturé avec sarclage et avec ou sans filet. Il y a 3 répétitions.

Le bloc cultivé planté en orge compare 2 traitements : avec ou sans fumier (20 t/ha), mais toujours avec fertilisation minérale. Il y a 2 répétitions. Le but est d'une part de tester l'effet améliorant de la matière organique sur la stabilité des agrégats, d'autre part de comparer un couvert végétal avec l'effet de couvert d'un filet sur tepetate cultivé non planté.

Les 6 parcelles sur tepetate naturel sont disposées 2 par 2 par couple de traitements : avec ou sans filet. Il y a 3 répétitions.

Le but de cette expérimentation est de préciser certains paramètres de l'équation universelle de perte en sol (RULE de Wischmeier), appliquée au tepetate cultivé en fonction du travail de ce matériau, de sa rugosité, du couvert superficiel et d'un apport de matière organique, en vue d'établir un modèle de prédiction du ruissellement, de l'érosion et de la perte en nutriments (N et P).

## B. Terrasses de type paysan.

Le protocole a déjà été présenté dans la partie "expérimentation agronomique et productivité". Nous rappellerons cependant les facteurs testés concernant l'aptitude au ruissellement et à l'érosion.

Pour la mesure de l'érosion il y a une parcelle de tepetate naturel nu (T0), une terrasse de sol naturel (T7), et cinq terrasses de tepetate cultivé (roturé) de T2 à T6.

T0 : **tepetate naturel**, 1 800 m<sup>2</sup>, pente moyenne 8% (varie de 2 à 10).

T7 : **sol naturel**, 713 m<sup>2</sup>, pente 5,9%, culture associée : orge + *Medicago* en 1993 et 1996, maïs + fèves en 1994 et 1995.

T2 : **tepetate roturé à 60 cm** de profondeur, 470 m<sup>2</sup>, pente 4,7%, culture associée.

Les 4 autres terrasses (T3 à T6) sont roturées à 40 cm de profondeur.

T3 : 773 m<sup>2</sup>, pente 3,2%, **monoculture** : orge en 1993 et 1996, maïs en 1994-95. Les 3 autres terrasses (T4 à T6) sont en culture associée.

T4 : 730 m<sup>2</sup>, pente 3,4%, **apport de fumier** (16 t/ha en poids sec). Toutes les autres terrasses ont une fertilisation minérale sans fumure organique.

T5 : 792 m<sup>2</sup>, **pente réduite à 2,5% et taille d'agrégat plus fine**.

T6 : 1 152 m<sup>2</sup> en 1993-94, réduite à 734 m<sup>2</sup> (T6a) en 1995-96, **traitement de référence**.

La différence du comportement entre T5 et T6 étant nulle de 1993 à 1995, donc sans effet des différences de pente et de texture, nous avons en 1996 testé l'effet du "contreo" (billons cloisonnés) sur la terrasse T5 par rapport au billon traditionnel en T6.

La rotation culturale a été : en 1993 (1<sup>ère</sup> année) orge ou orge associée à *Medicago polymorpha* ; cette culture se fait sur une surface plane sans autre travail du sol après labour ; elle a été renouvelée en 1996 uniquement sur les terrasses T2, T3, T4 et T7. En 1994 et 1995 la culture du maïs ou maïs associé (fève + haricot en 1994, fève seule en 1995) a été faite sur toutes les terrasses ; elle se fait traditionnellement en billon en trois opérations successives (semis en sillon puis sarclage et buttage). Cette culture a été prolongée en 1996 sur les terrasses T5 et T6 pour tester l'effet du "contreo".

Les facteurs comparés sont donc : tepetate naturel nu ; sol naturel cultivé ; tepetate "roturé" et plusieurs traitements : profondeur 40 et 60 cm (T2) ; texture fine et pente réduite (T5) apport de matière organique (T4) ; monoculture (T3) ou culture associée ; effet plante et façon culturale orge et labour à plat ou maïs et billonnage, billon simple et billon cloisonné (en 1996).

Une réserve peut cependant déjà être faite : la comparaison inter annuelle de facteurs, tels que effet plante et façon culturale, suppose que l'érosivité des pluies demeure constante ; ce qui naturellement ne se produit pas. Nous avons aussi supposé que le comportement du tepetate cultivé était initialement homogène sur toutes les terrasses, aucun critère physique ne permettant à priori de les distinguer.

## 2.1.2. Stations de El Carmen et de Tlalpan (Tlaxcala)

### 2.1.2.1. Station de El Carmen (Tlaxcala)

Cette station n'a été qu'en 1994, après des observations antérieures de 1991 à 1993, uniquement en petites parcelles : une de 6 m<sup>2</sup> pour le tepetate nu, deux de 44 m<sup>2</sup> (2x22 m) pour un couple de parcelles : tepetate "roturé" nu et planté de maïs cultivé en billons. La différence avec la station de Tlalpan vient du type de tepetate t2 (gris) au lieu de t3 (brun) et du régime de pluie un peu moins intenses et érosives à El Carmen (voir rapport antérieur Quantin et al., 1992). Outre un pluviographe à enregistrement quotidien, les installations de mesure du ruissellement et de l'érosion, en cuve sont très simples.

### 2.1.2.2. Station de Tlalpan (Tlaxcala)

#### A. Parcelles de type Wischmeier

Sur cette station les mesures en parcelles de type Wischmeier commencées en 1992 ont été poursuivies, comme à El Carmen, mais de 1994 à 1996, sur tepetate de type t3. Elle comporte aussi une parcelle de 6 m<sup>2</sup> pour le tepetate nu et un couple de parcelles de 44 m<sup>2</sup> (2x22 m) de tepetate cultivé, nu ou planté en maïs en billons. Elle a le même type d'installations.

#### B. Terrasses de type paysan (1200 à 1500 m<sup>2</sup>).

Trois terrasses sont installées sur un tepetate de type t3 (comme à San Miguel Tlaixpan, Edomex) cultivé depuis 1991 à pente réduite est d'environ 5 à 6%, la pente diagonale du bord supérieur extrême au bord inférieur vers le collecteur est d'environ de 3%. La profondeur de tepetate cultivé varie de 35 à 70 cm du haut vers le bas de la terrasse.

Un premier essai en 1994 a été abandonné. Le système de partiteur utilisé entre la première et la seconde cuve de réception pour un gros volume du ruissellement, une roue de Coshocton n'a pas bien fonctionné en présence d'une forte charge de sédiments grossiers. Le système de réception et de mesure a été modifié et automatisé. Il comporte : un collecteur calibré de type H, un limnigraphe à enregistrement quotidien, une grande cuve (6 m<sup>3</sup>) montée sur bascule, avec enregistrement continu et synchrone du poids d'eau et du sédiment dans la cuve et du débit mesuré par le limnigraphe.

En outre la station dispose d'un pluviographe à enregistrement quotidien. Un échantillonnage dans la cuve permet ensuite d'évaluer la quantité de sédiment et le volume d'eau ruisselée. Par ailleurs sur un exutoire de la cuve un partiteur permet de récupérer une aliquote du surnageant et d'évaluer la charge solide en suspension. Enfin sur un échantillon moyen du sédiment à chaque événement érosif, l'analyse chimique a permis d'évaluer les pertes en Ca, Mg, K, NA et P.

Au lieu de tester chaque année la rotation d'une ou plusieurs plantes distinctes, nous avons choisi de comparer chaque année en 1995 et 1996, trois traitements d'une même culture de maïs selon trois façons culturales distinctes : labour traditionnel (LT) suivi des deux opérations de sarclage intercalaire et buttage du maïs ; labour minimum (LR) avec ou sans couvert végétal intercalaire (LRcv, LRscv) d'un *Medicago polymorpha*. Le traitement LRscv est obtenu par désherbage chimique sans travail du sol. Ce protocole simplifié permet de prendre en compte l'effet de la variation inter annuelle de l'intensité des pluies sur le ruissellement et l'érosion.

## 2.2. DONNEES CLIMATIQUES (1996) SUR LA STATION DE S. MIGUEL TLAIXPAN (EDOMEX).

Bien que suivi qu'au cours d'une seule année (Prat, 1996), le climat de San Miguel Tlaixpan montre d'importantes fluctuations tant au cours d'une même année que durant une journée, ce qui implique d'effectuer des analyses des résultats à un niveau plus détaillé que des moyennes mensuelles qui occultent des périodes de sécheresse et de gelées.

Les facteurs limitants du climat à San Miguel Tlaixpan sont nombreux : risques de gelées précoces (à partir de fin septembre) et tardives (jusqu'en juin), rafales de vents qui provoquent des verses (risques existant durant toute l'année), sécheresses à répétitions et prolongées qui limitent le développement des cultures et qui peuvent diminuer drastiquement les rendements, en particulier du maïs, quand elles se produisent au cours d'une période sensible de la croissance de la plante (germination, floraison,...).

Tab. 2. Moyennes mensuelles des principales caractéristiques du climat (4/96 au 11/96).

Mois	Temp moy.	Temp max.	Temp mini.	Pres. atmos.	Humid %	T du point de rosé	Vitesse vent	Vit. max vent	Effet refroidissant du vent	Pluie (pluviographe)	Evaporation	ETP
	°C	°C	°C	mm	%	°C	km/h	km/h	°C	mm	mm	mm
4	16.6	16.8	16.4	577.4	48.4	4.1	0.1	1.8	16.6	32.5	192.0	153.6
5	19.4	19.7	19.2	564.7	40.1	3.3	5.0	10.9	19.2	32.0	242.4	193.9
6	16.2	16.4	16.1	564.3	64.8	8.6	3.8	8.3	15.9	101.0	134.2	107.3
7	16.0	16.1	15.9	564.2	64.3	8.7	4.5	9.1	15.7	121.0	133.9	107.1
8	15.5	15.7	15.4	563.0	72.8	10.3	3.4	7.3	15.4	77.5	101.6	81.3
9	17.1	17.2	16.9	562.3	69.1	10.7	3.7	7.7	16.9	172.0	126.1	100.9
10	16.6	16.7	16.4	562.7	54.5	6.0	5.1	10.1	16.1	35.0	171.1	136.9
11	15.0	15.2	14.9	563.9	44.6	1.3	5.2	10.2	14.6	0.0	192.3	153.9
Total										571.0	1293.6	1034.9
Moy.	16.6	16.7	16.4	565.3	57.3	6.6	3.9	8.2	16.3		161.7	129.4

L'ETP étant très élevée, il existe un déficit hydrique très important tout au long de l'année, qui, selon les années, arrive très difficilement à être comblé pendant la saison des pluies, tout du moins, en termes de moyennes mensuelles.

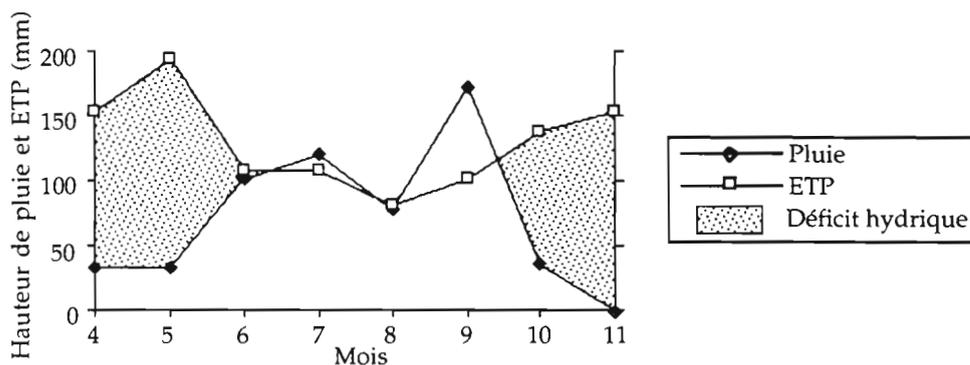


Figure 2. Bilan hydrique du 4/96 au 11/96.

Les paramètres obtenus, bien qu'ils ne résultent que de mesures obtenues au cours d'une seule année, montrent que le climat se situe à la limite de la catégorie C(w1)(w), ce qui correspond à un climat tempéré subhumide avec un régime d'humidité de type ustic (selon la classification de Köppen modifiée). Ces données confirment donc bien le type de climat calculé par Peña et Zebrowski en 1992. Toutefois, à partir des données pluviométriques de 1992 à 1996, on peut noter que la hauteur des précipitations est plus faible ( $\approx 620$  mm annuel) que celle qui était utilisée dans les travaux antérieurs (700 à 800 mm). Il n'existe pas de gradient pluviométrique régulier de l'amont vers l'aval de la Sierra contrairement à ce qu'indique ces auteurs. En fait, les précipitations sont plus faibles dans une bande comprise entre 2 400 et 2 600 m d'altitude.

La saison des pluies dure normalement de mai à octobre mais son régime est irrégulier au cours d'une année et d'une année sur l'autre.

L'irrégularité et la faible quantité des pluies au court de l'année, en particulier à San Miguel Tlaixpan, impliquent que notre zone d'étude se trouve en limite de culture pour le maïs ce qui diminue d'autant la possibilité d'obtenir de bonnes productions de cette culture.

## 2.3. REGIME DES PLUIES ET EROSIVITE

### 2.3.1. Station de San Miguel Tlaixpan (Edomex)

Les principaux résultats et interprétations des mesures effectuées de 1992 à 1996 sont présentées ici (Prat, 1996 ; Prat et al., 1997, rapport final).

### 2.3.1.1. Distribution des pluies.

La hauteur des pluies de 1992 à 1996 a varié de 397 à 768 mm (moyenne de 627 mm/an). Le nombre de jours de pluies en moyenne de 105, a varié de 81 à 126. Il y a donc une grande variabilité inter annuelle des pluies et de leur "érosivité" (coefficient R) potentielle (Tab. 3).

Tableau 3. Caractéristiques principales des pluies de 1992 à 1996.

	1992	1993	1994	1995	1996	1992-1996
Nombre de jours avec pluies	126	81	105	120	90	105
Hauteur totale (mm)	654.4	411.0	735.6	768.3	582.7	627.0
Nombre de pluies enregistrées (pluviographe)+analysées	193	132	148	154	109	147
Hauteur de pluies enregistrées (pluviographe)+analysées	654.4	396.0	594.1	528.6	417.8	518.2
% de la hauteur de pluies enregistrées vs totales	100	96	81	69	72	83
R métrique	259.2	96.0	216.0	196.7	204.4	194.4
R us	149.3	55.3	124.4	113.0	118.2	112.0
Essais de classification de l'année pluviométrique	Normale et érosive	Très sèche	Normale	Irrégulière	Sèche et irrégulière	Année moyenne

Malheureusement l'enregistrement des pluies par le pluviographe n'est pas complet, le responsable mexicain limitant son fonctionnement à la saison agricole de mai à octobre qui est normalement la saison des pluies. En moyenne, 6% des pluies seulement tombent au cours de la saison sèche de novembre à avril, mais en 1995, près du quart (188 mm) sont tombées pendant cette période.

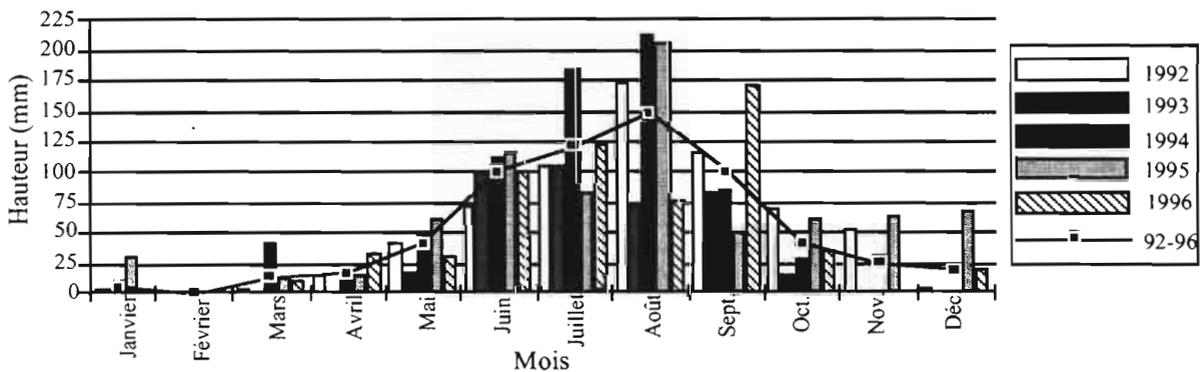


Fig. 3. Distribution des hauteurs mensuelles des précipitations au cours de l'année (92-96).

La saison des pluies se subdivise en deux : une première de mai à juin, un intermède souvent plus sec puis une deuxième de juillet à septembre avec un maximum d'intensité en août qui peut atteindre près de 200 mm (150 mm en moyenne).

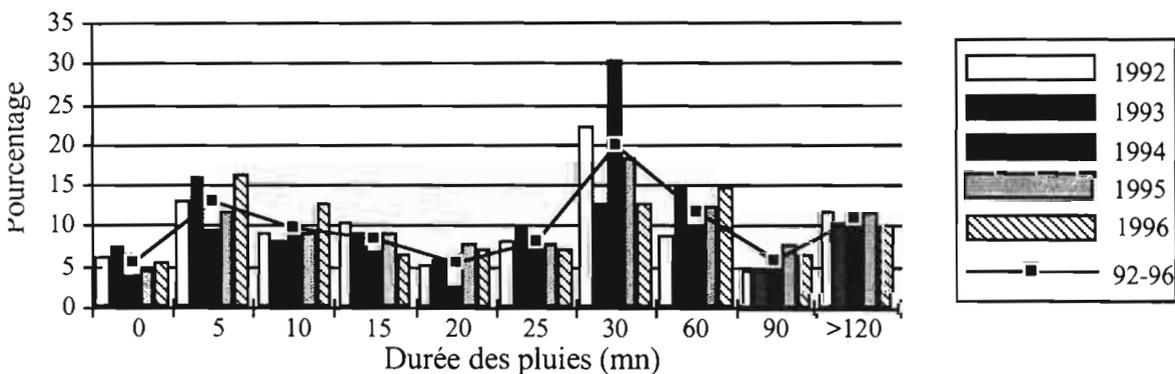


Figure 4. Durée des pluies (minutes) (1992 à 1996).

Près de 95% des précipitations se produisent entre midi et minuit, dont 75% se concentrent entre 2 et 8 heures du soir (caractéristique d'un régime tropical). La moitié des pluies ont une durée inférieure à 30 minutes, et parmi celles-ci, environ 30% ne dépassent pas le quart d'heure. La durée des averses si brèves implique que le calcul de leur énergie ne doit pas être basé sur une intensité pendant 30 mn, mais plutôt sur une base de temps de 5, 10 ou 15 mn.

### 2.3.1.2. Hauteur et fréquence annuelle des pluies.

80% du nombre des pluies par an ont une hauteur inférieure à 5 mm, 6% à 14% de 5 à 10 mm soit 8 à 26 averses et 8 à 13% plus de 10 mm. En moyenne, il y a seulement une quinzaine d'averses par an de plus de 10 mm (Fig. 5).

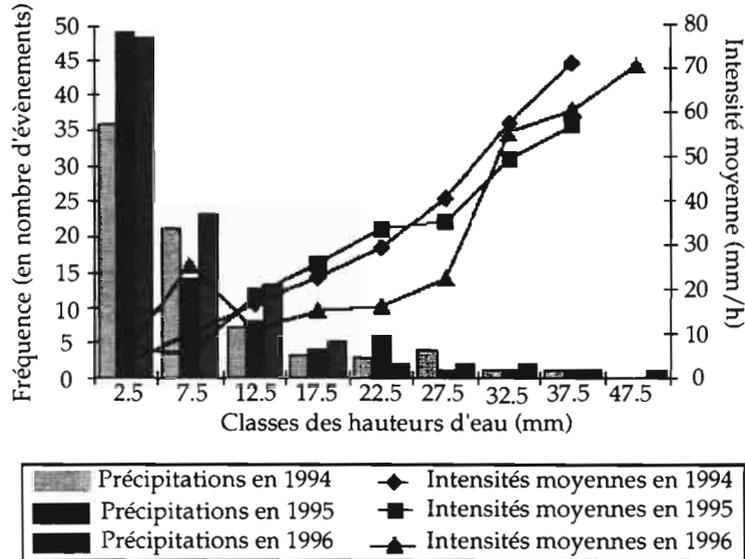


Figure 5. Fréquence des pluies en fonction de la hauteur (mm) et de l'intensité moyenne (mm/h) de 1994 à 1996.

### 2.3.1.3. Intensité et fréquence annuelle des pluies.

Les trois quarts des pluies ont une intensité inférieure à 5 mm/h, ce qui correspond à des intensités très faibles. Quinze pour cent correspondent à la classe de 5 à 10 mm/h et les 10% restants ont une intensité allant de 10 à 48 mm/h. Ces fortes intensités correspondent le plus souvent aux pluies ayant les plus fortes hauteurs. Toutefois ces intensités sont loin d'être exceptionnelles si on les compare à des régimes climatiques semblables. On constate que plus de 75% des pluies présentent leur intensité maximale en début de précipitation. C'est également 75% des pluies de plus de 15 mm qui sont de type unimodal.

### 2.3.1.4. Énergie cinétique et fréquence annuelle des pluies.

Le calcul de l'énergie cinétique globale de chaque pluie se fait en additionnant les tranches d'énergie de même intensité. Nous trouvons les mêmes relations entre les années que dans le cas de la hauteur et de l'intensité des pluies (Figure 6). En 1993 et 1996, une vingtaine de pluies ont une énergie globale qui dépasse 100 MJ/ha alors qu'en 1992 et 1994, les pluies sont deux fois plus nombreuses à dépasser cette valeur. Entre ces deux extrêmes, 1995 est une année intermédiaire avec 30 pluies comprises entre 100 et 700 MJ/ha. En 1992, une averse a dépassé les 700 MJ/ha, alors qu'en 1996 elles furent deux.

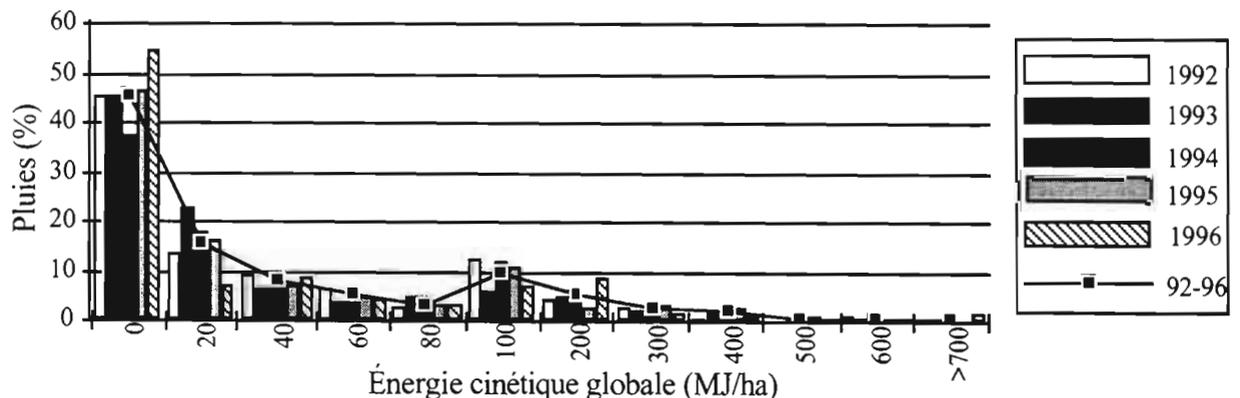


Fig. 6. Énergie cinétique globale (MJ/ha) vs le pourcentage de pluies (1992 à 1996).

Il y a donc une forte variabilité inter annuelle de l'énergie cinétique globale des pluies. En moyenne près de 90% des pluies ont une énergie inférieure à 200 MJ/ha et sont donc potentiellement très peu érosives, 9% une énergie de 200 à 500 MJ/ha et modérément érosives et 2% seulement plus 500 MJ/ha et fortement érosives. En année normale, il y a en moyenne 3 pluies fortement érosives et aucune en année sèche.

### 2.3.1.5. Érosivité annuelle des pluies (Coefficient R)

La valeur annuelle du coefficient R, calculé à partir de tous les enregistrements effectués par le pluviographe (soit 99% en 93, 86% en 94, 70% en 95 et 96 du total des pluies) présente peu de variation d'une année à l'autre, excepté 1993 qui fut une année exceptionnellement sèche.

La valeur de  $R_{US}$  correspond au produit de l'énergie cinétique globale par l'intensité moyenne des pluies pendant 30 mn ( $EI_{30}$ ) exprimée en unités américaines. Pour passer du  $R_{US}$  au R métrique, on multiplie le premier par 17,356 et on exprime le second en MJ/ha\*mm/h.

A part 1992 et 1993, ces valeurs ne représentent qu'une partie des précipitations annuelles et sont donc sous-estimées de près de 30%. En année normale, la valeur de  $R_{US}$  serait de 140 à 170 alors qu'en année sèche elle serait trois fois moindre. Cette valeur de  $R_{US}$  comparée à d'autres régions du monde (Roose, 1977) correspond à une agressivité des pluies plutôt faible dans cette région du Mexique. Le rapport entre la moyenne des valeurs annuelles de  $R_{US}$  et la hauteur des pluies est proche de 0,2, ce qui correspond selon Roose (1977) au cas des pluies de montagnes tropicales.

Bien que cohérente avec les autres données étudiées, il est toutefois nécessaire d'obtenir des moyennes sur 10 ans au lieu de 5 comme dans notre cas, avant de considérer comme valide cette conclusion.

95% des précipitations ont un  $R_{US}$  inférieur à 3 et ne sont quasiment pas érosives. Pour les 5% restants, leur  $R_{US}$  varie de 3 à 16. Ce paramètre a atteint exceptionnellement la valeur de 44 le 16 août 1992 et le 31 juillet 1996.

Wischmeier et Smith (1978) considèrent que seules les pluies de hauteur supérieure à 12,5 mm sont potentiellement érosives. Si l'on considère seulement les pluies de 10 mm, nous obtenons les valeurs suivantes de  $R_{US}$  (pour les seules pluies enregistrées par le pluviographe).

Tableau 4. Comparaison des hauteurs de pluies avec le  $R_{US}$  (données totales annuelles et mesurées à partir du pluviographe).

Année	Hauteur annuelle	Hauteur des pluies $\geq 10$ mm		$R_{US}$ annuel	$R_{US}$ des pluies $\geq 10$ mm		N° de jours
		mm	%		mm	%	
1992	654.4	292.2	45	149.3	117.1	78	17
1993	396.0	233.1	59	55.3	46.6	84	14
1994	594.1	337.3	57	124.4	102.1	82	17
1995	528.6	266.8	51	113.0	92.1	82	15
1996	417.8	235.1	56	117.7	100.9	86	13
92 - 96	518.2	272.9	53	111.9	91.8	82	15

En moyenne 15 pluies seulement par an de plus de 10 mm représentent 50% de la hauteur annuelle des pluies et 80% du  $R_{US}$  annuel et sont responsables de l'érosion (Tableau 4). Parmi celles-ci 3 seulement en moyenne sont fortement érosives. Cependant, le coefficient R calculé sur la base de l'intensité moyenne pendant 30 minutes n'est pas réaliste. Pour une analyse plus fine, il conviendrait de prendre en compte les intensités pendant des périodes plus courtes de 15, 10 et même 5 minutes.

### 2.3.1.6. Relation entre distribution mensuelle de hauteur de pluie, énergie cinétique totale (ECT) et indice d'érosivité des pluies ( $EI_{30}$ ).

Oropeza et al. (1997) montrent une bonne relation entre hauteur mensuelles des pluies et les valeurs correspondantes d'énergie cinétique totale et indice d'érosivité des pluies. En 1994,

le maximum est observé en juillet-août. En 1995 et 1996, un premier pic se détache en juin pendant la première période des pluies, le maximum survient en août pendant la deuxième période des pluies, sans doute la plus érosive où EI30 approche 1 000 MJ/ha\*mm/h.

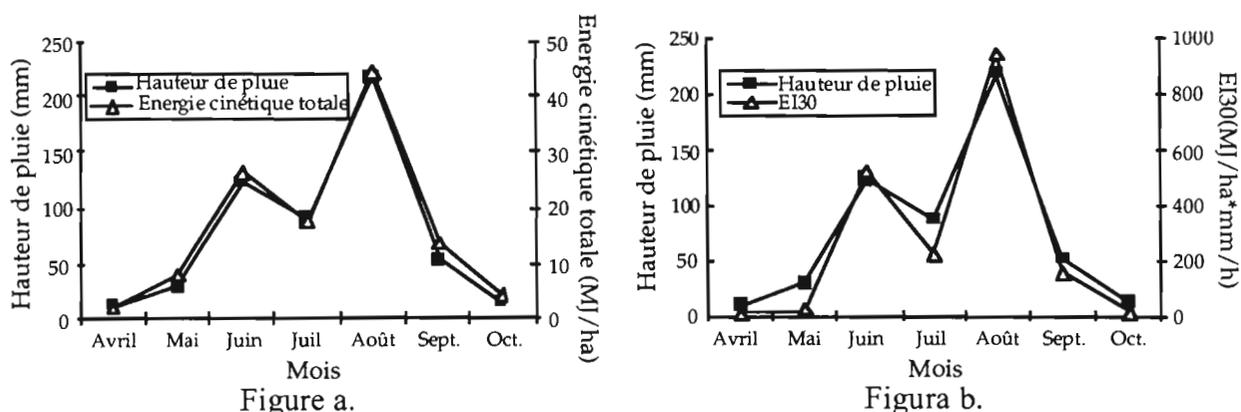


Fig.7. Relation hauteur de pluie (mm) et a) ECt (MJ/ha) et b) EI30 (MJ/ha\*mm/h) en 1995.

### 2.3.2. Stations de El Carmen et de Tlalpan (Tlaxcala)

#### 2.3.2.1. Pluie et érosivité à El Carmen (Tlaxcala)

Les mesures ont été faites de 1991 à 1994 (Baumann et Werner, 1996 ; Fechter et Werner, 1997, rapport final). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tab.5. Hauteur de pluie (P en mm) et érosivité (EI30 en unités US) de 91 à 94 à El Carmen.

Année	1991	1992	1993	1994	1991-1994
P	779	758	642	627	702
EI30 toutes pluies	253	182	289	221	236
EI30 pluies > 12.5 mm	157	110	257	149	168

La hauteur des pluies annuelle et l'érosivité ( $R_{US}$ ) sont en moyenne un peu supérieures aux valeurs observées à San Miguel Tlaxpan. La variabilité inter annuelle existe aussi mais n'est pas dans le même ordre puisque l'année 1993 n'est pas une année sèche à El Carmen. En outre, c'est en 1993 que l'indice d'érosivité est le plus élevé. Il n'y a pas de corrélation entre hauteur des pluies annuelle et indice d'érosivité.

En 1994, il y a eu 102 pluies, une hauteur de 627 mm et un  $R_{US}$  global de 221. 79% des pluies ont une hauteur inférieure à 10 mm et ne représentent que 16% du  $R_{US}$  annuel ; 15% des pluies ont entre 10 et 20 mm et représentent 33% du  $R_{US}$  annuel et enfin 6% des pluies sont entre 20 et 35 mm et représentent 51% du  $R_{US}$  annuel.

Il y a en moyenne 6 pluies érosives par an. Mais c'est à la fois la hauteur des pluies (> 20 mm), leur intensité moyenne et surtout de forts pics d'intensité au cours d'une même pluie qui sont des facteurs d'érosivité. L'événement maximum au cours de ces 4 ans a été une pluie orageuse en 1993 qui représente à elle seule 60% de l'érosivité de l'année. Comme sur les autres stations, la répartition des pluies, de mai à septembre ou octobre, est variable d'une année sur l'autre. En année moyenne, il y a deux maximum en juin et août de hauteur de pluie et d'érosivité. Mais certaines années, en 1992 et 1994, il n'y a eu qu'un maximum et une répartition plus régulière.

#### 2.3.2.2. Pluie et érosivité à Tlalpan (Tlaxcala)

Les mesures ont été faites de 1991 à 1996 (mêmes références qu'à El Carmen). Les résultats sont résumés dans le tableau 6.

Tab. 6. Hauteur de pluie (P en mm), Nombre (N, jours) et érosivité (EI<sub>30</sub> en unités américaines) de 1991 à 1996 à Tlalpan.

Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1991-1996
P	803	793	663	719	602	607	698
N	112	-	-	101	85	95	-
R <sub>US</sub> annuel	376	272	211	434	196	218	285
R <sub>US</sub> annuel P≤12.5 mm	301	196	151	390	-	-	-

La station de Tlalpan ne se différencie pas d'El Carmen par la hauteur moyenne annuelle de pluie, d'environ 700 mm dans les deux cas, ni par le nombre moyen d'averses par an (environ une centaine), ni par la fréquence de pluies de hauteur supérieure à 10 mm (environ 23%), mais par l'érosivité (R<sub>US</sub>) totale annuelle des pluies dont l'indice moyen R<sub>US</sub> de 1991 à 1996 est de 285 au lieu de 236 à El Carmen et près de 150 à San Miguel Tlaixpan.

Comme nous l'avons déjà noté en 1992 (Quantin et al., rapport scientifique final) et comme le constatent à nouveau Baumann et Werner (1996) puis Fechter et Werner (1997), la station de Tlalpan doit son caractère plus érosif à la fréquence plus grande des pluies fortement érosives (hauteur > 50 mm, I<sub>30</sub> > 50 mm/h, R<sub>US</sub> > 50) ou moyennement érosives (hauteur : 20-30 mm, I<sub>30</sub> : 30-50 mm/h, R<sub>US</sub> : 20-50). La fréquence de ces événements à Tlalpan varie de 3 à 6 et proche de 5 en année moyenne, dont 1 à 2 par an fortement érosifs.

Il y a une irrégularité inter annuelle de l'érosivité des pluies. Un maximum de l'indice R<sub>US</sub> d'environ 400 est observé en 1991 et 1994, alors qu'en année moyenne, cette valeur est deux fois moindre. Ce n'est pas la même année qui est fortement érosive : à El Carmen, c'est en 1993 tandis qu'à Tlalpan, c'est en 1991 et 1994 alors qu'à San Miguel Tlaixpan, 1993 est une année exceptionnellement sèche et peu érosive. Donc, la prédiction d'une année très érosive est aléatoire : c'est un phénomène local. A Tlalpan, même en 1996, le même orage à un kilomètre de distance a produit une pluie de 43 mm au lieu de 67 mm avec un indice R<sub>US</sub> de 52 au lieu de 148! Les pluies les plus fortes enregistrées à Tlalpan, 62 mm en 1991 et 67 mm en 1994, ont causé à elles seules respectivement 41% et 34% de R<sub>US</sub> annuel, 51 à 38% de R<sub>US</sub> des pluies supérieures à 10 mm. Ceci souligne l'importance des événements exceptionnels, mais cependant fréquents à Tlalpan à l'échelle d'une décennie. Ce sont eux qui causent la forte variabilité inter annuelle de l'érosivité sur une même station, ou entre deux stations. A Tlalpan, la part des averses de plus de 30 mm dans l'indice R<sub>US</sub> annuel d'érosivité varie de 20 à 50%, bien qu'elles ne représentent que 1 à 4% du nombre de pluies annuel ; ce sont elles la cause majeure de l'érosion. Les pluies de 10 à 30 mm qui représentent 20 à 25% des pluies, sont responsables de 70% de l'indice R<sub>US</sub> en année peu érosive à 45% en année exceptionnelle ; leur part dans l'érosion sera faible à modérée. Les pluies inférieures à 10 mm, qui représentent 75 à 80% des pluies, ne contribuent que pour 20% de l'indice R<sub>US</sub> en année peu érosive à seulement 5 à 7% en année exceptionnelle, leur part dans l'érosion sera quasi nulle ou très faible.

## 2.4. RUISSELLEMENT ET EROSION

### 2.4.1. Station de San Miguel Tlaixpan (Edomex)

#### 2.4.1.1. Parcelles de type Wischmeier.

Les résultats de 1991 (Quantin et al., 1992, rapport scientifique final) avait montré que le taux de ruissellement pour les 3 pluies les plus intenses (hauteur de 19 à 34,5 mm, I<sub>30</sub> de 24 à 28 mm/h), le taux de ruissellement atteignait près de 80% sur tepetate nu, 45% sur tepetate roturé nu, 12% sur tepetate roturé et billonné à nu, 5% seulement sur le même traitement planté en maïs et 12% sur le sol naturel labouré, billonné et planté ou non en maïs. La perte en terre annuelle en 1991 avait été d'environ 5 t/ha pour le tepetate nu ; 22 t/ha pour le tepetate roturé et labouré sans billon et nu ; mais seulement 1 à 1,2 t/ha pour le tepetate roturé et billonné, avec ou sans maïs ; 1,1 à 1,8 t/ha pour le sol labouré et billonné avec ou sans maïs. Il y avait donc une certaine indépendance entre ruissellement et érosion, d'autre part un effet significatif du billonnage sur le contrôle du ruissellement et surtout de l'érosion.

Pour contrôler l'impact des façons culturales sur le ruissellement et l'érosion en tepetate cultivé, de 1994 à 1996 huit traitements ont été comparés : T1 roturé avec sarclage et filet, nu ; T2 roturé sans sarclage, avec filet, nu ; T3 roturé avec sarclage, sans filet, nu ; T4 roturé sans sarclage ni filet, nu ; T5a roturé sans sarclage, avec culture de blé avec fumier ; T5b roturé sans sarclage, avec culture de blé sans fumier ; T6 tepetate naturel nu, sans filet ; T7 tepetate naturel nu, avec filet.

Le but était de comparer le tepetate naturel et le tepetate cultivé nu, avec ou sans protection par un filet ou par le couvert du blé ; mais sans billonnage. Les résultats moyens par traitement du ruissellement et de l'érosion sont montrés dans le tableau suivant.

Tableau 7. Ruissellement Kr et Érosion E en fonction des 8 traitements sur les parcelles de type Wischmeier de 1994 à 1996.

Traitement	Ruissellement Kr (1) %				Érosion E t/ha/an			
	1994	1995	1996	94-96	1994	1995	1996	94-96
T1	5.3	23.2	28.8	19.1	5.7	11.5	16.4	11.2
T2	20.3	30.0	27.0	25.8	8.5	15.2	12.9	12.2
T3	15.0	39.9	31.8	28.9	12.8	35.3	46.7	31.6
T4	18.3	44.9	36.1	33.1	13.3	24.6	30.3	22.7
T5a	11.4	18.1	16.4	15.3	1.5	2.3	2.5	2.1
T5b	14.4	23.1	10.4	16.0	4.2	2.9	2.7	3.3
T6	14.8	50.3	28.8	31.3	8.2	14.9	21.0	14.7
T7	16.7	38.1	41.1	32.0	3.6	7.5	6.2	5.7

(1) Kr en % des pluies enregistrées : 1994 : 623 mm ; 1995 : 511 mm ; 1996 : 518 mm.

Ces valeurs moyennes masquent une variabilité importante des résultats entre parcelles d'un même traitement (Oropeza et al., rapport final, 1997). Ainsi le facteur de variation extrême d'une parcelle peut atteindre 2 pour les traitements T1 et T5 et même 3 pour T6 sur tepetate naturel. Ceci semble dû à un facteur stationnel non déterminé. Cela réduit la précision des valeurs moyennes, puisqu'il n'y a que 3 voire 2 (en T5 et T5b) répétitions. Cependant dans l'ensemble les valeurs moyennes sont comparables avec les données antérieures ou des mesures faites sur le bloc expérimental en terrasses de type paysan ou sur d'autres stations.

#### A. Comparaison des résultats de 1994-1996 à ceux de 1991.

Sur tepetate naturel le taux de ruissellement de 80% sur 3 fortes pluies en 1991 ne peut être comparé aux valeurs annuelles de 1994-96 (de 30 à 50% en 1995 et 1996), car les pluies peu intenses s'infiltrent dans les fentes et ruissellent très peu. En revanche le taux d'érosion moyen de 15 t/ha de 1994 à 1996 (en T6) est 3 fois supérieur à celui de 1991 qui avait été mesuré sur une parcelle de 6 m<sup>2</sup> au lieu de 44 m<sup>2</sup>. Ce taux est un peu inférieur aux 22 t/ha obtenues en moyenne pour la même période sur une grande parcelle de 1 800 m<sup>2</sup>. Il y a probablement un facteur longueur qui amplifie l'érosion.

Sur tepetate roturé à nu et non billonné (en T4) les taux de ruissellement et d'érosion obtenus en 1995 et 1996, respectivement de 45 à 36% et de 25 à 30 t/ha, sont comparables à ceux mesurés en 1991 (45% et 22 t/ha).

Sur tepetate cultivé en blé (T5) les taux moyens de ruissellement et d'érosion sur 3 ans, respectivement de 15 à 16% et de 2 à 3 t/ha sont significativement supérieurs à ceux obtenus sur une culture de maïs en billon en 1991 (5% et 1 t/ha) ; ceci est dû probablement à l'effet anti-érosif du billonnage.

#### B. Évolution des résultats de 1994 à 1996

Il y a un fort accroissement des taux moyens de ruissellement et d'érosion de 1994 à 1995, puis stabilisation en 1996. Ceci, notamment sur tepetate naturel, ne peut s'expliquer par une forte augmentation de l'érosivité des pluies. Dans le cas du tepetate roturé à nu cela pourrait être dû à une dégradation de la stabilité des agrégats. Les valeurs des années 1995 et 1996 semblent plus significatives que celles de 1994.

### C. Comparaison des traitements sur tepetate roturé et labouré à nu (T1 à T4)

L'effet protecteur du filet est toujours positif, qu'il y ait eu sarclage pour entretenir l'état de surface ou non. Donc il atténue l'effet "splash" des fortes pluies. Le taux de ruissellement est réduit de 22% sans sarclage à 34% avec sarclage (en valeur relative du traitement sans filet) ; le taux d'érosion diminue plus fortement, de 46% sans sarclage à 64% avec sarclage.

L'effet du sarclage (en valeur relative du traitement sans sarclage) est ambigu. Avec filet il diminue sensiblement le ruissellement de 26%, mais très peu et pas significativement l'érosion. Sans filet le ruissellement diminue de 13% seulement (peu significatif), mais augmente de 39% le taux d'érosion. Donc le sarclage accroît l'instabilité des agrégats sous l'effet splash.

### D. Comparaison des traitements sur tepetate cultivé en blé

Il y a un effet très positif de la couverture du blé cultivé sans fumier ni sarclage (T5b) par rapport au tepetate roturé et couvert d'un filet (T2). Le taux de ruissellement est réduit relativement de 38% et surtout l'érosion de 72%. L'effet passif d'un filet sur l'énergie des pluies est moindre qu'un bon couvert végétal.

L'effet d'un apport de fumier (T5a/T5b) est peu sensible et non significatif sur le ruissellement, faible sur le taux d'érosion.

### E. Comparaison des traitements sur tepetate naturel

L'effet d'un filet (T70) est nul sur le taux de ruissellement, qui en 1995 et 1996 avoisine 40%. Mais il réduit fortement le taux d'érosion de près de 60% par rapport au témoin (T6). Il y aurait donc aussi sur tepetate naturel diminution de l'effet splash.

Relativement au tepetate naturel (T6) la roturation du tepetate (T4) sans filet ne réduit pas sensiblement le taux de ruissellement, mais augmente fortement, de 55% en valeur relative, le taux d'érosion ; donc l'instabilité du matériau.

### F. Évolution mensuelle des taux de ruissellement et d'érosion.

Au cours des 3 années il y a toujours eu le maximum de pluies, de ruissellement et d'érosion en août ; les pluies érosives augmentent progressivement de juin à août puis se réduisent brusquement en septembre. Cependant en 1995 et 1996 et en année moyenne il y a un premier maximum en juin suivi d'une accalmie en juillet (cf. figure suivante en 1995).

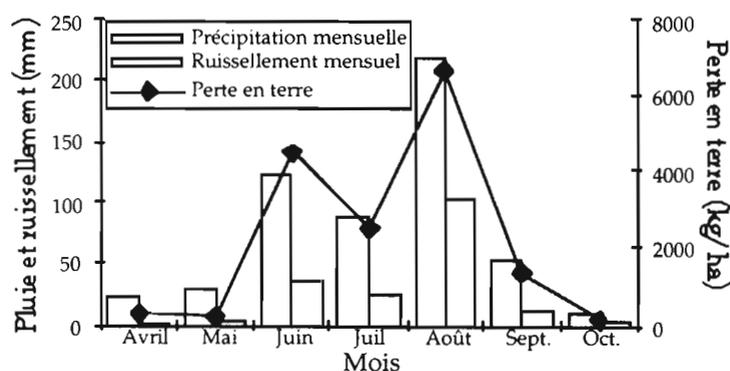


Fig. 8. Moyennes mensuelles de pluie (mm), ruissellement (mm) et perte en terre (kg/ha) en 1995.

### G. Effet de l'érosion sur les pertes en nutriments N et P.

Nous ne traiterons pas des résultats présentés dans le rapport final de Oropeza et al. (1997) car les pertes en N et P des tepetates naturels sont trop élevées (d'un facteur 10) par rapport à la teneur de ces matériaux. De plus, les valeurs des autres traitements sont aléatoires et sans relation constante avec les taux de ruissellement et de sédiments. Ces résultats devraient être vérifiés avant publication.

### 2.4.1.2. Terrasses de type paysan.

Les résultats ont été présentés par Prat et al. (rapport final 1997) et rédigés avec la participation de leur auteur.

L'expérimentation comporte essentiellement une large parcelle de 1 800 m<sup>2</sup> de tepetate naturel (T0), cinq terrasses à pente réduite de tepetate cultivé (T2 à T6) et une terrasse à pente régularisée de sol naturel (T7). Les principaux facteurs testés sur tepetate cultivé sont : profondeur du défonçage, 60 cm en T2, au lieu de 40 cm ; texture plus fine et pente plus réduite en T5 ; monoculture en T3, ou culture associée ailleurs ; apport de fumier en T4, ou fumure minérale ailleurs ; culture à plat d'orge en 1993 et 1996, ou de maïs avec sarclage et billonnage en 1994 et 1995 ; billonnage simple en T6 ou cloisonné ("contreo") en T5 en 1996.

L'ensemble des mesures de ruissellement (Kr en % des pluies ruisselées) et d'érosion (Eros. en t/ha), en moyennes mensuelles et annuelles de 1993 à 1996, est présenté tableau 8.

Nous traiterons successivement de la fréquence des pluies ruisselées en fonction des traitements et des années, du taux de ruissellement puis du taux d'érosion en fonction des traitements et des années, de l'analyse du processus de sédimentation en fonction de la fréquence des pluies ruisselées et du taux de ruissellement, de l'incidence des rebords de terrasse sur l'érosion, de l'évolution des états de surface et de leur impact sur l'érosion, une brève comparaison avec les parcelles de Wischmeier et quelques conclusions pratiques.

#### A. Fréquence des pluies ruisselées

La fréquence mensuelle des pluies ruisselées a été calculée en somme des années 1993 à 1996 pour pondérer la variabilité interannuelle. La figure 9 montre la particularité de chaque terrasse et l'effet de certains traitements. Il y a trois groupes : T0 ; T2 et T3 ; T4, T5, T6 et T7.

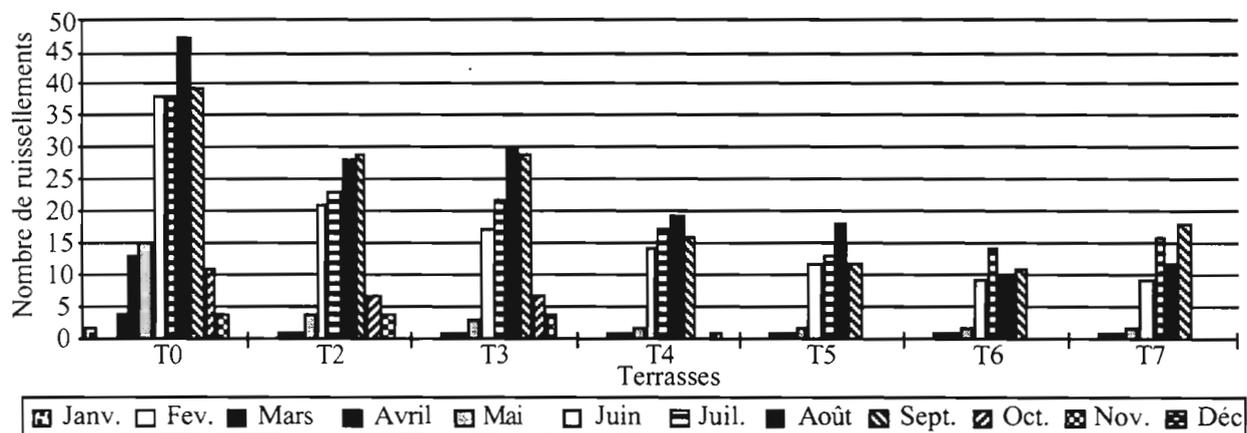


Figure 9. Nombre de ruissellements mensuels par terrasses (1993 à 1996).

Sur le tepetate naturel T0, la fréquence des pluies ruisselées est très élevée de juin à septembre ; mais les pluies ruissellent aussi en mars, avril, mai, octobre et novembre. Donc la majeure partie des pluies (près de 75%) ruissellent, car la vitesse d'infiltration est très faible.

Sur les terrasses T2 et T3, la fréquence des pluies ruisselées est 2 fois moindre (30 à 35% des pluies) que sur le tepetate naturel. Elles se produisent surtout de juin à septembre ; elles sont rares en mai, octobre et novembre. Cependant les deux terrasses ruissellent plus fréquemment et fortement que les autres sur tepetate cultivé. Cette différence suggère un facteur stationnel indépendant des traitements testés, qui n'avait pas été déterminé ni prévu dans le protocole expérimental.

Les terrasses T4, T5 et T6 se distinguent peu de la T7 en sol cultivé. L'aptitude au ruissellement du tepetate cultivé est donc peu différente du sol naturel cultivé. La fréquence observée est d'environ 15% des pluies sur les terrasses T5, T6 et T7, mais près de 20% en T4. Les pluies ruissellent presque uniquement de juin à septembre, rarement en mai.

Le nombre de pluies ruisselées est en moyenne de 10 sur les terrasses T4 à T7 ; il dépasse 20 sur T2 et T3 et 60 sur le tepetate naturel.

B. Comparaison du taux de ruissellement (Kr) en fonction des traitements

Tableau 8. Pluie (mm), érosion (Eros., t/ha) et coefficient de ruissellement (Kr, %) en moyenne mensuelles et annuelles de 1993 à 1996.

Mois	Pluie mens. mm	T0		T2		T3		T4		T5		T6		T7	
		Kr %	Eros t/ha												
Janv.	4.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fév.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mars	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avril	14.0	23.0	0.471	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mai	16.6	1.8	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Juin	98.2	33.4	1.558	9.2	0.388	3.4	0.131	0.2	0.014	0.6	0.039	0.7	0.011	-	-
Juil.	106.0	31.9	3.491	16.7	3.948	13.4	0.649	11.0	1.092	5.6	0.597	7.1	0.494	9.2	0.429
Aout	712.4	32.0	1.821	18.2	0.992	8.3	0.091	3.8	0.069	3.7	0.059	3.8	0.104	2.6	0.090
Sept.	84.9	12.7	1.196	8.4	0.484	5.3	0.101	2.3	0.085	1.9	0.060	1.5	0.024	1.4	0.034
Oct.	14.2	18.4	0.125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Déc.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	411.0	27.2	8.66	13.2	5.81	7.9	0.97	4.7	1.26	3.0	0.76	4.0	0.63	4.9	0.55
Janv.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fév.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mars	40.0	62.4	2.148	*	0.125	*	0.010	0.2	0.005	0.9	0.009	1.5	0.010	0.8	0.010
Avril	23.3	31.7	0.437	17.1	0.032	4.6	0.008	0.3	0.006	1.0	0.006	0.9	0.003	0.5	0.001
Mai	49.2	41.2	1.163	40.1	0.564	12.0	0.230	6.8	0.117	23.7	0.271	8.7	0.151	0.2	0.001
Juin	111.5	31.5	3.317	21.6	1.321	28.2	0.874	7.4	0.293	3.5	0.161	7.7	0.182	0.4	0.013
Juil.	184.2	61.6	10.497	52.3	10.064	57.6	6.615	47.0	2.275	26.6	0.655	35.2	1.245	0.9	0.047
Aout	212.8	56.3	8.172	23.7	2.143	34.6	3.197	6.4	0.392	4.6	0.188	1.6	0.031	0.6	0.003
Sept.	85.7	53.6	2.737	26.4	1.246	37.4	1.019	15.4	0.603	9.7	0.114	2.9	0.006	1.7	0.012
Oct.	26.9	32.6	0.406	7.4	0.012	13.1	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Déc.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1994	735.6	50.7	28.88	31.2	15.51	38.6	11.96	17.3	3.69	10.3	1.40	13.3	1.63	0.8	0.09
Janv.	28.8	23.3	0.034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fév.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mars	12.7	12.3	0.086	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avril	14.6	4.4	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mai	60.9	12.7	0.303	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Juin	117.6	56.0	4.446	48.5	2.769	31.0	0.934	19.4	0.287	13.0	0.340	5.7	0.169	0.1	0.004
Juil.	85.2	32.2	1.888	56.2	1.252	44.8	0.629	28.3	0.302	15.4	0.155	7.3	0.100	-	-
Aout	206.0	47.9	9.941	29.4	3.258	48.6	2.021	20.6	0.889	13.6	0.500	2.4	0.027	0.3	0.008
Sept.	49.1	23.8	0.842	8.1	0.086	11.1	0.102	-	-	-	-	-	-	-	-
Oct.	61.0	32.8	1.880	16.7	0.287	18.9	0.217	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	64.4	33.4	1.029	17.2	0.264	12.2	0.183	-	-	0.5	0.004	-	-	-	-
Déc.	68.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1995	768.3	37.9	20.46	29.4	7.92	29.3	4.09	21.3	1.48	11.2	1.00	5.1	0.30	0.2	0.01
Janv.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fév.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mars	11.7	58.8	0.292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avril	32.5	80.4	1.124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mai	32.0	47.9	0.886	17.5	0.175	53.9	0.171	-	-	-	-	-	-	-	-
Juin	101.0	55.2	3.476	68.7	2.055	69.4	7.546	29.2	0.991	0.2	0.003	26.7	0.341	60.9	4.052
Juil.	121.0	52.8	4.159	53.4	4.119	54.1	2.593	38.9	0.44	10.6	0.094	31.4	0.369	26.9	0.486
Aout	77.5	27.9	0.786	33.4	0.731	31.1	0.559	9.1	0.012	-	-	-	-	13.1	0.087
Sept.	172.0	56.8	7.254	56.8	3.942	61.4	2.798	27.9	0.196	0.8	0.019	3.7	0.125	23.7	0.372
Oct.	35.0	26.0	0.193	6.0	0.018	5.1	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Déc.	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	582.7	53.3	18.17	49.7	11.04	53.4	13.67	30.3	1.64	4.0	0.12	18.5	0.83	29.8	5.00

Le Kr est calculé sur la base des précipitations ayant engendrées un ruissellement et non sur la pluviométrie totale.

Le tableau des résultats (Tab. 8) nous montre de fortes variations entre traitements d'une part ; en moyenne mensuelle ou annuelle d'autre part pour chaque traitement.

D'une manière générale on retrouve la distinction en 3 groupes : T0 - T2 et T3 - T5, T6 et T7 mais T4 a une position intermédiaire entre T5 et T3. L'année 1993, première année de mise en culture et année beaucoup moins pluvieuse, présente des taux de ruissellement 2 à 3 fois inférieurs aux autres années, que l'on peut considérer comme normales.

Ce taux de ruissellement est rapporté à la hauteur de pluie mesuré pendant la saison agricole, non de l'année entière. Le taux annuel réel est donc légèrement inférieur. Ainsi sur la parcelle T0, il est de 25,1 en 1993, 47,2 en 1994, 33,5 en 1995 et 44,4 en 1996, soit une moyenne de 38% de 1993 à 1996 et de 42% de 1994 à 1996.

Sur le tepetate naturel T0, le taux moyen de ruissellement annuel de 1993 à 1996 est d'environ 43% ; mais sur les 3 années normales de 1994 à 1996 il approche 47%. Ce taux varie d'un facteur 2 entre l'année sèche de 1993 (26,9%) et 1996 (53,3%), année marquée par des pluies de forte intensité. Les valeurs moyennes mensuelles varient très fortement au cours d'une même année et pour le même mois d'une année à l'autre, en relation avec l'irrégularité de la distribution des fortes pluies. En 1993 un taux moyen maximum proche de 30% seulement a été mesuré de juin à août. En 1994 un taux moyen maximum proche de 60% a été observé en mars, juillet et août, puis de 50% en septembre. En 1995 il n'y a eu que deux taux moyens maximum proche de 50% en juin et août. En 1996, il y a eu un maximum de 80% en avril et cinq mois à taux de 50 à 60% en mars, mai, juin, juillet et septembre ; soit 6 mois de pluies de forte intensité.

Sur les terrasses cultivées en 1993 (en orge, avec un seul labour à plat), les taux de ruissellement annuel sont faibles à modérés ; ils varient de 3 à 13% soit 9 à 2 fois moins que sur tepetate naturel. Les terrasses T2 et T3 ont cependant des taux 2 à 3 fois plus élevés que les autres dès la première année de culture. Il y a peu de différence entre autres terrasses. Le taux est de 3 à 5% sur tepetate et de 5% sur sol naturel.

Sur les terrasses cultivées en 1994 et 1995, années pluvieuses normales, en culture de maïs avec sarclage et billon, les taux annuels de ruissellement sont 2 à 3 fois plus élevés qu'en 1993 sur l'ensemble des tepetates cultivés (T2 à T6). Mais il n'y a quasiment pas eu de ruissellement sur la terrasse de sol cultivé ; cette anomalie pourrait s'expliquer par l'effet d'un sous-solage profond (50 cm) sur cette seule parcelle en 1994. Les deux terrasses T2 et T3 ont produit les taux les plus élevés ; 31 à 38% en 1994, 29% en 1995. Tandis que sur les terrasses T5 et T6 les taux demeurent faibles, de 10 à 13% en 1994, 11 à 5% en 1995. Mais sur la terrasse T4, le taux de ruissellement augmente progressivement à 17 puis 21% en 1994 et 1995.

Cette évolution distincte d'une terrasse à l'autre ne semble pas liée à l'effet des divers traitements, mais plutôt à un facteur stationnel non déterminé et aléatoire.

Sur les terrasses cultivées en 1996, année de pluies particulièrement intenses pendant 6 mois, cultivées en orge et à plat (T2, T3, T4 et T7), les taux de ruissellement ont été élevés sur l'ensemble des terrasses de tepetate : de 50 à 53% en T2 et T3, 30% en T4 et aussi sur sol naturel : 30% en T7. En revanche les terrasses T5 et T6 cultivées en maïs avec billon ont eu un taux de ruissellement significativement inférieur : 18% en T6 avec billonnage traditionnel, 4% seulement en T5 avec billons cloisonnés (contreo).

Ceci nous montre les faits suivants :

1. Le facteur stationnel "plus ruisselant" persiste en T2 et T3. Dans ce cas la monoculture ne se distingue pas de la culture associée, ni la profondeur du tepetate ameubli ;
2. La culture à plat d'orge produit le même effet sur tepetate en T4 que sur sol naturel en T7 ;
3. La culture de maïs en billon traditionnel en T6 réduit significativement le taux de ruissellement par rapport à la culture d'orge à plat ;
4. Le billon cloisonné en T5 réduit très fortement le ruissellement (et donc améliore l'infiltration) par rapport au billon traditionnel ;
5. L'apport de fumier en T4 n'améliore pas la stabilité des agrégats et l'infiltration ; au contraire le taux de ruissellement augmente progressivement de 1993 à 1996 ; peut-être en raison de la dose modérée de l'apport (13 t/ha/an en poids sec) ;

6. Les effets de la profondeur du défonçage (60 ou 40 cm), de la texture plus fine et d'une pente plus réduite ou d'une monoculture par rapport à la culture associée, n'ont pas été discriminés.

### C. Comparaison du taux d'érosion en fonction des traitements.

Le tableau de résultats (Tab.8) montre une relation apparente entre le taux d'érosion et le taux de ruissellement, bien qu'il n'y ait pas de corrélation étroite entre ces deux paramètres (car le taux de ruissellement n'exprime pas l'énergie cinétique globale). Ceci nous amène à des remarques semblables à celles déjà exposées à propos du taux de ruissellement.

Le graphique (Fig. 9) des pertes en terre annuelles pour chaque terrasse montre les faits majeurs suivants : l'année 1993 a été peu érosive. En année normale (1994 à 1996), c'est sur le tepetate naturel (22 t/ha en moyenne) et dans une moindre mesure sur les terrasses T2 et T3 (10 à 11 t/ha en moyenne) que le taux d'érosion a été le plus élevé, tandis que ce taux demeurerait faible (1 à 2 t/ha) sur les autres terrasses de tepetate ou de sol cultivé.

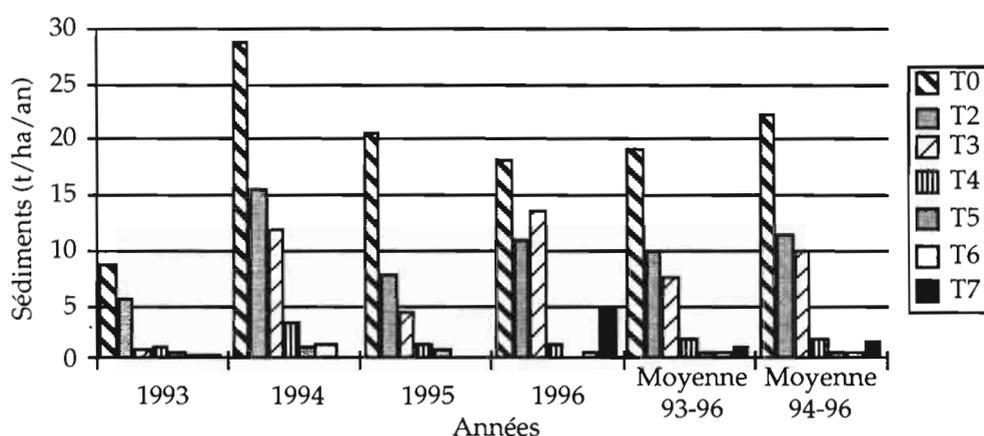


Figure 10. Perte en terre (t/ha) de 1993 à 1996 sur tepetate naturel (T0), sur terrasses de tepetate cultivé (T2 à T6) et de sol en place (T7).

Une analyse plus détaillée des résultats en valeurs mensuelles et annuelles nous conduit aux remarques suivantes :

#### C1. Tepetate naturel (T0)

Sur tepetate naturel (T0), le taux annuel d'érosion a été de 9 t/ha en 1993, 29 t/ha en 1994, 20 t/ha en 1995, 18 t/ha en 1996, soit une moyenne de 22,5 t/ha pour les 3 années normales de 1994 à 1996. Ce taux est plus élevé que celui mesuré en petite parcelle en 1991 (5 t/ha) mais comparable à celui obtenu en 1995 (15 t/ha) et 1996 (21 t/ha) sur les parcelles de type Wischmeier. Ce taux élevé d'érosion est à première vue étonnant sur un matériau aussi dur que le tepetate naturel. Il s'explique par l'importance et l'énergie de la lame d'eau ruisselée qui ne provoque pas seulement une érosion laminaire en surface, mais aussi une érosion linéaire en profondeur.

#### C2. Tepetate cultivé (T2 et T3)

Sur les terrasses T2 et T3 de tepetate cultivé, les taux relativement élevés d'érosion : 15 à 12 t/ha en 1994, 8 à 4 t/ha en 1995, 11 à 14 t/ha en 1996, soit 11,5 à 9,9 t/ha de 1994 à 1996, sont en bonne relation avec des taux élevés de ruissellement. Ils pourraient s'expliquer par une stabilité des agrégats de tepetate moins bonne que sur les autres terrasses, et en conséquence, d'un rapide encroûtement superficiel entraînant une vitesse d'infiltration restreinte. Ces taux sont comparables à ceux obtenus en parcelles de type Wischmeier de tepetate cultivé avec un simple couvert de filet pour réduire l'effet splash (11 à 12 t/ha).

L'impact de la monoculture sur la terrasse T3 de maïs en 1994 et 1995 puis d'orge en 1996 ne se distingue pas de la culture associée en T2.

L'impact de culture de maïs avec billon ne se distingue pas de celle d'orge avec labour à plat, si l'on compare les années 1994 et 1996 dont l'érosivité globale annuelle des pluies était très voisine ( $R_{us}$  de 124 et 118). Sur ces deux terrasses, l'instabilité particulière des agrégats de tepetate a sans doute compromis la stabilité et l'efficacité des billons. En revanche, en 1995, année moins érosive, l'effet des billons a été plus stable, réduisant le taux d'érosion à 7,9 t/ha et 4,1 t/ha en T2 et T3 puis d'orge en 1996 ne se distingue pas de la culture associée en T2.

Ce taux élevé d'érosion est à première vue étonnant sur un matériau aussi dur que le tepetate naturel. Il s'explique par l'importance et l'énergie de la lame d'eau ruisselée qui ne provoque pas seulement une érosion laminaire en surface, mais aussi une érosion linéaire en profondeur.

### C3. Tepetate cultivé (T4, T5 et T6)

Sur les terrasses T4 à T6 de tepetate cultivé en maïs avec billon, le taux d'érosion demeure faible : entre 0,3 et 3,7 t/ha en 1994 et 1995 sur les 3 terrasses et en 1996 sur la seule T6. La bonne stabilité des billons permet un contrôle efficace de l'érosion. Dans ces conditions, l'impact d'une texture plus fine et d'une pente réduite en T5 n'est pas sensible. L'effet d'un apport de fumier en T4 n'est pas non plus significatif, bien que contrairement à notre attente, les taux moyens de ruissellement et d'érosion en 1994 et 1995 soient deux fois plus élevés en T4 qu'en T5 et T6 (Kr 19 au lieu de 10 ; Eros 2,6 au lieu de 1,1 t/ha/an). La fumure organique n'a pas été efficace de ce point de vue.

L'effet du billonnage cloisonné ("contreo") en 1996, année particulièrement érosive, a été très efficace en T5 puisqu'il a réduit de 18 à 4% le taux de ruissellement et de 0,8 à 1 t/ha le taux d'érosion. Il permet l'infiltration quasi totale des pluies et du ruissellement entre les billons. Les terrasses T5 et T6 ayant un comportement homogène, ce résultat est significatif.

La culture à plat d'orge en 1996 sur la terrasse T4 malgré un taux élevé de ruissellement de 30%, en cette année particulièrement érosive n'a produit qu'un faible taux d'érosion (1,6 t/ha). Ceci confirme la bonne stabilité des agrégats de tepetate sur cette parcelle et l'efficacité du couvert de l'orge. Ce résultat est comparable à celui obtenu de 1994 à 1996 en parcelles de type Wischmeier (3,3 t/ha sans fumier, 2,1 t/ha avec fumier).

### C4. Tepetate cultivé (T7)

Sur la terrasse T7, en sol naturel, l'effet de la culture de maïs avec billon en 1994 et 1995 n'a pu être mesuré puisque le résultat est quasi nul (en raison notamment d'un facteur non prévu dans le protocole).

Seul l'impact de la culture d'orge avec labour à plat a été mesuré. En 1994, première année de culture et en régime de pluies peu érosives, le sol naturel ne se distingue pas du tepetate cultivé sur les terrasses T4, T5 et T6 ni par le taux de ruissellement (4,9%) ni par celui d'érosion (0,5 t/ha) également très faible.

En 1996, quatrième année de culture et en pluies particulièrement érosives, le sol naturel ne se distingue pas du tepetate cultivé de la terrasse T4 par le taux de ruissellement voisin de 30% et également élevé dans les 2 cas, mais par un taux d'érosion de 0,5 t/ha, un peu plus élevé qu'en T4 (1,6 t/ha) et cependant modéré. Ceci signifierait une moins bonne stabilité des agrégats du sol naturel, fait déjà observé lors du suivi de l'évolution des états de surface (Jérôme, 1992).

## *D. Comparaison du taux de sédiments en suspension en fonction des traitements.*

Le taux de sédiments en suspension, en pourcentage du poids total de matériaux solides érodés est en relation avec la charge solide des eaux de ruissellement. Il exprime l'aptitude du tepetate ou du sol, à libérer sa fraction fine qui passe en suspension sous l'énergie des gouttes de pluie. Cette aptitude est dépendante de la stabilité des agrégats et du couvert végétal. D'autre part, l'importance relative du taux de sédiments en suspension qu'indique la prédominance de la "fonte" des agrégats sous l'effet direct de la pluie et d'une érosion laminaire et sélective des particules fines, se distingue de la prédominance des sédiments grossiers qui est due à l'érosion

brutale des matériaux, laminaire et linéaire sous l'effet des flux engendrés par le ruissellement. Le tableau suivant (Tab. 9) rassemble les valeurs moyennes annuelles de 1993 à 1996 mesurées sur les différentes terrasses.

De ces résultats, il ressort clairement deux groupes : sur le tepetate naturel T0, un faible pourcentage de sédiments en suspension (un peu plus de 30% en année moyenne) indique la prédominance d'une érosion globale et linéaire sous l'effet d'un fort ruissellement. Sur toutes les terrasses cultivées, de tepetate et de sol naturel, c'est au contraire l'effet direct de l'énergie des pluies qui prédomine et génère une érosion sélective des particules fines. Ce pourcentage est plus élevé (70%) les années les plus érosives (1994 et 1996) quand le taux de ruissellement augmente, à l'inverse des années peu érosives (1993) où il est en moyenne de 50%. Il est donc dépendant de l'intensité et de l'énergie des pluies. Il n'y a pas la même année en 1993, 1994 et 1995, de différence hautement significative entre les traitements car le processus érosif initial est le même pour tous. Seul change ensuite le volume ruisselé et transporté en fonction de l'aptitude de chaque terrasse à infiltrer et retenir le ruissellement et les sédiments.

Tableau 9. Pourcentage de sédiments en suspension (par rapport au poids total de sédiments) de 1993 à 1996.

Année	Terrasses							Culture
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
1993	38	52	57	53	44	46	48	Orge
1994	36	59	66	76	50	77	0	Maïs
1995	12	56	59	66	59	53	0	Maïs
1996	40	67	68	90	81*	80*	67	Orge / Maïs*
Moy. 93 à 96	34	60	67	71	53	64	28	
Moy. 94 à 96	29	61	64	77	63	70	38	
Moy. 93+96	39	60	64	71	-	-	57	Orge
Moy. 94+95	24	58	62	71	55	65	0	Maïs

#### E. Effet des talus entre les terrasses.

Pour évaluer l'incidence du talus laissé à nu et qui sépare les terrasses T2 et T3, les surfaces du versant amont (VT2, 27 m<sup>2</sup>) au pied de la terrasse T2 et du versant aval (VT3, 115 m<sup>2</sup>) en haut de la terrasse T3 ont été délimités. Les sédiments ont été mesurés dans le canal au pied de chaque versant et dans les cuves correspondantes à l'exutoire. Le sédiment retenu dans le canal ne représente que 2% du total. Les résultats exprimés en t/ha sont présentés dans le tableau suivant et comparés à ceux du tepetate naturel T0 et des deux terrasses T2 et T3.

Tableau 10. Érosion (t/ha/an) sur les versants du talus entre T2 et T3 (1993 à 1996).

Année	Terrasses				
	T0	T2	VT2	VT3	T3
1993	8.7	5.8	9.3	8.7	1.0
1994	28.9	15.5	21.3	35.0	12.0
1995	20.5	7.9	14.7	18.1	4.5
1996	18.2	11.0	9.0	7.9	13.7
Moy. 93 à 96	19.1	10.1	13.6	18.2	7.8
Moy. 94 à 96	22.5	11.5	15.0	20.0	10.0

Le taux d'érosion sur le talus sont du même ordre de grandeur que sur tepetate nu, du moins pendant les trois premières années, puis se réduisent en quatrième année. Si ces versants du talus n'étaient pas séparés de la terrasse, leur contribution à la mesure de l'érosion sur la terrasse respective ne serait pas négligeable à savoir en moyenne sur 4 ans :

VT2 + T2 : 7% de sédiments en plus, taux d'érosion 10,2 au lieu de 10,1 t/ha soit 1% de plus.

VT3 + T3 : 33% de sédiments en plus, taux d'érosion 9,0 au lieu de 7,8 t/ha soit 15% de plus.

Cette observation a un double intérêt : l'impact des talus sur la mesure de l'érosion doit être pris en compte et les talus devraient être enherbés ou plantés pour réduire cette érosion.

#### *F. Impact des états de surface et de leur évolution sur l'érosion.*

Une étude précédente portant sur l'étude des états de surface a été réalisée sur des parcelles de type Wischmeier de tepetate nu et cultivé en maïs en billons en 1991 à l'aide d'un rugosimètre (Jérôme, 1992). Ce travail a été résumé dans le rapport scientifique du premier programme sur les tepetates (Quantin et al., 1992).

Les conclusions majeures étaient les suivantes : il y a toujours formation de croûtes superficielles, successivement structurales et d'érosion puis de ruissellement et de décantation (Selon la terminologie de Casenave et Valentin, 1989). C'est cet encroûtement qui réduit l'infiltration et déclenche le ruissellement et l'érosion. L'encroûtement est conséquent d'une dégradation des agrégats sous l'impact des pluies les plus intenses. C'est la "fonte" des agrégats de tepetate inférieurs à 2 mm qui cause la redistribution des particules fines et l'encroûtement. Cette évolution est lente au début de la saison agricole, puis s'accélère d'autant plus que le sol est à nouveau travaillé (sarclage et buttage). Le sarclage et le buttage traditionnel du maïs est à la fois positif en détruisant les croûtes et en contenant le ruissellement et l'érosion, mais aussi négatif en augmentant les agrégats fins, en accélérant leur destruction et la formation de nouvelles croûtes. En outre, ce traitement n'est efficace que en dessous d'un certain seuil d'intensité des pluies qui dépend de la vitesse d'infiltration et de la stabilité des agrégats, sinon les billons se rompent et perdent leur efficacité.

Les trois études faites au cours de ce deuxième programme (Leroux, 1995 ; Lauffer, 1996 ; Prat, 1996) ont confirmé et précisé les précédentes observations. En effet celles-ci ont porté sur différents types de culture, pendant 3 ans et ont associées mesures de la rugosité du sol à celles de la couverture végétale, mais aussi à des observations des états des billons aux résultats d'érosion par terrasses.

En début de saison agricole, c'est à partir d'une énergie cinétique cumulée des pluies de 560 J/m<sup>2</sup> (en 1995) que sont apparues les croûtes de ruissellement et de décantation, c'est à dire quand les croûtes structurales et d'érosion sont déjà largement développées sur les billons. C'est le moment où l'on mesure le plus fort taux de ruissellement et où les billons commencent à se raviner et à se rompre lors de fortes pluies.

La couverture de maïs et fève associés est bénéfique à partir d'un développement suffisant des plantes. Le feuillage de la fève est efficace pour intercepter les gouttes de pluies et dissiper l'énergie qu'elles portent, réduisant ainsi la formation de croûtes de battance. Par contre, le port du maïs concentre la pluie le long de la tige ("stemflow") et entraîne une érosion linéaire fine ("rill erosion") du billon, ce qui se traduit tout particulièrement dans le cas de la monoculture de maïs, par une rupture fréquente des billons lors de fortes pluies.

Le sarclage pour enlever les adventices (mauvaises herbes) surtout s'il est mal fait pendant les pluies (sol trop humide, sarclage pas assez profond), favorise la formation rapide de croûtes et en conséquence ruissellement, érosion et rupture de billons.

La culture à plat de l'orge produit une érosion laminaire et linéaire fine, diffuse sur toute la surface, le ruissellement n'étant pas contenu par les billons, peut avoir un effet cumulatif et produire une érosion forte lors de pluies intenses.

Le billonnage cloisonné ("contreo") en 1996 a permis de mieux contenir le ruissellement, favoriser l'infiltration et réduire à zéro la rupture des billons (en évitant l'accumulation des flux de ruissellement suivant la pente latérale du canal inter billon). Cette méthode devrait être généralisée pour la culture du maïs, dans des régions climatiques similaires.

### G. Autres observations et mesures.

Sur l'ensemble des terrasses, il y a eu d'autres observations et mesures, à savoir : prélèvements et analyses d'eau de ruissellement, sédiments grossiers de fond et en suspension, analyse physico-chimiques des tepetates cultivés, suivis de l'humidité et régime hydrique dans les tepetates cultivés et naturels, suivis de profils culturaux. Le traitement de ces résultats n'est pas terminé. Il permettra de mieux établir les relations entre l'évolution des propriétés des tepetates cultivés, leur érodibilité et leur productivité en fonction des traitements qui ont été expérimentés.

#### 2.4.2. Station de El Carmen et Tlalpan (Tlaxcala).

##### 2.4.2.1. Parcelles de type Wischmeier.

Les résultats de taux de ruissellement (Kr en %), nombre de pluies ruisselée (Nr) et taux d'érosion (E en t/ha) sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tab. 11). Il y a deux types de tepetates : t2 à El Carmen et t3 à Tlalpan ; trois traitements : tepetate naturel nu (n), roturé nu (r) et cultivé en maïs avec billon (c). A El Carmen, nous n'avons que les résultats de 1994 pour une pluviométrie annuelle de 627 mm. A Tlalpan, nous avons les 3 années allant de 1994 à 1996, pour une pluviométrie annuelle de 719, 602 et 607 mm respectivement.

Tableau 11. Taux de ruissellement (Kr), nombre de pluies ruisselées (Nr) et taux d'érosion (E) de 1994 à 1996 à El Carmen et Tlalpan.

Station	Traitement	Année	Kr (%)	Nr	E (t/ha)
El Carmen	t2n	1994	47.4	28	8.1
	t2r	1994	18.5	19	63.2
	t2c	1994	0.8	9	0.8
Tlalpan	t3n	1994	30.0	23	29.2
		1995	52.3	35	17.3
		1996	38.6	24	12.9
		1994-96	35.5	27	19.8
	t3r	1994	22.0	17	56.1
		1995	33.9	35	66.6
		1996	21.8	28	20.7
		1994-97	35.5	26	47.8
	t3c	1994	0.5	6	0.35
		1995	1.9	-	1.07
		1996	0.8	4	0.35
		1994-96	1.1	-	0.59

##### A. El Carmen.

En 1994, les taux de ruissellement (Kr) et d'érosion (E) ont été respectivement : sur tepetate t2 naturel nu (n) de 47% et 8 t/ha/an, sur tepetate roturé et billonné nu (r) de 18% et 63 t/ha/an, et cultivé en maïs avec billon (c), de 0,8% et 0,8 t/ha/an. De 1991 à 1994, le taux d'érosion a varié de 7 à 11 t/ha sur t2n, 63 à 106 t/ha/an sur t2r et de 25 et 26 t/ha/an en 1991 et 1993 du fait de la rupture des billons durant les pluies d'extrême intensité.

##### B. Tlalpan.

###### B1. Tepetate t3 naturel.

Le taux de ruissellement a varié de 30 à 52%, le maximum en 1995 correspond à une année de fortes pluies. Le taux d'érosion a varié de 29 à 13 t/ha. Mais le résultat de 1994 peut-être dû à une pluie exceptionnelle. Les taux ont diminué en 1995 et 1996 et sont comparables à ceux mesurés sur la station de San Miguel Tlaixpan.

### B2. Tepetate t3 cultivé, billonné à nu.

Les taux de ruissellement ont varié de 22 à 34% ceux d'érosion de 21 à 67 t/ha, le maximum se produisant en 1995. La moyenne du taux de ruissellement est comparable à la valeur mesurée à San Miguel Tlaixpan, mais le taux moyen d'érosion (48 t/ha) est plus élevé qu'à San Miguel (23 à 32 t/ha). Ceci est dû à une plus forte érosivité des pluies à Tlalpan .

### B3. Tepetate t3 cultivé en maïs avec billons.

Le taux moyen d'érosion avait atteint sur parcelle cultivée en maïs 25 et 26 t/ha en 1991 et 1993, du fait de la rupture des billons durant des pluies d'une extrême intensité. Ces valeurs ne se sont pas reproduites de 1994 à 1996 : les coefficients Kr et E sont demeurés très (1% et de 0.6% t/ha/an en moyenne, respectivement). Les billons ont été efficaces même en 1995, année particulièrement érosive.

Les deux types de tepetate t2 et t3 n'ont pas de différence significative d'aptitude au ruissellement et à l'érosion, que ce soit à l'état naturel ou cultivé.

#### *2.4.2.2. Terrasses de type paysan (1200 à 1500 m<sup>2</sup>), cultivées en maïs.*

Les mesures ont été faites en 1995 et 1996. Les trois terrasses comparent le billonnage traditionnel (LT), le labour minimum sans buttage ni couverture végétale intercalaire (désherbage chimique) (LRsv), le labour minimum avec buttage et couverture végétale intercalaire (LRcv). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 12). La hauteur des pluies en 1995 et 1996 a été respectivement de 602 et 607 mm, et l'indice d'érosivité des pluies de 196 et 218.

Tableau 12. Taux de ruissellement (Kr), nombre de pluies ruisselées (Nr) et taux d'érosion (E) en 1995 et 1996 sur terrasses à Tlalpan.

Traitement	Année	Kr (%)	Nr	E (t/ha)
LT	1995	12.7	28	3.0
	1996	5.0	18	5.0
	1995-96	8.8	23	4.0
LRsv	1995	22.0	30	3.7
	1996	16.2	29	7.3
	1995-96	19.0	30	5.5
LRcv	1995	8.9	26	2.3
	1996	1.8	19	1.5
	1995-96	5.3	22	1.9

#### *A. Billonnage traditionnel.*

Le taux moyen de ruissellement est de 9% et celui d'érosion de 4 t/ha. Ces valeurs sont sensiblement plus élevées que sur parcelles de type Wischmeier. cependant, le taux de ruissellement est comparable à celui mesuré sur les terrasses T4, T5 et T6 de San Miguel Tlaixpan, mais le taux d'érosion 2 à 4 fois plus élevé, sans doute parce que l'érosivité des pluies est plus forte à Tlalpan.

#### *B. Labour minimum.*

Sur la terrasse sans couvert végétal intercalaire (LRsv), le taux de ruissellement est en moyenne de 2 fois plus élevé qu'en labour traditionnel avec billons, mais le taux d'érosion moyen de 5.5 t/ha demeure modéré. La présence d'un couvert végétal intercalaire (LRcv) réduit en même temps le taux de ruissellement à 5% et d'érosion à 2 t/ha en moyenne.

Donc le labour minimum avec couvert intercalaire entre les rangs de maïs est plus efficace contre le ruissellement et l'érosion que le labour traditionnel avec billonnage. Il permet en outre

une meilleure infiltration des pluies. Le labour minimum avec désherbage chimique intercalaire augmente sensiblement le ruissellement par rapport au labour traditionnel, mais plus modérément l'érosion. De plus, il a un effet négatif sur le stockage de l'eau de pluie dans le sol et sur la productivité.

### *C. Perte d'éléments nutritifs (bases et phosphore).*

La perte a été calculée à partir des sédiments. Il s'agit probablement de P assimilable (P Olsen) et des bases échangeables (Ca, Mg, K, Na). La perte en P de l'ordre de 30 kg/ha, soit l'équivalent de 0,015 ppm, est négligeable. Une valeur aussi faible s'explique par la quasi carence du tepetate de cet élément. La perte en base est de 6 à 9 kg/ha, soit l'équivalent de 5 ppm et concerne surtout le potassium et le calcium. Ces éléments étant abondants, cette perte est négligeable. La perte en azote n'a pas été déterminée.

## **3. LA CANGAHUA D'ÉQUATEUR DE TYPE DURIPAN-CALCIQUE.**

Cette expérimentation a été mise en place et suivie par Custode et Trujillo (rapport final, 1997), puis interprétée et rédigée avec la participation de De Noni et de Viennot.

### **3.1. LES STATIONS ET LA METHODOLOGIE.**

#### **3.1.1. Station de la Tola.**

Elle est située dans la province de Pichincha, près de Tumbaco, à une trentaine de kilomètres à l'est de Quito, dans le sillon interandin au pied du volcan Ilalo à 2 600 m d'altitude. Les parcelles de ruissellement ont été installées sur la bordure d'un plateau entaillé par deux profonds cañons où coulent deux petits affluents permanents du rio Guyallabamba vers le rio Esmeraldas puis l'océan Pacifique.

Les parcelles de La Tola font partie d'un dispositif installé en 1986 qui a été réinstallé en 1991 pour tester l'efficacité de mesures conservatoires simples sur l'érosion et le ruissellement. Il était composé de 4 parcelles de 20% de pente : deux de 100 m<sup>2</sup> (parcelle nue de type Wischmeier et une parcelle témoin plantée, cultivée de façon traditionnelle) et d'une parcelle de 1 000 m<sup>2</sup> améliorée par 4 bandes de végétation, un kikuyu (*Penisetum clandestinum*) disposé selon les courbes de niveaux (Custode et al., 1992),

En 1991, 84 et 143 pluies ont été simulées à La Tola pour étudier le ruissellement et la susceptibilité au détachement des particules qui constitue un des facteurs importants de l'érosion (Asseline, Trujillo, Custode).

En 1994 la station a été réaménagée afin de prendre en compte la problématique particulière du programme de l'UE (Quantin, 1994, 1995). Elle est maintenant de 4 parcelles de ruissellement de 100 m<sup>2</sup> (10 m sur 10 m) dont le sol a été préalablement décapé jusqu'au matériau induré qui a été défoncé manuellement sur 40 cm puis pulvérisé. Elles sont reliées par un canal à un système de cuves successives et partiteurs qui permet de recueillir et de mesurer les eaux et les sédiments entraînés.

Cette station comporte :

- P1. -1 parcelle avec une pente de 12 à 15%,
- P2. -2 parcelle avec une pente de 12 à 18%, avec une préculture irriguée installée avant les pluies pour obtenir un effet de couverture,
- P3. -1 parcelle avec une pente de 12 à 14% et un muret filtrant de blocs de cangahua en bas de pente pour réduire l'érosion,
- P4. -1 parcelle (terrasse) de pente très faible (0 à 2%).

La parcelle irriguée a été semée en avoine à la mi septembre pour tester l'effet de couverture d'une préculture, cependant on y a noté une fonte des agrégats fins et la naissance d'une croûte structurale qui a majoré le ruissellement. Sur le reste des parcelles, l'avoine a été

mise en place en décembre et a montré une levée et un développement médiocres car la sécheresse de Noël s'est poursuivie jusqu'en mars. Les pluies sont alors intervenues sur une surface anormalement peu couvrante. L'année culturale suivante, en 1995, les semis d'avoine ont normalement levé mais ont été ravagés par le passage d'un troupeau. Aucun apport d'engrais minéral ou organique n'a été effectué pour respecter les usages de la région.

Enfin en 1996 une nouvelle campagne de simulation a permis d'étudier l'impact des états de surface et du couvert végétal sur le ruissellement et l'érosion.

### 3.1.2. La station de Cangahua.

Elle est située à 90 km de Quito, 15 km au sud de la ville de Cayambe sur le versant du volcan Cayambe. Elle est située à l'extrémité nord du bassin de Quito, sur les premières pentes du grand volcan Cayambe à 2 800 m d'altitude.

Les parcelles de Cangahua avaient été installées en 1986 et suivies jusqu'en 1991. Elles étaient au nombre de 4 : 2 de 100 m<sup>2</sup> -parcelle nue de type Wischmeier et parcelle cultivée traditionnelle- et 2 de 1 000 m<sup>2</sup> améliorée -une par le creusement de 4 fossés isohypses associées à des bandes de chilca (arbuste pâturé)-, -une par la disposition isohypse de 4 murets progressifs de cangahua-.

En 1994, la station de Cangahua a été réaménagée pour notre étude. Trois nouvelles parcelles de 10x10 m ont été créées équipées du même système de rigole, cuves et partiteurs :

- \* P1. 1 parcelle avec une pente de 15%,
- \* P2. 1 parcelle avec une pente de 15% et une préculture irriguée avant les pluies pour obtenir un effet de couverture,
- \* P3. 1 parcelle avec une pente de 15%, associée à un muret filtrant de blocs de cangahua,

A Cangahua, il n'y a pas de parcelle plane en terrasse.

## 3.2. LES RESULTATS.

### 3.2.1. Régime des pluies et érosivité.

#### 3.2.1.1. Station de La Tola.

Le climat est de type tropical montagnard. Il associe en effet une température moyenne annuelle régulière (isoméris) de 17°C, relativement froide à de grandes variations diurnes : la température moyenne des minimums est de 10°C tandis que celle des maximums est de 25°C ; mais une variation supérieure à 20°C est couramment observée en saison sèche, où les nuits claires de sérieuses gelées apparaissent. Le climat est également tropical humide par la faible amplitude des températures moyennes journalières, mensuelles et annuelles et surtout par une répartition bimodale des pluies (maximum en octobre-décembre puis février-juin). Le total annuel est cependant modéré puisqu'il fluctue autour de 750 mm (Tab. 13), 600 mm correspondant à un régime subaride, 900 mm à un régime subhumide (régime ustic).

Tableau 13. Pluviométrie moyenne annuelle La Tola 1986-1991 et 1994-1996;

La Tola	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	moy 86-91	94-95	95-96	moy 86-91
P mm	688	706	692	628	777	685	750	1049	937

NB. une saison des pluies est répartie sur 2 années calendaires, d'octobre à juin.

Les chutes de grêle, bien que rares (moins de 5 par an) et difficiles à mesurer, ont un rôle important sur le ruissellement et surtout sur l'érosion.

Pendant la période 1994- 1996, les hauteurs pluviométriques journalières (Tab. 14), sont faibles : 80% des pluies sont inférieures à 10 mm. Sur les 2 années d'observations 2 pluies seulement ont dépassé 40 mm.

La valeur des intensités maximales en 15 et 30 minutes (IM<sub>15</sub> et IM<sub>30</sub>), (Tab. 14), sont moyennes : 75% des pluies ont en effet une IM<sub>15</sub> inférieure à 10 mm/h valeur qui est traditionnellement considérée comme le seuil minimum de déclenchement de l'érosion. Seulement 11 pluies des 215 observées présentent une IM<sub>15</sub> supérieure à 35 mm/h, valeur au delà de laquelle l'érosion est conséquente. Trois pluies ont présenté une IM<sub>15</sub> dépassant 50 mm/h, que l'on peut considérer comme fortement érosives. L'année 1994-1995 a été normale ; mais 1995-1996 a été exceptionnellement pluvieuse (300 mm de plus que la moyenne. Ce régime est comparable à celui des stations expérimentales au Mexique.

Tableau 14 : Hauteur et intensité maximale de pluie La Tola et Cangahua (1994-1996).

Hauteurs pluies Période 1994-96					Intensités période 1994-1996				
Hauteurs mm	La Tola		Cangahua		Intensité mm	La Tola		Cangahua	
	Fréq.	%	Fréq.	%		IM <sub>15</sub>	IM <sub>30</sub>	IM <sub>15</sub>	IM <sub>30</sub>
0-4	174	61.1	178	73.3	0-4	127	145	33	44
5-9	49	17.2	41	16.9	5-9	35	29	16	11
10-14	20	7.0	13	5.3	10-14	14	9	5	6
15-19	20	7.0	5	2.1	15-19	5	10	3	6
20-24	12	4.2	5	2.1	20-24	9	7	5	3
25-29	5	1.8	1	0.4	25-29	9	3	1	0
30-34	3	1.1	0	0.0	30-34	5	2	2	0
35-39	0	0.0	0	0.0	35-39	6	1	2	0
40-44	1	0.4	0	0.0	40-44	2	0	2	0
45-49	1	0.4	0	0.0	45-49	0	0	1	0
50-54	0	0.0	0	0.0	50-54	1	0	0	0
55-59	0	0.0	0	0.0	55-59	1	0	0	0
60-64	0	0.0	0	0.0	60-64	1	0	0	0
Total	285	100.0	243	100.0	Total	215	206	70	70
Max	47.0		26.6		Max	63.2	38.6	48.0	24.0

### 3.2.1.2. Station de Cangahua.

Les températures moyennes sont légèrement plus faibles que celles de La Tola ; mais la variabilité journalière est plus importante à cause de la proximité du Cayambe, volcan au sommet couvert de glaces, responsable de gelées plus fréquentes et d'orages de grêle.

Le total pluviométrique moyen annuel n'est que de 550 mm qui correspondrait à un régime subaride, avec une variabilité inter annuelle observée de 370 à 700 mm. A Cangahua, la longueur et l'intensité des deux intersaisons sèches sont nettement plus importantes qu'à La Tola au point que le manque d'eau constitue un grave facteur limitant pour les cultures et même pour le maïs, base de l'alimentation humaine.

La station de Cangahua (Tab. 15) est nettement plus sèche que La Tola : la pluviométrie moyenne annuelle accuse une valeur de 211 mm en moins soit 28%. En 1994-1996, la différence est également importante sur la hauteur de pluie journalière, (Tab. 14), puisque 90% des pluies sont inférieures à 10 mm et qu'aucune pluie ne dépasse 30 mm. Aucune intensité (IM<sub>15</sub>) n'est supérieure à 50 mm/h ; cependant une plus forte proportion de pluies dépasse 35 mm/h. Cependant 5 des 70 pluies observées ont une IM<sub>15</sub> supérieure à 35 mm/h. Ce chiffre ne représente que 29% des événements pluviaux). Comme pour La Tola nous ne disposons d'aucune données sur la grêle.

Tab. 15. Pluviométrie moyenne annuelle Cangahua 1986-1991 et 1994-1996.

Cangahua	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	Moy. 86-91	94-95	95-96	Moy. 86-96
P en mm	452	436	692	489	700	554	369	676	523

Les stations de La Tola et de Cangahua montrent des valeurs de pluies journalières et des intensités maximales en 15 ou 30 minutes bien inférieures à celles observées sur les versants

externes des cordillères non protégés des influences océaniques, où des intensités de 90 mm/h sont normales.

Le ruissellement et l'érosion sont en réalité provoqués par seulement quelques événements ainsi que le montre le tableau 16. Ce point est tout à fait conforme à ce qui a été constaté entre 1986 et 1991, où 5 pluies par an, représentant moins de 15% de la pluviométrie sont responsables de 55 à 90% de l'érosion et de plus de 30% du ruissellement. Ce fait est aussi semblable au cas des stations mexicaines.

Tab. 16. Contribution des 5 pluies les plus intenses au ruissellement et à l'érosion. La Tola et Cangahua, 1994-1996.

		Pluie mm	Parcelle 1		Parcelle 2		Parcelle 3		Parcelle 4	
			Ruiss m <sup>3</sup> /ha	ER mm	Ruiss m <sup>3</sup> /ha	ER mm	Ruiss m <sup>3</sup> /ha	ER mm	Ruiss m <sup>3</sup> /ha	ER t/ha
La Tola	Quantité	78.8	121.2	22.6	183.5	9.0	185.4	10.9	205.4	6.8
	% tot. an	8.4	34.9	82.1	31.9	73.8	52.2	81.1	34.9	59.6
Cangahua	Quantité	75.4	61.0	2.7	41.2	1.3	39.0	0.8		
	% tot. an	13.8	47.2	64.3	35.8	57.8	43.0	69.2		

### 3.2.2. Ruissellement et érosion.

Les études ont été menées en condition de pluie naturelle.

#### 3.2.2.1. La station de La Tola.

Les tableaux 17 et 18 ci-après montrent les résultats de pluie, ruissellement, coefficient de ruissellement et d'érosion pour les années 1994, 1995 et 1996 ainsi que celles de la période 1986-1990 afin de pouvoir les comparer avec ceux des parcelles cultivées selon le mode traditionnel (valeurs plafond) et les mêmes parcelles cultivées où des mesures ont été prises afin de limiter l'érosion (valeurs plancher).

#### A. Observation.

Bien que les années soient incomplètes, les résultats globaux annuels mettent en évidence durant les 3 derniers mois de 1994 la faiblesse de la pluie du ruissellement et l'érosion.

L'année 1995 se caractérise par des séries d'observations presque complètes et par des pluies nettement excédentaires (985 mm) alors que la sécheresse de 1994 s'est poursuivie jusqu'au mois de mars.

Pour l'année 1996 les observations s'interrompent à la fin du mois de mai. En ne considérant que les 5 mois d'observation, 1996 se place déjà parmi les années exceptionnelles par les valeurs du ruissellement et de l'érosion. En effet ces valeurs dépassent celles observées entre 1986 et 1990 sur les parcelles cultivées améliorées et atteignent mêmes celles des parcelles cultivées traditionnelles.

En 1994 le seul mois érosif est celui de décembre qui est cependant nettement moins pluvieux que celui de novembre. Sur la cangahua cultivée, le ruissellement et l'érosion ne peuvent se déclencher qu'après un certaine réorganisation structurale.

En 1995 la couverture végétale qui s'est bien développée, grâce aux pluies automnales de 1994, va progressivement perdre son effet protecteur au cours des trois mois (décembre à début mars) durant lesquels les pluies ne dépassent pas 40 mm (5 mm seulement en janvier). Cependant les fortes pluies de mars vont être sans effet ; car elles peuvent s'infiltrer et reconstituer les réserves hydriques du sol. Les pluies d'avril et de mai, bien qu'égales ou inférieures à celle de mars, initient le ruissellement qui représente plus de 50% du total annuel mais provoque moins de 15% de l'érosion (la parcelle P3, avec muret filtrant continue de ne pas ruisseler).

La saison des pluies d'automne 1995 débute en octobre : le sol commence par perdre son état motteux de surface ; le 17 quand il est suffisamment humecté, démarre le ruissellement et surtout l'érosion. Durant le seul mois d'octobre, qui est le mois le plus sensible à l'érosion de toute la période d'expérimentation, il y a plus de 50% de la perte en terre annuelle.

Cependant on reste dans les limites de l'érosion admissible : la perte par érosion est équivalente à une tranche de 2 mm de sol.

En novembre 1995 les pluies sont maximales ; mais si le ruissellement reste élevé, les pertes en terre s'amenuisent avec le développement de la végétation (une avoine qui sera malencontreusement pâturée à la fin du mois). La faible érosion de décembre est due à une préparation des terres en période de faibles pluies. Durant le début d'année 1996, le ruissellement augmente avec l'accumulation des pluies, il atteint un maximum en avril ; mais durant cette période excessivement pluvieuse, l'érosion reste modérée.

Tab. 17. La Tola. Moyennes mensuelles et annuelles, du ruissellement, du coefficient de ruissellement et de l'érosion 1994-1996.

Mois	Hauteur de pluie mm	Parcelle 1			Parcelle 2			Parcelle 3			Parcelle 4		
		Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha	Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha	Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha	Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha
Sept	5.6												
Oct	52.8												
Nov	119.6												
Déc	38.8	3.3	0.8	0.0									
Jan	4.9												
Fév	31.8			7.8			0.0						
Mar	161.3			1.4	8.8	0.5	0.9			0.7	15.8	1.0	0.6
Avr	161.6	17.9	1.1	0.8	18.1	1.1	0.3	0.3	0.0	0.2	20.5	1.3	0.3
Mai	100.1	21.4	2.1	1.2	19.8	2.0	1.0			0.6	43.6	4.4	1.3
Jun	27.6						0.1			0.1	2.0	0.7	0.2
Jul	20.2												
Août	26.1												
94-95	750.4	42.6	0.6	11.3	46.7	0.6	2.2	0.3	0.0	1.7	81.9	1.1	2.4
Sept	7.2												
Oct	146.4	21.1	1.4	19.3	14.4	1.0	5.3	82.3	5.6	6.3	25.6	1.7	4.1
Nov	200.9	6.2	0.3	1.5	32.1	1.6	1.7	9.0	0.4	1.5	19.0	0.9	0.8
Déc	96.8												
Jan	75.3												
Fév	104.0				17.0	1.6	0.1				12.6	1.2	0.1
Mar	141.1	1.5	0.1	0.1	52.3	3.7	0.2	1.5	0.1	0.1	51.6	3.7	0.4
Avr	150.0	216.5	14.4	1.5	280.6	18.7	2.3	194.4	13.0	3.7	253.5	16.9	3.2
Mai	127.5	58.8	4.6	1.5	132.4	10.4	0.3	68.0	5.3	0.2	144.1	11.3	0.4
95-96	1049.2	304.2	4.6	24.0	528.7	8.1	10.0	355.1	4.4	11.9	506.5	7.7	9.0
Moy.	898.8	173.4	1.9	17.7	287.7	3.2	6.1	177.7	2.0	0.8	294.2	3.3	5.7

Tab. 18. La Tola. Moyenne annuelle du ruissellement et de l'érosion 1986-1991.

	P. cultivée améliorée		P. cultivée traditionnelle
Pluie mm	585		
Qr m <sup>3</sup> /ha	moy 86-91	146	417
Kr %		2.1	6.1
E t/ha		4.4	19.3

### B. Le ruissellement.

La parcelle P1 (pente 12-15%) est celle qui ruisselle le moins avec la P3 (pente de 12-15% avec un muret de blocs de cangahua. Paradoxalement la P2 (12-15% avec irrigation et culture précoce) et surtout la P4 (terrasse presque plane) donnent lieu à un fort ruissellement. Ces parcelles se caractérisent en effet à la fois par un plus grand nombre d'événements ruisselants et par un Kr% supérieur pour chacune des pluies. Ceci est dû à un large développement de croûtes superficielles en début de saison.

Tab. 19. Le ruissellement pour l'ensemble des événements 1994-1996.

Ruissellement	P1	P2	P3	P4
Nombre de pluies ruisselées	19	23	16	30
Kr%	1.9	3.2	2.0	3.3
m <sup>3</sup> /ha	340	570	350	590
Classement	1	3	2	4

Les périodes ou semaines pluvieuses au cours desquelles les pluies se succèdent journellement donnent lieu à des ruissellements exceptionnels : en 1995 ce sont la 3<sup>e</sup> décade de mai 1995 et la 3<sup>e</sup> décade d'octobre et en 1996 ce sont la 2<sup>e</sup> décade d'avril et la dernière décade de mai. Le processus étant amorcé, il peut se poursuivre avec des pluies inférieures à 10 mm/h sur les parcelles les plus ruisselantes (à partir du 20 mars 1996 les parcelles saturées réagissent à presque toutes les pluies. Ce qui signifie que la vitesse d'infiltration est très réduite du fait d'une dégradation structurale.

### C. Érosion.

Cependant si le ruissellement est accru, l'érosion demeure limitée.

En 1995, P1 est la parcelle qui a donné lieu à la plus forte érosion à savoir 19 t/ha en une seule pluie (le 25 octobre) ; tandis que les 3 autres ont eu un meilleur comportement et des résultats globalement semblables. Mais en 1996 les parcelles P3 avec muret et P4 à pente nulle se sont montrées les plus érosives : 4 t/ha contre 3 t/ha, cependant modérément.

Tab. 20. L'érosion pour l'ensemble des événements 1994-1996.

Erosion	P1	P2	P3	P4
Nombre de cas	3	3	3	4
t/ha	27	12	13	11
Classement	4	2	3	1
Moyenne 1994-1996	13.8	6.4	6.8	5.6

Pour préciser, les liaisons entre la pluie (P), la quantité ruisselée (Qr), le coefficient de ruissellement (Kr), et la quantité érodée qui représente la somme des suspensions et des terre de fond (E) pour chaque parcelle, nous avons calculé les coefficients de corrélation linéaire.

Deux remarques peuvent être faites ; c'est premièrement la faiblesse des corrélations entre P, Qr, Kr et E. L'érosion est cependant corrélée avec les intensités IM<sub>15</sub> et IM<sub>30</sub> au seuil de 1% ainsi qu'avec la hauteur de pluie. Le coefficient de ruissellement n'explique pas l'érosion car il ne représente pas l'énergie cinétique des pluies. Dans notre cas c'est l'impact direct de fortes pluies qui provoque le détachement des particules et leur érosion, mais aussi la dégradation des agrégats pour l'encroûtement et par incidence le ruissellement. Sur la P2 et la P4 exprime que l'effet préculture ou absence de pente n'agissent pas en limitant le ruissellement mais sa capacité de transport (compétence). Contrairement à ce qui était prévu, la dégradation structurale superficielle a été plus forte dans ces deux cas, accroissant le ruissellement mais sans augmenter proportionnellement l'érosion. Finalement la parcelle P1, sans traitement anti-érosif a produit deux fois plus d'érosion que les autres, qui ne présentent pas de différence significative. La préculture irriguée et aussi efficace que le muret filtrant ou la pente nulle, les taux d'érosion sont modérés (6 t/ha) mais plus importants que ceux observés au Mexique car, sans engrais minéral, le couvert de l'avoine est resté trop clairsemé

### 3.2.2.2. La station de Cangahua.

L'analyse des résultats annuels (Tab. 21) montre l'inexistence de la seconde saison pluvieuse de l'année 1994, qui n'a donc provoqué ni ruissellement ni d'érosion.

Tab. 21. Cangahua. Moyennes mensuelles, annuelles du ruissellement, du coefficient de ruissellement et de l'érosion 1994-1996.

Mois	Hauteur de pluie mm	Parcelle 1			Parcelle 2			Parcelle 3		
		Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha	Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha	Qr m <sup>3</sup> /ha	Kr %	E t/ha
Sept	3.0									
Oct	50.8									
Nov	45.7									
Déc	17.8	2.2	1.3		1.7			2.9		
Jan	33.2									
Fév	25.9									
Mar	40.1	6.0	1.5	0.2	6.0	1.5	0.1	6.0	1.5	0.1
Avr	43.4	5.0	1.1		4.5	1.0	0.1	5.0	1.1	
Mai	52.1	23.4	4.5	1.1	21.9	4.2	0.6	19.4	3.7	0.6
Jun	21,9	17.0	7.8	0.4	7.0	3.2	0.2	5.0	2.3	0.1
Jul	22.7									
Août	12.2									
94-95	368.8	53.7	1.5	1.7	41.2	1.1	1.0	38.3	1.0	0.8
Sept	8.7					9.9				
Oct	35.2	5.8	1.6	0.1	6.5	1.9	0.1	5.3	1.5	
Nov	60.6									
Déc	36.2	10.0	2.8	0.2	10.0			3.0	0.8	
Jan	98.4	8.2	0.8	0.2	4.8	2.8	0.1	4.9	0.5	
Fév	67.8	7.1	1.0	0.1	2.1	0.5	0.4	1.1	0.2	
Mar	136.4	6.7	0.5	0.1	2.7	0.3		3.2	0.2	
Avr	90.6	5.2	0.6	0.3	3.4	0.2		10.0	1.1	0.1
Mai	123.6	32.7	2.6	1.5	16.6	0.4	0.7	24.9	2.0	0.2
95-96	657.5	75.6	1.2	2.4	46.1	1.3	1.3	52.3	0.8	0.4
Moy tot	513.1	64.6	1.3	2.1	43.6	0.9	1.1	45.3	0.9	0.6

Tab. 22. Cangahua. Moyenne annuelle du ruissellement et de l'érosion 1986-1991.

	P. cultivée améliorée		P. cultivée traditionnelle	
	moy 86-91			
Pluie mm			523.5	
Qr m <sup>3</sup> /ha		9		65
Kr %		0.2		1.2
E t/ha		0.3		3.0

1995 est une année normale qui donne cependant lieu à un ruissellement et à une érosion tout à fait importants, puisque ces 2 valeurs sont très nettement supérieures à celles observées entre 1986 et 1991 (Tab. 22) sur les parcelles cultivées améliorées, ayant fait l'objet de mesures conservatoires et comparables à celles mesurées sur les parcelles cultivées traditionnelles.

Bien que l'année 1996 soit incomplète, les seuls 5 mois observés montrent que les pluies correspondent à une année normale. L'ordre de classement du ruissellement et de l'érosion est différent de celui de l'année 1995 : le ruissellement est moindre mais l'érosion est supérieure.

### A. Observations.

Les 3 derniers mois de 1994, bien que normalement pluvieux, et les 2 premiers de 1995 ne montrent ni érosion ni ruissellement notables. Le ruissellement débute en mars et se poursuit jusqu'au début du mois de juin ; mais l'érosion reste faible ; elle n'apparaît qu'en mai et en juin durant lesquels l'érosion représente les 3/4 des pertes annuelles. C'est une période de pluies régulières. La saison pluvieuse débute en octobre, mais n'est marquée par aucun événement important. A Cangahua l'année 1996 démarre sans qu'il y ait eu de véritable été de Noël . Les 4 premiers mois donnent lieu chacun un ruissellement de 5 à 10 m<sup>3</sup> selon les parcelles, tandis que le dernier mois d'observation (mai) fournit pour une pluviosité comparable, un ruissellement équivalent à ces 4 mois réunis. L'érosion correspondante est faible (2 t/ha) pour la parcelle P 1 ; la moitié de cette quantité (1 t/ha), intervient pendant le seul mois de mai.

A Cangahua, où la période d'observations ne comprend que des années inférieures ou égales à la normale et sans événement exceptionnel, le ruissellement et l'érosion sont faibles. Ils sont inférieurs à ceux de La Tola (5 fois moins de ruissellement et 2 fois moins d'érosion). Les pluies capables de les déclencher sont comprises entre 7 et 23 mm/h sur toute la période d'observation, seules quelques pluies sont efficaces et capables de donner lieu à un ruissellement supérieur à 1 m<sup>3</sup> :

### B. Le ruissellement.

La parcelle P2 (irriguée à démarrage précoce des cultures) est celle qui ruisselle le moins suivie de près par la P3 (pente de 15% avec muret de cangahua). La P1 (pente de 15% sans aménagement) montre que les événements ruisselants sont à peine plus nombreux ; mais qu'ils sont un peu plus importants.

Tab. 23. Ruissellement pour l'ensemble des événements 1994-1996.

Ruissellement	P1	P2	P3
Nombre de pluies	17	16	16
Kr	1.3	0.9	0.9
Qr	129	87	91
Classement	3	1	2

### C. L'érosion.

L'érosion est très réduite, ce que montre le tableau ci-après dans lequel on a choisi de comptabiliser les érosions supérieures à 0,5 t/ha :

Tab. 24. Érosion pour l'ensemble des événements 1994-1996.

Erosion	P1	P2	P3
Nombre de cas	3	1	1
t/ha	4.0	3.3	1.2
Classement	3	2	1

Ici encore on peut souligner l'efficacité de l'aménagement avec des blocs de cangahua pour limiter l'érosion. Tandis que la préculture a été moins efficace.

Les relations liant les différents paramètres de l'érosion sont très ténues et comme dans le cas de La Tola, c'est le coefficient de ruissellement qui explique le plus mal l'érosion.

Cependant, pour une hauteur de pluies très inférieure à Cangahua, les taux de ruissellement sont aussi nettement moindres qu'à La Tola. Les taux d'érosion mesurés sont faibles, malgré un couvert imparfait du sol par l'avoine cultivée sans engrais. Mais les années 1994-1996 à Cangahua ont été peu érosives, en comparaison de ce que nous avons observé à La Tola.

### **3.2.3. Observation des états de surface, du ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées.**

#### **3.2.3.1. Motivation.**

Une expérience antérieure (De Noni, Viennot, Asseline et Trujillo, 1996) de simulation de pluies sur cangahua avait montrée notamment : sur cangahua naturelle nue, le ruissellement se produit dès une intensité de 20 mm/h et s'accroît en progression linéaire jusqu'à 90 mm/h, sur cangahua cultivée (défoncée à 20, 40 ou 60 cm), il n'y a pas de ruissellement pour une intensité de 30 mm/h pendant 30 mn (I<sub>30</sub>), le ruissellement apparaît pour une intensité de 60 mm/h pendant 10 mn (I<sub>10</sub>). La fragmentation de la cangahua est donc efficace pour les pluies d'intensité modérée mais insuffisante pour les intensités exceptionnelles.

Une nouvelle expérience sous pluies simulées a été faite sur la station de La Tola (Tumbaco), près des essais sous pluies naturelles, par Leroux (DESS, 1996) sous la direction de Janeau (Leroux et Janeau, 1996). Son but était de préciser le processus de ruissellement et d'érosion sur cangahua cultivée.

#### **3.2.3.2. Méthodes.**

Les mesures sont faites sur petites parcelles (1 m<sup>2</sup>) de cangahua spécialement travaillées pour cet essai. L'appareil est le simulateur par aspersion en débit contrôlé, de Asseline et Valentin (1978). Chaque expérimentation comporte une série de pluies successives d'intensité croissante : 20, 40, 60 et 80 mm/h pendant 20 mn chacune (au total, une pluie de 67 mm pendant 80 mn). Les mesures ont été faites en 9 fois, en 3 campagnes culturales (mars, avril, mai) : état initial, milieu et fin de première campagne, puis seconde et troisième campagne. Entre la 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup>, s'intercale l'effet du sarclage superficiel qui brise l'encroûtement et renouvelle l'état fragmentaire de la cangahua cultivée.

La cangahua a été défoncée manuellement (au pic) à 25 cm de profondeur, puis ameublie manuellement (à la houe) en 3 tailles moyennes d'agrégats : très fine -TF- (95% < 2 cm), fine -TF- (70% < 2 cm), grossière -G- (50% < 2 cm et 39% > 5 cm). Il y a une parcelle témoin T de chaque taille d'agrégats (TFT, FT, GT). Il y avait également pour certains de ces traitements une variante de la granulométrie des agrégats.

L'observation des états de surface a été faite par la méthode des points quadrats et selon la nomenclature de description de Casenave et Valentin (1989). Elle permet de mesurer l'évolution de la rugosité (coefficient d'aplatissement), de la succession des types d'encroûtements (structurel, érosion, ruissellement, décantation) et leur pourcentage de recouvrement. A ces mesures, on associe celle du couvert végétal, etc...

Quelques mesures physiques ont été faites sur la cangahua cultivée, à savoir granulométrie, densité apparente et porosité globale, cisaillement.

Les mesures sous pluie simulée concernent d'une part les paramètres hydrodynamiques et le ruissellement, d'autre part les paramètres d'érosion, transport et sédimentation. Les principaux paramètres hydrodynamiques obtenus sont la hauteur de pluie d'imbibition, l'intensité minimale d'infiltration, la hauteur de lame d'eau ruisselée cumulée et le coefficient de ruissellement, le volume de la rétention superficielle (écoulement du ruissellement après la pluie). Les principaux paramètres de l'érosion obtenus sont : l'érosion totale (perte en terre globale), la turbidité et la charge en solide en suspension, l'intensité limite de détachabilité (seuil d'intensité où se produit l'érosion) et la granulométrie des sédiments.

#### **3.2.3.3. Résultats.**

Nous essaierons de présenter brièvement les principaux faits et conclusions de cette étude, particulièrement complexe. La comparaison entre résultats des différents traitements n'est pas toujours pertinente en raison de la taille exiguë des parcelles, trop réduite quand il s'agit de la culture du maïs, du défaut de répétition, du nombre réduit (9 à 6) des pluies simulées et de la forte variation de la pente entre certains traitements (4 à 21%). Il s'en dégage cependant quelques enseignements significatifs de la taille des agrégats et leur rugosité, ainsi

que de l'évolution des états de surface sous l'impact des pluies. Pour simplifier la présentation des résultats, nous appellerons TFT, FT et GT les traitements témoin nu à agrégats très fins, fins et grossiers ; et FM et GM, la culture de maïs sur agrégats fins et grossiers.

#### *A. Évolution des états de surface.*

L'indice de rugosité (en %) exprime bien le relief en fonction de la taille des agrégats et son évolution au cours de la fonte et du tassement des agrégats. Sur TFT, sa valeur est faible et stable autour de 30 pendant les 6 premières pluies. Sur FT, cette valeur initiale plus élevée diminue progressivement de 47 à 34 au cours des 6 premières pluies, s'élève à 80 après sarclage puis retombe à 53 après les deux dernières pluies. Sur GT, d'une valeur initiale élevée de 62, il s'abaisse à 49 au cours des premières pluies, puis remonte à 80 et s'y maintient après sarclage. Cet indice peut-être corrélé avec les paramètres hydrodynamiques de surface et de sédimentation. Il y a bien un développement concomitant des croûtes "laminaires" en surface du fait de l'impact des pluies, visible sur les traitements FT, FM et GT, plus conséquent sur les parcelles d'agrégats fins que d'agrégats grossiers mais non observé sur la parcelle d'agrégats très fins. La mesure de surface des croûtes n'est pas assez précise pour être corrélée avec les autres paramètres.

#### *B. Évolution des paramètres hydrodynamiques de surface.*

L'intensité limite d'infiltration d'une pluie est supérieure à 30 mm/h à l'état initial dans tous les cas, ce qui explique l'absence de ruissellement et d'érosion. Mais ce seuil s'abaisse également pour tous les traitements vers 15 mm/h après les 6 premières pluies, puis remonte à 25 mm/h sous l'effet du sarclage et redescend vers 20 mm/h après les dernières pluies.

La hauteur d'eau ruisselée cumulée par pluie (en mm) différencie mieux les traitements. Elle est nulle au départ pour tous. Sur les parcelles FT, FM et GT, elle demeure très faible au cours des 2 pluies suivantes, puis s'accroît brusquement dans tous les cas de la 4<sup>e</sup> à la 6<sup>e</sup> pluie, en raison sans doute de la formation d'une croûte superficielle, elle atteint alors 35 à 40 mm sur les parcelles de texture fine (FT, FM) ou très fine (TFT), près de 20 mm seulement sur la parcelle de texture grossière (GT). Ensuite le ruissellement se stabilise après sarclage et n'augmente que faiblement de 5 à 10 mm dans tous les traitements au cours des 2 dernières pluies. La parcelle TFT en pente faible (4%) se singularise par un développement plus précoce et constant du ruissellement dès la 2<sup>e</sup> pluie. Ceci suggère une transformation plus rapide de l'état de surface par suite de la fonte des agrégats fins.

Le coefficient moyen de ruissellement (K<sub>2</sub>, en %) sur l'ensemble des pluies varie modérément, respectivement de 9,2 à 7,2 et 4,5 du traitement TFT, à FT et GT. Cette variation est inverse, évidemment, de l'indice de rugosité. Les agrégats grossiers (> 5 cm) font donc obstacle au ruissellement. Le sarclage également en améliorant la rugosité et l'infiltration ralentit aussi le ruissellement mais provisoirement sur les parcelles de texture fine.

Sur les parcelles cultivées en maïs (FG, GM), le coefficient de ruissellement, respectivement de 17,6 et 7,0 %, augmente sensiblement par rapport au témoin, sans que l'on puisse l'expliquer.

La détention superficielle, volume d'eau ruisselé après la pluie sur les parcelles témoins (TFT, FT et GT) est conséquente de la hauteur d'eau ruisselée ; elle augmente après les 3 premières pluies en FT et GT, diminue fortement après le sarclage puis remonte progressivement. Elle est un peu inférieure : 110 à 270 ml (moyenne 170) sur la parcelle de texture grossière au cours de la 4<sup>e</sup> à la 6<sup>e</sup> pluie et supérieure sur la parcelle de texture fine : 200 à 240 ml (moyenne 220).

#### *C. Évolution du transport solide et de la sédimentation, érosion totale et turbidité.*

L'érosion globale (Et, en t/ha) est progressive et constante à partir de la 2<sup>e</sup> pluie sur la parcelle TFT de texture très fine seulement, où elle atteint 1 t/ha à la 6<sup>e</sup> pluie. Sur les autres

parcelles témoins FT et GT, l'érosion croît rapidement de la 4<sup>e</sup> à la 6<sup>e</sup> pluie où elle atteint respectivement 1,5 et 2,0 t/ha ; puis se stabilise après le sarclage et n'augmente que de 0,5 t/ha au cours des 3 dernières pluies soit au total 2,0 et 2,5 respectivement en FT et GT. La texture plus grossière, bien qu'elle réduise le ruissellement est sans conséquence sur l'érosion totale. La culture de maïs en FM, a augmenté à 3,8 t/ha l'érosion sur parcelle de texture fine par rapport au témoin, en proportion de l'accroissement du ruissellement.

La turbidité (sédiment fin transporté en suspension, en g/pluie) est en relation directe avec l'intensité des pluies (de chaque série de pluie) ; elle apparaît à partir d'une intensité de 40 ou 60 mm/h ; elle s'accroît très fortement à 80 mm/h dans tous les cas. Elle est donc fonction de l'énergie des pluies et s'explique à la fois par l'effet splash qui désagrège les agrégats et par l'énergie du flux de ruissellement qu'elle entraîne.

La turbidité ne contribue à l'érosion totale que pour 20% seulement sur les parcelles FT et 5% seulement sur les parcelles GT. Sur la parcelle de texture fine, il y a une bonne corrélation entre hauteur de pluie ruisselée et turbidité, donc probablement avec l'énergie du flux. Cette relation n'existe pas sur la parcelle de texture grossière, où l'on n'observe un accroissement de la turbidité qu'après sarclage, c'est à dire libération de particules fines. Il y a donc aussi relation entre turbidité et stabilité des agrégats. Sur la parcelle FM cultivée en maïs, la turbidité est élevée de la 4<sup>e</sup> à la 6<sup>e</sup> pluie, puis après une amélioration après sarclage qui a réduit le ruissellement, il y a une remontée importante au cours des deux dernières pluies. Sur la parcelle de texture très fine, en pente seulement de 4%, la turbidité demeure modérée de la 2<sup>e</sup> à la 6<sup>e</sup> pluie, malgré une hauteur importante de pluie ruisselée, l'énergie du flux étant modérée par une faible pente.

Ces résultats montrent que la relation la plus forte entre ruissellement, turbidité et érosion est liée non seulement à la hauteur de ruissellement, mais plus encore à l'énergie du flux, qui est fonction de la pente et de la rugosité des agrégats. Il y a en effet une corrélation significative entre hauteur d'eau ruisselée et érosion totale sur les parcelles de texture fine (FT, FM) en pente de 12 à 16%, mais pas sur celle de texture très fine (TFT) en pente de 4%, ni sur celle de texture grossière (GT) en pente de 16%, mais à fort indice de rugosité. Cependant, contrairement au résultat attendu, sur la parcelle de texture grossière (FT), s'il y a bien réduction de l'énergie du flux, il n'y a pas réduction proportionnelle de l'érosion totale ; fait qui pourrait être corrélé avec une part plus élevée de fines (<0,5 mm) dans le sédiment. L'implication n'est pas évidente.

#### *D. Comparaison des taux de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées et naturelles en 1995-96.*

D'une part nous avons le résultat en petites parcelles de 1 m<sup>2</sup> de 9 séries de pluies, équivalent à une hauteur globale de 600 mm, réparties sur 3 mois de mars à mai 1996. D'autre part, nous comparons les résultats de deux des parcelles d'érosion de 100 m<sup>2</sup> (P1 et P4) sous pluie naturelle de hauteur globale de 1 049 mm, répartie d'octobre 1995 à mai 1996. Ces deux parcelles étaient de texture fine et cultivées en avoine, mais sans fertilisant avec un médiocre couvert végétal. La parcelle P1 en pente de 12 à 15% peut être comparée à la parcelle FT en pente de 12% ou FM en pente de 16% ; la parcelle P4 en pente de 0 à 2% peut l'être à la parcelle TFT en pente de 4%. Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 25).

Tab. 25. Comparaison des taux de ruissellement et d'érosion sous pluie simulées et pluies naturelles La Tola. 1995-1996.

Pluie simulée (600 mm)				Pluie naturelle (1050 mm)			
Parcelle	Pente %	Kr %	Et t/ha	Parcelle	Pente %	Kr %	Et t/ha
FT	12	7.2	2.0	P1	12-15	4.6	24.0
FM	16	17.6	3.8	P2	0-2	7.7	9.0
TFT*	4	9.1	>1.0				
GT	16	4.5	2.5				
GM*	21	7.0	>1.2				

\* Mesures sur 6 pluies seulement.

D'une manière générale, les taux de ruissellement sont plus élevés sous pluies simulées, en raison sans doute de leur plus forte intensité (I de 60 et 80 mm/ha pour chaque pluie). Mais les taux d'érosion sont beaucoup moins élevés (6 fois moins sur pente faible, 6 à 12 fois moins sur pente forte), en raison de deux facteurs :

- une hauteur cumulée de pluie inférieure (600/1000 mm)
- un facteur échelle de longueur moindre, de 1 à 10, qui pourrait justifier un effet cumulatif de la lame d'eau ruisselée sur les parcelles sous pluie naturelle. Peut être aussi en deuxième année de culture pour ces dernières, une certaine dégradation de la stabilité des agrégats. Donc la simulation de pluie est utile pour préciser les facteurs de ruissellement et d'érosion, mais ne peut servir à prédire les taux d'érosion sous pluie naturelle.

### 3.3. CONCLUSIONS.

En conclusion de cette expérimentation sur cangahua cultivée sous pluies simulées il ressort les faits suivants. La susceptibilité à l'érosion ne se développe qu'à de fortes intensités des pluies, au moins 40 à 60 mm/h. Elle augmente en raison du colmatage de la macroporosité par suite de la désagrégation des agrégats fins sous l'impact des pluies (effet splash) et en conséquence la réduction du seuil minimal de vitesse d'infiltration à 15-20 mm/h ; ou elle diminue temporairement après sarclage. Ceci se produit aussi bien sur texture fine que grossière. Mais la rugosité de la texture grossière intervient en réduisant la vitesse et l'énergie des flux, ce qui favorise l'infiltration et la sédimentation des particules grossières. Cependant, si la rugosité réduit le coefficient de ruissellement et l'énergie du flux, elle ne diminue pas significativement l'érosion totale par rapport au témoin en texture fine ; la raison n'est pas évidente. Une pente forte (15%) augmente sensiblement l'énergie des flux ruisselés dans le cas d'une texture fine et d'une faible rugosité ; à hauteur égale d'eau ruisselée, elle augmente sensiblement l'érosion par rapport à une parcelle en pente réduite (4%). Cet effet est curieusement plus marqué sous culture de maïs (peut être mal développé en 1<sup>ère</sup> année de culture) que sur le témoin à nu.

Sous pluies naturelles, le coefficient de ruissellement est un peu inférieur à celui mesuré sous pluies simulées, sans doute à cause de la plus forte intensité de celles-ci. Mais les taux d'érosion sont sensiblement plus élevés, probablement à cause de l'accumulation de la lame d'eau ruisselée sur une longueur 10 fois plus grande ; peut être aussi à cause d'une certaine dégradation structurale en deuxième année de culture.

Les stations de la Tola et de Cangahua situées dans le bassin de Quito vers 2 600 m et 2 800 m d'altitude se caractérisent par une pluviométrie moyenne annuelle respective de 750 et 550 mm. L'agressivité des pluies est faible à moyenne ; ainsi, l'intensité maximale en 30 min (IM<sub>30</sub>) de fréquence 0,5 serait de 40 mm/h et celle de l'IM<sub>15</sub> serait de 50 à 65 mm/h correspondant à un indice d'érosivité R faible : 90 unités USA à La Tola et 60 à Cangahua.

La cangahua récupérée est d'une grande susceptibilité à l'érosion. En l'absence de mesures conservatoires, la moyenne annuelle de l'érosion mesurée entre 1986 et 1996 a été de 50 t/ha/an à Cangahua et de 95 à La Tola, en sols cultivés sur cangahua. L'érosion est causée par un petit nombre d'événements (90% de l'érosion est provoqué par moins de 10 pluies).

La présente étude menée sur de petites parcelles de dimension restreinte (10x10 m pour correspondre à une agriculture manuelle sur de fortes pentes (15 à 20%) et sur la cangahua seule (sol exclus) travaillée manuellement, sans apport d'engrais minéraux ou organique selon les pratiques locales, montre qu'il est possible de réduire considérablement l'érosion de la cangahua réhabilitée en sol, par des mesures conservatoires simples.

Deux grandes voies s'offrent au technicien :

- la première en agissant directement sur l'impact direct des gouttes de pluie sur le sol, par la présence d'une couverture végétale protectrice qui va également contribuer à maintenir une structure ouverte et perméable ;
- la seconde voie en agissant sur le ruissellement en favorisant l'infiltration par des travaux agricoles adaptés ou en ralentissant la vitesse du ruissellement ce qui baisse la compétence du ruissellement et la sédimentation.

Le protocole testé explore ces 2 voies et souligne l'efficacité d'une préculture irriguée et celle de la terrasse. Bien qu'à peine moins efficace sur l'érosion, le muret filtrant en bas de parcelle, s'avère tout à fait intéressant par son coût modeste ; il est de plus immédiatement vulgarisable car il fait partie du savoir paysan. Les études en vraie grandeur et sur parcelles de 1 000 m menées entre 1986 et 1991 avaient déjà souligné son intérêt.

#### **4. ÉRODIBILITE DES ANDOSOLS DES ANDES DU SUD-CHILI**

Cette étude a été dirigée par Peñaloza, Huber et Oyarzún (rapport final, 1997) de l'Université Australe du Chili à Valdivia. Elle a pour but de mesurer l'aptitude à l'érosion d'andosols perhydratés (hydrudands) de la pré cordillère andine du Sud-Chili. Ces andosols naturellement formés sous une forêt humide, sont utilisés récemment pour l'extension de pâturages et de cultures vivrières. Mais en climat très pluvieux (4 m de pluie/an) et sur de fortes pentes, il y a de graves risques d'érosion. Cette expérimentation avait pour but de tester l'érodibilité des andosols sous prairie et diverses pratiques agricoles locales. Cette situation est fréquente sur les hauts-versants des Andes, au dessus de la zone des sols volcaniques indurés, d'où son intérêt.

Après une longue investigation préalable pour la recherche du terrain, la définition du protocole expérimental et la mise au point d'un appareillage adapté à une station de mesures totalement automatisée, à cause de l'éloignement de l'université, les mesures n'ont commencé qu'en août 1995 et se sont poursuivies en 1996. Il n'y a donc qu'une année complète de mesures d'érosion (octobre 1995 à septembre 1996).

##### **4.1. STATION, APPAREILS ET METHODES.**

La station de Paillahuente a été choisie et installée spécialement pour cette étude. Elle est située sur la pré cordillère des Andes, au Nord-Est de Valdivia (39°45' S, 72°05' O, alt. 220 m) sur un versant en pente de 28%, récemment déboisé pour être aménagé en prairie. Le climat se caractérise par un régime de température mésic (tempéré) avec de la neige en hiver et un régime d'humidité péridic, régulièrement humide et très pluvieux (4 m/an). Les andosols sont profonds et très perméables à l'état naturel, mais très friables et érodibles quand ils sont cultivés sans précaution.

La station comporte 8 parcelles, de dimension proche du type Wischmeier (2,5x15 m de long suivant la pente = 37,5 m<sup>2</sup>). Deux parcelles sont en prairie aménagée. Six parcelles sont cultivées : en 1995-96, 3 parcelles en haricot et 3 en avoine ; après la récolte en mars 1996 et un labour en juin 1996 ; puis cultures respectivement de blé et petits pois de juillet à fin 1996. Chaque parcelle cultivée est divisée en 3 parties : 4 m de plante cultivée, une bande de 1 m de prairie et 2 répétitions. Ces bandes de prairies alternées ont pour but de réduire l'érosion sur d'aussi fortes pentes, sans avoir recours au remodelage ou à d'autres ouvrages anti-érosifs.

L'appareillage de mesures, entièrement automatisé, a été conçu, fabriqué et installé par A. Huber. Le système de réception du ruissellement et de l'érosion comporte un piège à sédiments grossiers, puis un appareil de mesure automatique du ruissellement et de prélèvement d'échantillons de suspension pour déterminer ensuite la charge solide. Un pluviographe et les différents limnigraphes sont enregistrés en temps réel et d'une manière synchrone avec une seule horloge par un système électronique dit "data logger". Les mesures et échantillons (sédiments, suspensions) sont récupérés chaque mois pour analyse et traitement de données.

##### **4.2. RESULTATS.**

###### **4.2.1. Pluie, ruissellement et érosion.**

Les résultats présentés sont un tableau des mesures mensuelles de pluie et érosion en 2 ensembles : cultures, prairies (Tab. 26) et 2 graphiques concernant la vitesse d'infiltration, la

relation pluie et ruissellement, des mesures en surface des effets sur le relief du couple érosion/sédimentation (redistribution du sol de surface sur la parcelle dans le sens de la pente).

Tableau 26. Pluie et taux d'érosion mensuels (sous culture ou prairie) en 1995-96.

Date	Précipitations mm	Erosion	
		Cultures kg/ha	Prairie kg/ha
1995			
14 Août	837.9	*	*
11 Septembre	638.4	*	*
10 Octobre	784.7	13.8	13.3
16 Novembre	518.7	17.5	10.0
1996			
7 Mars	226.1	10.8	15.5
3 Avril	259.4		
15 Mai	532.5	4.0	3.5
18 Juillet	510.7	5.0	3.8
22 Août	970.9	7.0	5.8
11 Septembre	372.4	3.8	3.4

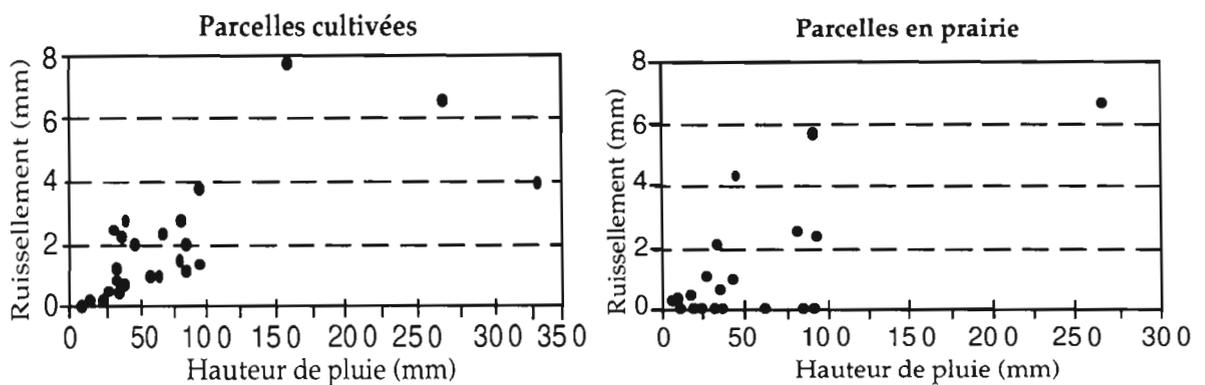


Figure 11. Hauteur de ruissellement (mm) en fonction de hauteur de pluie (mm) par événement, sur parcelles cultivées ou en prairie.

Pendant la période de mesures de l'érosion, la hauteur de pluie a été de 4 175 mm. En comparaison, l'érosion a été très faible, quasi nulle : 62 kg/ha sous cultures, 55 kg/ha sous prairies. Ce fait étonnant sous une telle intensité de pluies s'explique par les vitesses très élevées de l'infiltration, au minimum de 400 mm/heure, au maximum près de 700 mm/heure. Les hauteurs de ruissellement mesurées sont de 0 à 2 mm pour une hauteur de pluie de 0 à 50 mm, de 2 à 4 mm pour une pluie de 50 à 100 mm, 6 à 8 mm au delà jusqu'à 350 mm. Le taux de ruissellement demeure faible pour de fortes pluies.

D'autre part les matériaux arrachés par le flux ruisselé sur les parcelles cultivées sont déposés à contre distance, surtout à l'amont des bandes de prairies intercalées entre chaque surface cultivée. En première année de culture (avoine, haricot) sur une longueur de 5 m, les dénivellations en moins à l'amont et en plus à l'aval sont de 1 à 2 cm. En deuxième année (blé, petits pois), les dénivellations sont de 2 à 6 cm à l'amont, + 2 à 4 cm à l'aval. Donc les sédiments sont arrêtés par la bande de prairie intercalaire.

### 3.2.2. Pertes de nutriments dans les eaux de ruissellement.

Le tableau suivant (Tab.27) donne les concentrations mesurées des éléments Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, ainsi que pH et conductivité des produits du ruissellement superficiel (eau en suspension).

Tableau 27. Concentrations élémentaires (mg/l) dans les ruissellement et les eaux de pluie.

Date	Culture	pH	Cond. μS	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn
				----- mg/l -----					
Septembre 95*	Avoine	7.18	31	0.68	0.28	1.81	0.25	0.03	0.00
	Haricot	7.20	38	0.72	0.37	2.22	0.28	0.02	0.02
	Prairie	5.82	28	0.35	0.01	1.87	0.27	0.03	0.00
Décembre 95**	Avoine	6.78	90	2.21	11.02	3.96	1.24	0.47	0.16
	Haricot	6.95	90	2.25	11.35	4.03	1.46	0.91	0.09
Juillet 96*	Labour	5.03	46	0.75	1.74	1.53	0.49	0.12	0.02
	Prairie	6.19	30	0.54	0.47	1.39	0.35	0.13	0.00
Août 96**	Blé	5.56	42	0.52	1.11	1.37	0.38	0.11	0.01
	Pois	5.91	39	0.56	1.22	1.37	0.39	0.15	0.01
	Prairie	5.79	28	0.45	0.49	1.38	0.38	0.09	0.00
Pluie		6.06	32	1.79	0.34	0.90	0.18	0.09	0.00

\* Sans engrais, \*\* Avec engrais.

La concentration en éléments K, Ca et Mg n'est pas négligeable par rapport à celle des eaux de pluie, montrant une certaine exportation de ces éléments par les eaux de ruissellement. Il est regrettable de n'avoir pas les concentrations en N et P. Quoiqu'il en soit, l'exportation par ruissellement est négligeable alors que l'exportation par drainage interne est probablement très élevée.

#### 4.3. CONCLUSIONS.

En conclusion, les mesures de ruissellement et d'érosion sur les andosols cultivés ou en prairie montrent que l'érosion dans ces conditions bien contrôlées est très faible malgré l'intensité très forte des pluies. Ce résultat est intéressant ; il n'est valable que dans la mesure où ce type d'exploitation est bien contrôlé.

## BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE V

- Baumann J. et Werner G. Erodibility of volcanic ash soils in the central Mexican Highlands. Actes 3<sup>e</sup> simposio suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (à paraître).
- Cazenave A. et Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne ; influence sur l'infiltration. Ed Orstom, coll. Didactiques, 229 p.
- Custode E., De Noni G., Trujillo G., Viennot M., 1992. La cangahua en el Ecuador : caracterización morfo-edaforica y comportamiento frente a la erosión. Actes du Symposium international sur les sols volcaniques indurés, Terra vol.10, Mexico, 332-346.
- De Noni G., Viennot M., Trujillo G., 1989-1990. Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur, Cah. ORSTOM, série pédologie, vol. XXV, n° 1-2. Paris, pp. 183-196.
- De Noni G., Viennot M., Trujillo G. et Custode E., 1996. Ruissellement et érosion sur des parcelles de cangahua récupérée pour l'agriculture de 1994 à 1996, Equateur. Actes 3<sup>e</sup> symposium sols volcaniques indurés, Quito 1996 (à paraître).
- De Noni G., Viennot M., Asseline J., Trujillo G., 1997. L'homme, la montagne et l'érosion des sols cultivés. Cas des Andes équatoriennes (Amérique du Sud). Orstom Montpellier, 200 p., 16 cartes, 20 tableaux, 38 fig., annexes (sous presse).
- Fechter U. et Werner G., 1997. Rapport final. Contrat TS3\* CT93 0252.
- Fechter U., Vera A. et Werner G., 1996. Erosion hidrica sobre un suelo volcanico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala, Mexico. Actes 3<sup>e</sup> simposio suelos volcanicos, Quito 1996 (à paraître).
- Jérôme G., 1992. Etude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le tepetate, dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique. Comparaison avec un sol non induré. Mémoire de fin d'études Inst. Sup. Tech. Outre-Mer, juin 1992, 191 p.
- Lauffer M., Leroux Y., Prat C. et Janeau JL. 1996. Organizacion superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, Mexico). Actes 3<sup>e</sup> simposio suelos volcanicos, Quito 1996 (à paraître).
- Leroux Y. 1995. Suivis des réorganisations superficielles de parcelles de sol et de tepetates (Texcoco, Mexique). Mémoire fin d'études ISTOM, juin 1995, 76 p.
- Leroux Y. 1996. Caractérisation hydrodynamique de sols volcaniques indurés (cangahua), cultivés en Equateur. Mémoire DESS Université Paris XII, Créteil. Octobre 1996, 82 p.
- Oyarzun C.E., Huber A., Peñaloza R. et Santana R. 1996. Evaluación de la erosión del suelo mediante parcelas experimentales en suelos volcánicos del Sur de Chile. Actes 3<sup>e</sup> simposio suelos volcanicos, Quito 1996 (à paraître).
- Oropeza J.L. et al. 1997. Rapport final. Contrat TS3\*CT93 0252.
- Peña D. et Zebrowski C., 1992. Informe del mapa morfoedaforico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, y anexos : 1. Mapas temáticos ; 2. Description de perfiles. Annexe au rapport final contrat CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- Pourrut P., 1994. l'eau en Equateur, principaux acquis en hydroclimatologie. Orstom, Paris, 147 p.
- Prat C. et al., 1997. Rapport final. Contrat TS3\* CT93 0252.
- Prat C., 1996. Analisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el area experimental de San Miguel Tlaxpan (Texcoco, Mexico). Actes 3<sup>e</sup> symposium sols volcaniques indurés, Quito 1996 (à paraître).

Prat C, Baez A. y Marquez A., 1996. Erosion y escurrimiento en parcelas de tepetates t3, Texcococ, Mexico. Actes 3<sup>e</sup> symposium sols volcaniques indurés, Quito 1996 (à paraître).

Quantin P. et al. 1992. Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final, CEE n° TS2 A 212 C. 77 p.

Quantin P. Rapport scientifique, année 1994, contrat n° ERB-TS3\* CT 9302252. Régénération et conservation de sols volcaniques indurés d'Amérique Latine : Chili, Ecuador, Mexico, 29 p.

Quantin P. Rapport scientifique, année 1995, contrat n° ERB-TS3\* CT 9302252. Régénération et conservation de sols volcaniques indurés d'Amérique Latine : Chili, Ecuador, Mexico, 29 p.

Quantin P., Prat C. et Zebrowski. 1993. Erosion et restauration de sols volcaniques indurés "tepetates" de la région de Mexico et de Tlaxcala, mexique. Cah. ORSTOM, série pédologie, vol. XXVIII, n° 2. Paris, pp. 175-186.

Roose E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matière sous végétations naturelles ou cultivées. Trav. Doc. Orstom n° 130, 569 p.

Salazar-López J., Oropeza-Mota J.L. et Rios-Berber J.O., 1996. Sistema integral modular para la lectura de pluviogramas y limnigramas especiales (SIMPLE). Actes 3<sup>e</sup> simposio suelos volcanicos endurecidos, Quito 1996 (à paraître).

Wischmeier W.H. et Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation plannig. USDA Agr. Handbook n° 537.



## CONCLUSIONS

### 1. CARACTERISATION GENESE ET GEOGRAPHIE DES SOLS VOLCANIQUES A HORIZONS INDURES.

Les horizons indurés de sols volcaniques d'Amérique Latine ont diverses origines. Nous avons contribué à préciser au cours de notre premier programme de l'Union Européenne au Mexique, puis de ce second programme au Mexique et en Equateur.

La plupart des horizons indurés sont des tufs altérés à la base d'un paléosol : certains sont faiblement indurés et friables, à consistance de fragipan ; d'autres, plus fortement cimentés par de la silice et du calcaire, ont une consistance de duripan et éventuellement des propriétés d'horizon pétrocalcique. Beaucoup plus rarement, il s'agit de sols argileux altérés et fortement silicifiés, qui sont de vrais duripans.

Ces horizons indurés ont localement divers noms, notamment cangahua en Equateur ou tepetate au Mexique. Dans tous les cas ils signifient horizons durs et stériles.

Les apports majeurs de nos travaux sont les suivants :

#### 1.1. TEPETATES DE TYPE FRAGIPAN DU HAUT-PLATEAU CENTRAL MEXICAIN.

##### 1.1.1. Caractérisation et genèse.

Nous avons montré que les tepetates-fragipans se sont formés suivant une séquence pédogénétique et topo-climatique, en climat subhumide à subaride, et suivant une succession stratigraphique de dépôts pyroclastiques (T1, T2a, T2b, T3). Nous avons caractérisé leurs propriétés et leur genèse.

L'étude de C. Hidalgo (Thèse, 1995) a permis de préciser la cause de leur induration : l'orientation parallèle d'argiles gonflantes à forte composante de smectites, et une légère intercalation de silice non cristalline produisent une forte cohésion à l'état sec, mais réversible à l'état humide.

##### 1.1.2. Cartographie.

La cartographie détaillée des sols à tepetate avait été faite dans les régions de Texcoco (Mexico) et d'Apan (Tlaxcala). Sur la base de ces cartes, une analyse combinée d'images LANDSAT et de cartes régionales (INEGI, UNAM) a permis de mettre au point une méthode d'extrapolation pour actualiser la cartographie des tepetates du haut-plateau central mexicain (A. Severnay, 1997).

#### 1.2. CANGAHUA DE LA VALLEE INTERANDINE D'EQUATEUR.

##### 1.2.1. Caractérisation et genèse.

En 1994, la connaissance de la cangahua était imprécise ; sa formation, volcanique ou pédologique, était controversée. Nous avons précisé l'origine et les propriétés des formations supérieures de cangahua qui affleurent après érosion, par l'observation de leur distribution spatiale et stratigraphique, et par leur analyse chimique, minéralogique et pétrographique (Quantin et Zebrowski, 1997).

La cangahua, comme le tepetate, apparaît sur les piémonts volcaniques suivant une séquence topo-climatique, entre 3 200 et 2 400 m d'altitude en Equateur, du climat subhumide au climat subaride. En amont elle est friable, de type fragipan et souvent enfouie sous un sol profond ; en aval elle dure, un peu silicifiée et plus ou moins calcaire, de type duripan calcique, et souvent affleurante par érosion ou sous un sol peu profond. La cangahua aussi provient d'une successions de tufs dacitiques ou rhyodacitiques à la base de paléosols. Dans la région nord l'âge de la cangahua supérieure est entre 14 000 à 21 000 ans BP, celui de la cangahua sous-jacente, entre 21 000 et 33 000 ans BP.

La composition des argiles et des propriétés de la cangahua varient suivant a séquence climatique : à l'aval une prédominance de smectites et une cimentation par de la silice et du calcaire lui donne les propriétés d'un duripan calcique ; à l'amont une prédominance d'halloysite et très peu ou pas de silice lui donnent les propriétés de fragipan ; au sommet ce sont des andosols à allophane, avec ou sans fragipan. La cangahua contient toujours beaucoup de verres et minéraux volcaniques, mais peu d'argile (6 à 25%) et quasiment pas de matière organique. C'est donc un horizon d'altération à la base d'un paléosol. Dans le cas de la cangahua supérieure, le sol enterré sous les cendres volcaniques récentes se serait formé en climat plus aride que l'actuel ; ce qui explique l'accumulation de silice et de calcaire.

La cangahua de type duripan calcique, à l'aval de la séquence est celle qui affleure le plus par érosion et sur laquelle nous avons fait notre expérimentation. Pour le même étage climatique, quel que soit son foyer volcanique, sa composition et ses propriétés varient peu.

### **1.2.2. Propriétés.**

La cangahua de type duripan calcique est compacte, dure et peu friable à l'état sec, très peu perméable à l'eau et à l'air malgré une porosité globale d'environ 40%. Cependant, la cangahua peu calcaire est partiellement friable et instable dans l'eau. Elle contient 25 à 45% de fraction limono-argileuse, mais seulement 6 à 25% d'argile ; cependant, sa capacité de rétention en eau au champ est de 19 à 24%. La teneur en calcaire est de 0 à 2% dans la masse, 25 à 60% dans les encroûtements superficiels. Le pH est supérieur ou égal à 8. La capacité d'échange de cations est de 16 à 22 me/100 g et la saturation en bases de 100%. Elle n'a quasiment pas de carbone organique, d'azote et de phosphore assimilable.

La cangahua de type fragipan est friable, instable dans l'eau, plus limoneuse et un peu plus argileuse que celle de type duripan. Le pH est de 6,6 à 7,1. La capacité d'échange de cations est seulement de 8 à 11 me/100 g ; mais la saturation en bases est de 90 à 100%. Comme l'autre type elle ne contient que des traces de carbone organique d'azote et de phosphore assimilable.

### **1.2.3. Géographie et cartographie.**

Les affleurements de cangahua sont situés sur les piémonts volcaniques de la moitié nord de la Vallée interandine, entre 0° 48' Nord et 2° 17' Sud, de 2 400 à 3 400 m d'altitude.

#### **1.2.3.1. Cartographie.**

Les cartes antérieures de sols (Colmet-Daage et al., 1974-1984) ont été révisées par Zebrowski (1997) et synthétisées en une carte unique à 1/400 000e des sols à cangahua de la Vallée interandine d'Equateur. L'auteur a distingué 4 unités de sol à cangahua, selon l'étage climatique et l'épaisseur du sol au dessus de la cangahua, ainsi qu'une unité de cangahua affleurante. La superficie des sols à cangahua, dont la cangahua affleurante, est d'environ 2 400 km<sup>2</sup>, soit 37% des terres cultivées de cette région ; la cangahua affleurante du fait de l'érosion couvre actuellement 800 km<sup>2</sup>, soit un tiers du total, surtout sur le piémont inférieur où l'agriculture était la plus intensive.

La progression de l'érosion a été rapide depuis 30 ans, suite à la réforme agraire et à la mécanisation de l'agriculture. Dans la région de Cayambe, la comparaison de photographies aériennes montre que les surfaces érodées ont augmenté de 300% (Gasselin, 1995). La

réhabilitation des surfaces en cangahua est encore peu développée : au plus 1 000 ha en agriculture et quelques milliers reboisés en eucalyptus ; mais ces évaluations sont imprécises.

### ***1.2.3.2. Evaluation spatiale et multitemporelle des affleurements de cangahua, par traitement d'images SPOT.***

Cinq vues ont été prises spécialement pour ce programme en 1995 (CNES-ISIS), traitées et comparées à des vues de 1986, ainsi qu'à la carte de Zebrowski qui a servi de référence (De Noni et al., 1997), sur l'ensemble de la région.

Une méthode de traitement a été mise au point par étapes successives : un premier essai pour classer et extraire plusieurs thèmes relatifs à la cangahua : affleurante, discontinue et "intermédiaire", ainsi qu'aux boisements d'eucalyptus et en "végétation" (naturelle et cultivée), suivi d'une vérification terrain avec calage de témoins et une comparaison multitemporelle (image de l'Ilalo, Severnay, 1995) puis une extension à la cartographie régionale (Faure, 1996).

L'étude multitemporelle dans la région de l'Ilalo, près de Quito, a mis en évidence la progression rapide des surfaces attribuées à la cangahua en seulement dix ans : en moyenne multipliées par 2,5 ; dont 2,8 en cangahua affleurante, 4,7 en cangahua intermédiaire, 1,8 en cangahua discontinue. Pendant le même temps, près de 300 ha partiellement érodés auraient été réhabilités en agriculture. Mais sur 1 200 ha reboisés en eucalyptus il ne resterait que 260 ha. L'évolution des surfaces en cangahua est donc très rapide.

La cartographie régionale à partir d'images SPOT a permis d'évaluer à environ 2 600 km<sup>2</sup> la superficie actuellement en différent degrés d'affleurement de cangahua. Si on compare avec la carte des sols à cangahua de Zebrowski, la surface en cangahua affleurante est quasi la même ; sur près de 1 900 m<sup>2</sup> les surfaces se recouvrent ; mais sur les autres il n'y a pas concordance. Soit des sols à cangahua ne présentent pas assez d'affleurement de cangahua pour être détectés par SPOT ; soit des surfaces attribuées en cangahua discontinue d'après SPOT ne correspondent pas à des sols à cangahua (autres matériaux volcaniques, végétation en saison sèche, etc.). La méthode n'est donc pas complètement au point et nécessite plus de rigueur quant au choix des dates de prises de vue, au calage de la vérité terrain, et à la sélection des critères.

## **2. FACTEURS DE FERTILITE POTENTIELLE DES HORIZONS INDURES CULTIVES.**

Le précédent programme avait révélé les principaux facteurs limitant du tepetate de type fragipan, à savoir : compacité, dureté, très faible porosité à l'air et à l'eau, carences en carbone organique, azote et phosphore assimilable, stérilité microbiologique et absence de symbiotes, éventuellement alcalinité et déficience en micronutriments. Cependant, après correction de ces limites par une fragmentation du tepetate en agrégat optimum (3 à 5 mm), apport d'azote et de phosphore ou de fumure organique et éventuellement de microorganismes symbiotes ; d'autres facteurs sont favorables, à savoir : teneur convenable en éléments fins et notamment en argile à forte capacité de rétention d'eau et d'éléments basiques (Ca, Mg et K) utiles à la plante, assez bonne stabilité des agrégats de taille supérieure à 2 mm ; faible fixation et bonne disponibilité du phosphore apporté. Après correction des facteurs limitants, le tepetate cultivé est potentiellement aussi productif, voire un peu plus, que le sol agricole naturel.

Au cours de ce deuxième programme nous avons vérifié les facteurs de fertilité de la cangahua d'Equateur de type duripan calcique et approfondi l'étude du tepetate cultivé.

### **2.1. CANGAHUA D'EQUATEUR DE TYPE DURIPAN CALCIQUE.**

Les facteurs limitant sont les mêmes que ceux du tepetate. La cangahua peu calcaire est pratiquement aussi friable et les agrégats de taille supérieure à 3 mm sont assez stables. La teneur en argile est moindre, souvent entre 7 et 12%, mais suffisante cependant pour assurer une bonne rétention en eau utile à la plante (20%) et en bases échangeables, Ca, Mg et K. Mais le pH est alcalin ( $\geq 8$ ).

Une expérimentation en vase de végétation (Cisneros et al., 1996) a confirmé la carence majeure en azote et phosphore. Elle a montré aussi un déséquilibre mineur, par excès de Ca / Mg et une légère déficience en Fe par suite de l'alcalinité. Une diminution du pH par fumure organique et une légère compensation en K après plusieurs cultures pourraient être utiles.

## **2.2. TEPETATE MEXICAIN DE TYPE FRAGIPAN.**

Il y a eu premièrement une observation de l'évolution de certaines propriétés physiques du tepetate cultivé sous l'effet de deux modes de labour et une mesure du développement des racines de plusieurs plantes (Fechter et al., 1997) ; deuxièmement un état du niveau nutritionnel de tepetates cultivés en fonction du nombre d'années de culture, une analyse de la dynamique de la matière organique et de l'azote, ainsi que de la biomasse microbienne (Etchevers et al., 1997) ; troisièmement une étude de l'activité microbienne et une expérimentation de l'inoculation de bactéries fixatrices d'azote et d'endomycorhizes qui améliorent la nutrition en phosphore (Ferrera et al., 1997).

Nous résumerons brièvement les conclusions majeures de ces travaux.

### **2.2.1. Evolution des propriétés physiques.**

La conductivité hydraulique au champ après labour sous culture de maïs, diminue rapidement de 250 à 10 mm/h et se stabilise quel que soit le mode de labour, traditionnel avec buttage ou minimum sans sarclage. De même, la porosité se stabilise vers 55 à 56%, valeur élevée par rapport au tepetate initial (45%).

La porosité grossière est plus grande en labour minimum (22% / 19%) ; tandis que la porosité moyenne, qui assure la réserve d'eau utile, est supérieure en labour traditionnel (22% / 17%). Cependant l'humidité du tepetate cultivé demeure peu différente dans les deux cas ; en revanche, l'humidité est moindre en labour minimum avec couvert végétal intercalaire ; ce qui manifeste un risque de concurrence pour l'eau aux dépens du maïs.

La stabilité des agrégats (2 à 5 mm) de tepetate, évaluées d'après la vitesse de percolation en cylindre, se maintient meilleur à l'abri du couvert végétal dans les 5 cm supérieurs du sol.

### **2.2.2. Développement des racines.**

Il a été observé en profils racinaires et évalué par pesée (biomasse racinaire) sur des cultures de maïs, maïs + fève, fève, haricot et orge.

Le maïs seul développe ses racines sur au moins 50 cm de profondeur et produit une masse racinaire de 1 500 à 1 700 kg/ha, quel que soit la labour ; sous couvert végétal intercalaire les racines se concentrent près de la surface et le développement des racines de maïs est réduit en profondeur, par effet de la concurrence.

La fève seule développe profondément ses racines à au moins 60 cm de profondeur. En association maïs + fève, le développement des racines est fortement accru en surface et en profondeur, sans concurrence des deux plantes ; la biomasse racinaire est près de 3 000 kg/ha, soit le double du maïs seul.

Le haricot et l'orge développent leurs racines respectivement à 40 et 30 cm de profondeur et produisent respectivement 1 900 et 1 300 kg/ha de racines.

En conclusion, le maïs et la fève nécessitent une profondeur de 50 à 60 cm pour un bon développement des racines ; ces deux plantes se complètent sans se concurrencer ; il n'y a pas de différence entre labour traditionnel et labour minimum ; mais un couvert végétal intercalaire (luzerne, mauvaises herbes) est concurrentiel et dépressif pour le maïs.

### **2.2.3. Etat nutritionnel des tepetates cultivés.**

Il s'agit d'un bilan chimique de parcelles de tepetate en agriculture traditionnelle et de différents âges de mise en culture, de 0 à 60 ans. Un essai de classement en 4 classes de valeur croissante des paramètres chimique, s'est révélé sans aucune relation avec la productivité et sans intérêt pour le classement des parcelles cultivées.

Une analyse de la productivité du maïs sur 16 parcelles de différents âges (0 à 60 ans), en fonction de leur teneur en carbone organique, azote, phosphore assimilable et de l'âge, n'a pas démontré qu'il y a amélioration croissante des facteurs chimiques et de la fertilité. L'amélioration est sensible au cours des 3 à 5 premières années, puis se stabilise et même régresse au delà de 21 ans. Les teneurs relativement basses en carbone, azote et phosphore, quel que soit l'âge des parcelles, montrent que la fertilisation est insuffisante en culture traditionnelle pour améliorer progressivement la fertilité potentielle. D'autre part l'absence de relation entre les paramètres chimiques et la productivité suggère d'autres facteurs aléatoires non contrôlés.

### **2.2.4. Dynamique de la matière organique et de l'azote.**

Sur les mêmes 16 parcelles de tepetates cultivés il y a eu évaluation de la biomasse végétale, de ses apports en azote, de la minéralisation de l'azote et du taux de minéralisation des résidus de récolte. Mais la variabilité aléatoire des résultats ne permet pas d'établir une relation ni avec l'âge des parcelles ni avec l'état chimique des parcelles. Cependant, à partir de la moyenne des résultats il est possible de faire une estimation globale du bilan d'exportation en azote de la biomasse végétale produite par le maïs (tige, racine, grain) et par les mauvaises herbes (tige, racine), et des retours par résidus de récolte après minéralisation, sur l'ensemble des parcelles de tepetate représentatives de cette région.

Une production moyenne du maïs local de 850 kg de grain, 2 100 kg de paille et 440 kg de racines exporte près de 40 kg de N/ha. Mais les mauvaises herbes estimées à 1 500 kg de racines et près de 3 000 kg de tiges et feuilles exportent aussi près de 47 kg de N/ha ; soit au total près de 87 kg de N/ha sont nécessaires. Le retour des divers résidus de récolte après minéralisation partielle (35% / an) n'est au mieux que de 12 kg/ha. Pour une production optimum de 3 t/ha de maïs-grain, sans production de mauvaises herbes, il faudrait entre 100 et 110 kg/ha de N (sans compter les pertes). Les faibles rendements du maïs sur tepetate cultivé s'expliquent donc par l'insuffisance des apports d'engrais organiques et minéraux et par la forte concurrence des mauvaises herbes. Le retour des résidus de récolte est nettement insuffisant.

Les taux d'azote minéralisable et d'azote labile obtenus par incubation au laboratoire sont en relation avec un apport ou non de fumure organique. Mais leur valeur ne peut prédire la fourniture réelle d'azote au champ. Elle paraît exagérée si on l'exprime en kg de N/ha.

### **2.2.5. Evaluation et dynamique de la biomasse microbienne.**

Le nombre de colonies de microorganismes (bactéries, actinomycètes et champignons) est évidemment faible dans le témoin, quasi stérile. Il augmente progressivement en fonction de la teneur en matière organique, en azote minéralisable et en phosphore assimilable, des parcelles en agriculture traditionnelle à celles en agriculture très intensive. En agriculture traditionnelle sur tepetate le taux de carbone de la biomasse microbienne est bien inférieur à celui d'un sol agricole ; ce taux n'est pas non plus en relation avec l'âge des parcelles. Donc l'amélioration du stock organique et de l'activité microbienne sur les tepetates cultivés (agriculture traditionnelle) est faible et aléatoire.

### **2.2.6. Inoculation de bactéries fixatrices d'azote.**

Il y a eu expérimentation de diverses souches de *Rhizobium* spécifiques de la fève, du haricot et du mélilot blanc, ainsi que d'*Azospirillum* symbiote externe des racines du maïs.

Dans l'essai au champ à San Miguel Tlaixpan (Texcoco), l'expérimentation en 2<sup>e</sup> année de culture a permis de suivre l'activité de la nitrogenase et donc de la fixation d'azote près des racines de fève et de haricot inoculés en Rhizobium et de maïs inoculé par Azospirillum. La présence d'une flore de Rhizobium naturel a peut-être réduit la signification de cet essai. L'activité fixatrice d'azote est beaucoup plus élevée pour la fève que pour le haricot et d'autres légumineuses (vesce, pois) ; mais celle d'Azospirillum pour le maïs est inférieure à celle des Rhizobium. Il n'y a pas de différence significative d'activité entre monoculture de légumineuse et culture associée avec le maïs, donc pas d'interaction à distance entre légumineuse et maïs. La fumure organique (20 t/ha) accroît significativement l'activité de la nitrogenase ; tandis que la fertilisation minérale l'inhibe. Mais il n'y a pas de corrélation entre activité de la nitrogenase et productivité, sans doute parce que la nutrition de la plante est assurée par la fertilisation minérale et dans une certaine mesure la fumure organique, bien que dans ce cas la synergie devrait être profitable.

Dans l'essai en serre sur Melilot blanc, il y a eu comparaison d'un témoin avec fertilisation de phosphore, et d'inoculation de plusieurs souches de Rhizobium en présence de 3 doses de vermicompost (5, 10 et 15 t/ha). L'activité de la nitrogenase, nulle pour le témoin demeure faible pour 5 et 10 t/ha de vermicompost. Elle n'est importante qu'à partir de 15 t/ha. Donc l'activité du Rhizobium sur tepetate ne se développe qu'à partir d'une dose suffisante de fumure organique.

#### **2.2.7. Inoculation d'endomycorhizes.**

Il y a eu expérimentation de diverses souches de Glomus sur maïs et sur diverses autres plantes.

L'essai en serre sur *Eysenhardtia polystachya* de 3 souches de Glomus et de 3 doses de fumier (5, 10 et 15 t/ha) montre les faits suivants : une amélioration significative de la production de fourrage et de sa qualité par les mycorhizes, due à une meilleure assimilation du phosphore. Mais l'apport de fumier à partir de 10 t/ha augmente fortement cet effet et la qualité du fourrage en azote ; donc le fumier accroît la nutrition azotée et il y a synergie des deux.

L'essai en serre sur maïs (6 variétés) d'une souche de Glomus, associé ou non à 12 t/ha de vermicompost, ou sur témoin montre qu'il n'y a pas d'effet de la mycorhize sur le maïs sans apport de fumure organique mais cet effet sur un court terme (50 jours) n'est pas significativement supérieur à celui de la fumure organique seule.

L'essai au champ sur oignon d'une souche de Glomus, avec fertilisation minérale ou de vermicompost à 5 t/ha seulement par la mycorhize seule ; une amélioration due au couple mycorhize + vermicompost significativement supérieure au compost seul, mais égale à la fertilisation minérale seule. Donc il y a bien synergie nutritive de la mycorhize et du compost organique.

Un essai d'inoculation combinée de Rhizobium et de Glomus sur deux espèces d'Acacia et de Leucaena a été inefficace sans aucune fertilisation minérale ou organique.

En conclusion, sauf rares exceptions où le Rhizobium ou l'endomycorhize seuls peuvent améliorer un peu le développement de la plante, les inoculations de Rhizobium, Azospirillum et Glomus sont inefficaces sans aucune fertilisation préalable du tepetate. La fertilisation minérale (NP) à haute dose rend inutile cette inoculation en inhibant l'activité des symbiotes. Mais la fumure organique à partir d'une certaine dose développe cette dernière : à dose modérée la synergie des deux est bénéfique. Cependant, l'activité des symbiotes devient inutile à plus forte dose, la nutrition de la plante étant assurée par la fumure organique.

### **3. EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE ET PRODUCTIVITE.**

Au Mexique sur tepetate de type fragipan, après l'étude préliminaire du précédent programme, prolongée en 1992-93, nous avons fait une expérimentation plus systématique et diversifiée. En Equateur, sur cangahua de type duripan calcique, nous nous sommes limités à une expérimentation préliminaire en petite station et sur un essai en milieu paysan.

### **3.1. CAS DES TEPETATES MEXICAINS DE TYPE FRAGIPAN.**

Au cours du précédent programme nous avons observé que le tepetae cultivé avec une fertilisation minérale (N, P) et organique produit normalement pour certaines plantes dès la première année de production pour le maïs dès la deuxième, et atteint son optimum de production dès la troisième.

Lors de ce second programme nous avons étudié plus en détail l'effet du nombre d'années de cultures, l'impact du précédent cultural ou de certaines façons ou rotations culturales, ou de facteurs stationnels. Nous avons surtout fait en vue d'une application durable une étude systématique de l'intérêt d'une fertilisation biologique (inoculation de symbiotes), organique ou minérale, ou combinée, en 1<sup>ère</sup>, 2<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> années de culture. Nous avons aussi testé diverses plantes et associations ou successions culturales pratiquées localement.

#### **3.1.1. Impact du nombre d'années de culture, en station expérimentale.**

Sur la station de Hueyotlipan, l'observation a duré 5 années, de 1991 à 1995. Il y a eu une fertilisation minérale (FM : NP) normale pendant 5 ans, mais la fumure organique (MO : 40 t/ha de fumier frais) n'a été appliquée que sur la moitié des parcelles en 1<sup>ère</sup> année, et renouvelée en 5<sup>e</sup> année. Les plantes expérimentées ont été : blé, maïs, maïs + fève, maïs + haricot et vesce.

La production du blé a été bonne dès la première année : 3 à 3,5 t/ha avec fertilisation minérale, 3,5 à 6 t/ha avec fertilisation minérale et organique. elle s'est maintenue de 3,1 à 3,3 t/ha en 1993, 3<sup>e</sup> année particulièrement sèche, et de 3,2 à 3,5 t/ha en 4<sup>e</sup> année, normale, bien qu'il n'y ait pas eu de renouvellement de la fumure organique. La production de blé demeure régulière avec fertilisation minérale.

La production du maïs (associé à la fève) est irrégulière et très sensible aux aléas climatiques ou de fertilité. Elle est quasi nulle en 1<sup>ère</sup> année, malgré la fertilisation organique et minérale, pour des raisons biologiques encore mal élucidées (besoin d'endomycorhize ?). La production est bonne dès la 2<sup>e</sup> année : 2,5 t/ha avec FM, 3,5 t/ha avec FM + MO ; cette plante est très exigeante ; l'impact de la fumure organique est fort. Mais en 3<sup>e</sup> année, particulièrement sèche, la production n'a été que de 0,8 à 0,9 t/ha. En 4<sup>e</sup> année, le rendement revient à 3,1 t/ha (l'effet MO a disparu). En 5<sup>e</sup> année, avec renouvellement de la fumure organique, le rendement n'a été que de 2,4 t/ha avec FM et 2,8 t/ha avec FM + MO. La production de la fève associée au maïs est aussi irrégulière : modérée en 1<sup>ère</sup> année (0,6 à 1,9 t/ha), faible en 3<sup>e</sup>, puis modérée (0,8 à 0,9 t/ha) en 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> années de culture.

En conclusion, comme nous l'avons noté dans le chapitre précédent, il n'y a pas de progression systématique de la production sur tepetae cultivé en fonction du nombre d'années de culture, même avec un suivi rationnel de la fertilisation minérale et organique. Ce fait a été confirmé sur la station de San Miguel Tlaxpan en 4 années de culture d'orge, maïs et fève. La production de céréale (blé, orge, avoine) est assez régulière ; celle de maïs et de fève est très irrégulière.

#### **3.1.2. Impact du précédent cultural sur la production de blé en 4<sup>e</sup> année de culture, station de Hueyotlipan.**

Le précédent de l'année antérieure pouvait être la culture associée maïs-fève ou le blé. L'effet résiduel de la fumure organique en 4<sup>e</sup> année a été un peu sensible au début du développement mais quasi nul sur le rendement en grain. Le précédent immédiat de l'association maïs-fève produit nettement plus, 3,6 t/ha en moyenne, que le précédent blé, 3,0 t/ha en moyenne. Le précédent 3 années en culture maïs + fève produit le plus, 4 t/ha ; tandis que le précédent 3 années en culture de blé produit le moins, 2,8 t/ha. Donc la culture associée maïs + fève améliore fortement la productivité du blé, sans doute à cause de l'apport d'azote par la légumineuse.

### **3.1.3. Impact du facteur stationnel sur une terrasse de tepetate cultivé.**

Cette observation a été faite sur la station de Hueyotlipan, en 3<sup>e</sup> année de culture d'une association maïs + fève. Sur la partie amont le sol de tepetate cultivé est moins profond, plus grossier et retient moins l'eau. A l'aval le sol est plus profond, plus fin, plus humide et il accumule les produits érodés en surface ou lixiviés du sol amont. La production de maïs de l'amont vers l'aval s'est accrue de 2,8 à 3,4 t/ha ; mais pour la fève c'est l'inverse, car il y a concurrence entre le développement du maïs à l'aval et la production de la fève (pour des raisons physiologiques et sanitaires). Globalement pour l'association maïs-fève l'accroissement de production reste modéré à l'aval. Ce fait a été aussi constaté sur la station de San Miguel Tlalxpan : la production sur les terrasses en aval est meilleure que sur celles situées en amont.

### **3.1.4. Impact du labour traditionnel et du labour minimum sur la production de maïs, station de Tlalpan en 6<sup>e</sup> année de culture.**

Le labour traditionnel comporte une succession de 3 travaux amenant au buttage du maïs. Le labour minimum est unique, à plat et sans sarclage. Une variante du labour minimum est le désherbage chimique ou la culture intercalaire d'une légumineuse pour couvrir le sol. La fertilisation est seulement minérale. Le meilleur rendement (2,2 t/ha) a été obtenu sur labour traditionnel. Il a été 2 fois moindre (1,2 t/ha) sur le labour minimum sans couverture végétale intercalaire. *Ceci est dû à la vesce d'un plant sur deux (ils sont plantés deux par deux), car les variétés mexicaines sont particulièrement sensibles à la vesce.* Toutefois, cela ne s'explique pas par une meilleure économie de l'eau ou une plus grande profondeur du sol dans le cas du buttage. Le labour minimum avec couvert végétal a réduit les risques de *vesce*, amélioré la production à 1,6 t/ha malgré une forte concurrence des plantes intercalaires pour le maïs. La culture de maïs avec labour minimum nécessite donc d'autres pratiques culturales (mode du semis, couvert intercalaire).

### **3.1.5. Impact de la fertilisation biologique, minérale ou organique sur la production de maïs + fève en 5<sup>e</sup> année de culture, station de Hueyotlipan.**

Sur deux blocs, avec ou sans fumure organique (MO, fumier 40 t/ha), il y avait 5 traitements : témoin (T), inoculation de rhizobium et Azospirillum (I), fertilisation "starter" (I, 15-60), I + FS, fertilisation minérale (FM, 120-60), qui ont été appliqués à une variété de maïs + fève ; parallèlement deux traitements I + FS et FM, avec ou sans appliqués à 4 variétés locales de maïs. Les résultats majeurs sont les suivants.

En 5<sup>e</sup> année de culture du tepetate après blé, il n'y a pas d'effet résiduel des fertilisations antérieures sur la production du maïs ou de la fève qui sont très faibles sur le témoin. La fertilisation biologique (inoculation) seule est inefficace ; de même la fertilisation starter seule, par défaut d'azote. Pour le maïs une fertilisation minérale ou organique à dose suffisante est indispensable.

Pour le maïs la fumure organique seule ne produit que 1,1 t/ha de grain ; mais la fertilisation starter double le rendement à 2,2 t/ha et l'inoculation l'améliore encore à 2,6 t/ha, qui est proche de l'optimum de production (3t/ha en culture associée). La fertilisation starter compense la déficience en P, active la vie microbienne et l'inoculation développe la fixation d'azote. Cette synergie est donc profitable. La fertilisation minérale seule est presque aussi productive à 2,4 t/ha que la combinaison MO + FS + I. La combinaison fumure organique et minérale est la plus productive à 2,8 t/ha et proche de l'optimum ; mais cette solution est très coûteuse. La meilleure alternative économique est donc fumure organique + fertilisation starter + inoculation, ou fertilisation minérale complète (120-60-00).

La fève a un comportement très différent du maïs, en association. Elle peut produire presque normalement (0,6 à 1 t/ha) en 5<sup>e</sup> année de culture sans fertilisation minérale ou organique. L'inoculation de Rhizobium n'est efficace qu'avec fumure organique (1,9 t/ha). La fumure organique seule est productive (1,5 t/ha). Mais tous les traitements favorables à une bonne production du maïs (MO + FS + I, FM, FM + MO) sont défavorables à celle de la fève. Il ne s'agit pas d'une concurrence nutritive (maladies cryptogamiques), lorsque le maïs est plus développé.

Cependant globalement, la production de fève compense celle du maïs quand la fertilisation est insuffisante ou en raison d'aléas climatiques (année sèche notamment). En outre l'association est bénéfique à moyen terme, nous l'avons vu dans le cas de la culture du blé, par enrichissement du sol en azote.

La somme des deux productions dans les deux meilleurs traitements est de 3,6 à 3,7 t/ha de grain, soit plus que l'optimum attendu de la monoculture de maïs (3 t/ha). Finalement les trois meilleurs traitements sont la fertilisation minérale combinée à la fumure organique, la fertilisation organique + fertilisation starter et inoculation, la fertilisation organique + fertilisation starter. C'est sans doute cette dernière solution qui est la plus économique et la plus durable, car elle améliore aussi les propriétés du sol.

La comparaison de 4 variétés locales de maïs, deux précoces et deux tardives, associées à la fève, a produit à quelques nuances près des résultats semblables. Pour des variétés précoces le traitement MO + FS + I (maïs + fève) est globalement aussi productif que MO + FM ; la fumure organique avec fertilisation starter est la meilleure alternative. Pour les variétés tardives le traitement MO + FM est globalement plus productif mais pas beaucoup plus que MO + FS + I ; ce dernier demeure une bonne alternative.

Une observation très intéressante sur le maïs concerne le développement végétatif, l'efficacité reproductrice et les paramètres d'élaboration du rendement en grain, en fonction de tous les traitements. La plus remarquable est la précocité à la floraison, l'écart entre floraison mâle et femelle, et en conséquence l'efficacité reproductrice. Cet ensemble de critères est fortement corrélé à la productivité du maïs, donc à la nutrition de la plante, notamment en azote et en phosphore ainsi qu'à l'alimentation en eau. En cas de déficience minérale l'écart à la floraison est au moins de 30 jours et l'efficacité reproductrice mauvaise. La fertilisation minérale ou organique seule réduit cet écart entre 4 et 8 jours. Le traitement optimum l'amène entre 0 et 2 jours. L'efficacité reproductrice est toujours optimum pour les traitements fumure organique + fertilisation starter + inoculation ou fumure organique + fertilisation minérale.

### **3.1.6. Impact de la fertilisation biologique, minérale ou organique, sur la production de blé et avoine en 1<sup>ère</sup> année, de maïs + fève en 2<sup>e</sup> année de culture, à San Miguel Tlaixpan.**

Le protocole expérimental est le même que le précédent à Hueyotlipan.

La production de blé en 1<sup>ère</sup> année sans fertilisation est quasi nulle. L'inoculation bactérienne, avec ou sans fumure organique est sans effet. La fertilisation starter seule a une production modérée (1,7 t/ha), comparable à celle de la fumure organique seule (1,6 t/ha). Mais les deux combinées ont une production élevée (2,8 t/ha) un peu supérieure à la fertilisation minérale (2,6 t/ha) et un peu moindre que l'optimum produit par la combinaison fumure organique + fertilisation minérale (3,2 t/ha). Donc pour le blé l'alternative la plus économique est la fumure organique avec fertilisation starter, ou la fertilisation minérale seule.

L'avoine est moins exigeante que le blé. Elle a une production modérée (1,3 t/ha de grain) dès la 1<sup>ère</sup> année sans fertilisation minérale. La fertilisation minérale ou organique seule n'a accru que de 50% le rendement. Seuls les traitements combinés fumure organique + inoculation ou fertilisation minérale ont doublé le rendement en grain et en matière sèche. La seule alternative économique est la fumure organique avec inoculation. L'intérêt de cette culture est sans doute plus comme plante fourragère ou préculture d'engrais vert.

La culture de maïs + fève en 2<sup>e</sup> année a été faite sans renouvellement de la fumure organique ; le labour n'a été fait qu'à 20 cm de profondeur ; les conditions climatiques ont été un peu différentes de celles de Hueyotlipan. Ces particularités limitent la comparaison avec l'essai de Hueyotlipan en 5<sup>e</sup> année. Cependant les résultats majeurs concordent assez bien.

Globalement (maïs + fève) c'est le traitement fumure organique + fertilisation starter + inoculation qui produit le meilleur rendement (3,15 t/ha), dépassant un peu la combinaison fumure organique + fertilisation minérale. Pour le maïs c'est le dernier traitement qui est le plus productif. Pour le fève au contraire c'est la fumure organique + fertilisation starter.

En conclusion l'alternative fumure organique + fertilisation starter est la meilleure pour la culture associée maïs + fève et probablement aussi pour le blé.

### **3.1.7. Expérimentation sur terrasses de dimension paysanne (pour la mesure de l'érosion) d'une rotation (1993-1996) et de différentes façons culturales, station de San Miguel Tlaixpan.**

La rotation est : en 1<sup>ère</sup> année, orge (+ vesce) ; 2<sup>e</sup> année, maïs + fève + haricot ; 3<sup>e</sup> année, maïs + fève ; 4<sup>e</sup> année orge (+ luzerne) ou maïs + fève.

Les traitements sont : profondeur à 60 cm / 40 cm ; monoculture / culture associée ; fumier / fertilisation minérale ; texture fine et pente réduite (2% / 4 à 6%) ; en 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> année sous maïs + fève avec ou sans résidu de récolte ; en 4<sup>e</sup> année sous maïs + fève billon cloisonné / billon traditionnel. La fumure organique (fumier) est réduite à 20 t/ha, mais renouvelée chaque année et complétée en 4<sup>e</sup> année par une fertilisation starter (15-60). La fertilisation minérale a été modérée (70-60).

La modération de la fertilisation avait pour but de se rapprocher des conditions paysannes. Une terrasse de sol agricole avec fertilisation minérale a servi de référence. Nous résumerons brièvement les principaux résultats.

En 1<sup>ère</sup> année de culture, année exceptionnellement sèche, la production de l'orge de 2 à 3 t/ha est relativement bonne et supérieure à la moyenne régionale. La fumure organique produit un peu moins que la fertilisation minérale. La production cumulée orge + vesce est meilleur que la monoculture.

En 2<sup>e</sup> année de culture, année normale, la production de maïs est médiocre sans doute en raison d'une fertilisation minérale ou organique insuffisante (l'écart de la floraison femelle et mâle est de 30 à 40 jours) elle est inférieure avec fumure organique. Mais la production de fève est normale, car cette plante est moins sensible à une déficience minérale. La production du haricot, qui supporte mal l'association, est très faible.

En 3<sup>e</sup> année de culture, année normale, la production du maïs est un peu meilleure (#1t/ha), mais encore bien inférieure à l'optimum. Celle de la fève est plutôt médiocre. La production globale est inférieure à celle de l'année précédente. Cependant la production est normale sur sol agricole. Donc la fertilisation demeure insuffisante pour le maïs sur tepetate. Il n'y a pas d'effet significatif des résidus de récolte.

En 4<sup>e</sup> année de culture, année normale, la production de l'orge est un peu inférieure en moyenne à celle de la 1<sup>ère</sup> année ; la fumure organique demeure moins productive que la fertilisation minérale. Le rendement du maïs est normal (2,6 t/ha en grain) et se rapproche de l'optimum. Donc la nutrition minérale s'est améliorée en 4<sup>e</sup> année de culture. Il n'y a pas d'effet significatif des résidus de récolte, ni du billon cloisonné (contreo). Le rendement de la fève demeure plutôt médiocre, sauf dans le cas du contreo qui semble avoir amélioré cette production (meilleure réserve en eau). Globalement, la production est bonne et se rapproche des rendements obtenus à Hueyotlipan.

#### **Principales conclusions.**

Le tepetate cultivé avec fertilisation minérale modérée est aussi productif que le sol agricole pour l'orge, le maïs et la fève, en 1<sup>ère</sup>, 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> années de culture, sauf exception en 3<sup>e</sup> année.

La profondeur du tepetate cultivé à 60 cm, n'est pas meilleure que 40 cm, en culture pluviale.

La culture associée orge + vesce, maïs + fève tend à produire globalement un peu plus que la monoculture d'orge ou de maïs ; il y a donc un effet bénéfique de la légumineuse. Les deux productions sont complémentaires et assurent globalement une production plus régulière.

La texture plus fine et la pente réduite de la terrasse n'a aucun effet sur la production.

Le maintien des résidus de récolte n'améliore pas sensiblement la productivité.

La fumure organique est généralement insuffisante et moins productive que la fertilisation minérale.

Si le billon cloisonné (contreo) n'a pas amélioré le rendement du maïs, par contre celui de la fève l'a été.

Les deux fertilisations, organique et minérale, volontairement modérées, se sont révélées insuffisantes, surtout pour le maïs. Cette plante nécessite un minimum pour produire normalement, que l'association avec la fève ne peut à court terme assurer.

Une fertilisation réduite est une mauvaise économie. Il faut tenir compte de l'expérimentation systématique faite sur les deux stations, de fertilisation biologique, minérale ou organique.

### **3.1.8. Expérimentation en petites parcelles de différents systèmes de culture, station de San Miguel Tlaixpan, de 1993 à 1995.**

Les résultats ne sont pas significativement différents de ceux obtenus sur les terrasses. Ils les confirment et les complètent.

## **3.2. CAS DE LA CANGAHUA D'EQUATEUR, DE TYPE DURIPAN CALCIQUE.**

Lors de ce programme nous avons fait une expérimentation sur deux petites stations à La Tola en climat subhumide et à Cangahua en climat subaride, et contribué au suivi d'un projet en milieu paysan à Licto.

### **3.2.1. Stations de La Tola et Cangahua.**

Il n'y a eu que deux années d'expérimentation en 1994-95 et 1995-96 et des aléas en deuxième année qui ont restreint nos résultats. Le protocole sur cangahua comprenait 4 traitements principaux : témoin, fumure organique (40 t/ha de fumier), fertilisation minérale (100-60-00), et les deux combinés. En outre il y avait un apport de ponce, une irrigation d'appoint à Cangahua, une parcelle de sol agricole avec fertilisation minérale. La rotation a été en 1<sup>ère</sup> année avoine fourragère, orge et maïs ; en 2<sup>e</sup> année haricot, orge et maïs. Nous résumerons brièvement les conclusions.

L'orge a eu une bonne production (2,5 à 4 t/ha) dès la première année sur les deux stations. Ce résultat est comparable à celui sur tepetate au Mexique. En climat subhumide (La Tola) la fertilisation minérale produit plus que la fumure organique. En climat subaride (Cangahua), avec irrigation, au contraire c'est la fumure organique. Un apport de ponce n'améliore pas le rendement. Sur sol agricole, le rendement est inférieur à La Tola ou supérieur à Cangahua.

Le haricot en 2<sup>e</sup> année de culture a une production moyenne (0,7 à 1,2 t/ha) sur les deux stations avec fertilisation minérale ou organique. On remarque encore que la fertilisation minérale est plus productive en climat subhumide, et à l'inverse la fumure organique avec irrigation en climat subaride.

La production d'avoine fourragère en 1<sup>ère</sup> année de culture a été plutôt modérée (1,6 t/ha) à La Tola (à cause de la sécheresse) et normale à Cangahua, surtout avec fumure organique et irrigation (2,6 t/ha).

Le maïs a eu une mauvaise production à La Tola, en climat subhumide, aussi bien en 1<sup>ère</sup> année après une préculture d'avoine qu'en 2<sup>e</sup> année après une préculture de haricot. Ce mauvais résultat, normal en 1<sup>ère</sup> année, s'expliquerait en 2<sup>e</sup> année par diverses causes : une variété inadaptée, divers aléas. En revanche à Cangahua en climat subaride, avec irrigation d'appoint et fumure organique, la production a été normale (1,8 t/ha) pour cette région dès la 1<sup>ère</sup> année. Elle s'est maintenue en 2<sup>e</sup> année. La fertilisation minérale a été peu productive en 1<sup>ère</sup> année, mais normale (1,5 t/ha) en 2<sup>e</sup> année.

Ces résultats, bien modestes, sont encourageants, car les rendements obtenus sur cangahua cultivée sont 2 à 4 fois supérieurs à la moyenne de cette région.

### **3.2.2. Station de Licto.**

Le premier essai, en 1<sup>ère</sup> année de culture a comparé divers apports.

Les résultats des essais réalisés avec la participation des paysans sont comparables à ceux obtenus en station. Les deux variétés d'orge testées sont normalement productives dès la 1<sup>ère</sup> année de culture. La fertilisation minérale permet une bonne production de 2 à plus de 3 t/ha aussi bien sur une préparation mécanisée fine ou grossière (2 ou 1 passages de disques) qu'en préparation manuelle fine. Des différentes formes organiques testées, c'est le compost organique bien décomposé qui est le plus productif (3,8 t/ha) malgré la dose modérée (10 t/ha) de cet apport. Le fumier à faible dose (5 à 10 t/ha) ne permet qu'un rendement modéré (1,5 à 2 t/ha). L'avoine fourragère a eu de bons rendements avec le compost organique et la fertilisation minérale.

### **3.3. CONCLUSION.**

En conclusion tous ces essais confirment la bonne productivité de l'orge et de l'avoine fourragère sur cangahua, avec une fertilisation minérale suffisante dès la première année de culture, comme cela est le cas aussi sur tepetate au Mexique. La production du haricot est également bonne en deuxième année. Mais la production de maïs est discutable et nécessiterait une nouvelle expérimentation, avec des variétés mieux adaptées.

## **4. ANALYSE SOCIO-ECONOMIQUE DE LA REHABILITATION DES SOLS VOLCANIQUES INDURES.**

Les études socio-économiques en milieu agricole affecté par l'extension des surfaces érodées, en cangahua en Equateur ou en tepetate au Mexique, ont commencé par une caractérisation de ce milieu et notamment des systèmes économiques familiaux. Au cours de cet inventaire, conjointement avec les études agronomiques, on a observé ou évalué : les façons culturales, la rotation des cultures, les rendements, les coûts de réhabilitation en sol de la cangahua ou du tepetate, les coûts de production et la rentabilité des productions, les coûts de maintenance et les apports monétaires extérieurs des membres de la famille. Certains points n'ont pu être abordés avec précision, tels que l'autoconsommation, la valorisation locale de certains produits et leur commercialisation. La référence salariale ou seuil de survie pour juger de la rentabilité et la "reproductibilité" du système a été le salaire minimum d'un ouvrier local.

Au Mexique les enquêtes, déjà entreprises lors du précédent programme (Navarro, Zebrowski et al., 1992) ont été poursuivies uniquement sur des zones-témoin des Etats de Mexico et de Tlaxcala et aussi des régions de Morélia et Jalisco, à l'est du haut plateau central, afin d'avoir un échantillonnage de l'ensemble des régions à tepetate.

En Equateur, la vallée interandine étant peu étendue, nous avons fait d'une part une enquête régionale de la région nord puis de la région sud, où se situe la cangahua (Vicuña, Zebrowski et al.), d'autre part deux enquêtes sur des zones témoins (Gasselin, Legeait et Coudray).

Les caractéristiques du milieu rural et de la réhabilitation des sols volcaniques érodés, indurés et stériles, cangahua ou tepetate, présentent des similitudes en Equateur et au Mexique, mais aussi des divergences. Dans les deux pays il s'agit de régions très peuplées, mais de production traditionnelle, peu rentable et plutôt marginale, assurant la survie de ces populations. C'est le domaine des "minifundi", très petites exploitations familiales, avec peu de moyens propres, sinon le capital travail, quelques animaux et quelques outils, dépendantes d'autres plus importantes pour les gros moyens de travail du sol, devant exporter leur main-d'oeuvre familiale pour survivre. En Equateur dans les régions à cangahua, plus de 80% des exploitations agricoles sont de ce type et possèdent moins de 3 ha/famille. Au Mexique, la superficie moyenne est un peu plus élevée et se situe entre 5 et 10 ha/famille ; suivant les régions ce sont de 50 à 95% des familles qui sont concernées. Dans tous les cas l'utilisation de la cangahua et du tepetate est une nécessité. En dessous de 5 ha au Mexique ou de 3 ha en

Equateur, la quasi totalité des paysans utilisent les sols volcaniques indurés, cette ressource est presque toujours nécessaire en dessous de 20 ha/famille. Dans tous les cas le maïs destiné à l'autosubsistance est la base de la production. En Equateur, faute de moyens et aussi d'encadrement agricole, la production du maïs, du blé ou de l'orge est en moyenne de 500 kg/ha. Au Mexique, avec de faibles moyens mais un meilleur encadrement et une certaine utilisation d'engrais et de variétés améliorées, la moyenne de production est plus élevée 1,5 à 1,8 t/ha de maïs, 1,5 à 2 t/ha de blé ou d'orge. Cangahua et tepetate nécessitent un gros investissement pour les habilités en sol agricole, de travail et aussi financier. Mais ensuite le paysan le traite comme un autre sol, ne le travaille pas ni ne le fertilise différemment, sans tenir compte de ses carences particulières. Cependant ils évitent de planter le maïs en 1<sup>ère</sup> année, préférant une céréale (blé, orge) et ils retardent la date du semis.

La réhabilitation de la cangahua en Equateur est différente de celle du tepetate au Mexique, à cause des différences de développement économique et culturel de ces deux pays.

Au Mexique la réhabilitation du tepetate est mécanisée, malgré son coût élevé, de 350 à 550US \$/ha pour le seul sous-solage. Les paysans édifient rarement des terrasses ou des ouvrages de conservation, car le coût d'une terrasse plane est de 1 600 à 2 100US \$/ha. Nous avons expérimentés et proposés la terrasse en pente réduite avec ados en aval, qui est moins coûteuse et aussi efficace. Nous avons estimé (précédent programme) que le coût de cet investissement, avec des pratiques agricoles rationnelles, peut être amorti en 6 à 8 ans de production agricole continue.

En Equateur, la réhabilitation de la cangahua est surtout manuelle. Le coût très élevé de ce travail manuel n'est pas pris en compte par le paysan ; c'est son capital travail pour un ressource en terre absolument nécessaire à sa survie. Malheureusement sauf rares exceptions locales, les petits paysans n'édifient pas ou peu d'ouvrages de conservation. Il commence cependant à se développer, notamment dans la région de Riobamba et dans la province de Carchi un programme de développement de terrasses à pente réduite de formation progressive, bordée d'un ados ou d'un muret de cangahua.

Le défonçage de la cangahua est mécanisé, l'ameublissement final peut être mécanisé ou manuel ; la construction du muret est manuelle, avec une participation collective de la communauté paysanne. Le coût de cet ouvrage est estimé de 830 à 1050US \$ ; il est financé par le capital travail de la communauté et une aide d'associations (mais pas de l'Etat). Malgré leur extrême pauvreté et la faible productivité de leurs cultures les petits paysans équatoriens pour des raisons d'identité culturelle, sont très attachés à leur terre et à la réhabilitation des surfaces érodées en cangahua. On peut donc espérer que des projets communautaires, appliquant l'expérience déjà acquise et profitant des résultats obtenus par nos travaux au Mexique et en Equateur, vont se développer progressivement . Un tel développement nécessite un bon encadrement et aussi un véritable programme de formation adapté, car plus de la moitié de la population est encore illétrée. Il faut en effet améliorer les façons culturales, les variétés cultivées, et accroître la productivité, diversifier aussi les productions pour mieux les commercialiser. Dans certaines régions du Mexique et d'Equateur une agriculture spécialisée et plus intensive (fleurs, fruits) se développe localement.

La représentation est aussi une possibilité intéressante de mettre en valeur les surfaces érodées en cangahua ou tepetate, dans les régions marginales ou en forte pente. Au Mexique elle a été systématiquement développée avec des ouvrages anti-érosifs pour la protection de l'environnement du lac de Texcoco (Mexico).

Le travail est en partie mécanisé, en partie manuel. Divers ouvrages ont été réalisés : terrasses ou divers types de tranchées, et divers types de plantes. Le coût des terrasses est de 945 à 1280US \$/ha ; mais celui des tranchées seulement 160 à 310US \$/ha, mais sans travail important anti-érosif ou de remodelage. Le programme de reboisement ne peut être promu que par les régions ou les Etats.

## **5. ERODIBILITE ET CONSERVATION DES SOLS VOLCANIQUES INDURES CULTIVES.**

Le précédent programme au Mexique grâce à des mesures en petites parcelles (type Wischmeier) sur 4 stations ayant des particularités climatiques et érosives, avait montré que l'érosion du tepetate cultivé pouvait être contrôlée par la culture traditionnelle du maïs en billon, mais jusqu'à une certaine limite d'intensité et d'érosivité des pluies ( $I_{30} > 30$  mm/h) ; cas heureusement exceptionnel dans ces régions. L'érosivité globale des pluies entre stations variait la même année entre moins de 200 ( $R_{us}$ ) et plus de 400. L'érosion d'une parcelle cultivée en maïs pouvait varier de 1 à plus de 20 t/ha/an, en fonction de l'érosivité des pluies.

L'étude a été poursuivie au Mexique entre les deux programmes (1992 et 1993) et s'est considérablement amplifiée et mieux focalisée au cours du deuxième programme (1994-96) ; de sorte que nous avons des résultats mieux contrôlés sur le moyen terme et plus précis. Deux stations principales ont été conservées et réaménagées : San Miguel Tlaixpan (Texcoco, Mexico) et Tlalpan (Hueyotlipan, Tlaxcala). Toutes deux ont conservé des parcelles de référence type Wischmeier. Mais à San Miguel Tlaixpan, Oropeza (et col.) ont expérimenté en détail et avec répétitions les facteurs majeurs qui causent le ruissellement et l'érosion, notamment le travail superficiel du tepetate et son couvert (filet ou plante cultivée). En outre, objectif majeur de ce nouveau programme, l'érosion a été mesurée, sur les deux stations, en terrasse de tepetate cultivé selon les méthodes et la dimension utilisées par les paysans. Dans ce cas nous avons expérimenté des façons culturales ou une rotation culturale, qui peuvent être pratiquées par les paysans (Fechter et col.) à Tlalpan, Prat et col. à San Miguel Tlaixpan.

Une autre étude, plus simplifiée, a été entreprise sur la cangahua cultivée en Equateur (Custode, Trujillo et Viennot), sur deux stations à La Tola (Tumbaco) et à Cangahua (Cayambe). Il s'agit de petites terrasses en pente régularisée, avec 4 traitements, de la dimension des petites parcelles paysannes. Cette étude a duré 2 ans (1994-95 et 1995-96).

Une troisième expérimentation simplifiée sur les andosols du Sud-Chili (Oyarzun et col.) a été faite sur 6 parcelles, comparant la prairie et les sols cultivés, sous une pluviosité intense (4 mm/an) et en forte pente (25%). Les mesures ont duré un peu plus d'un an (1995-96).

Nous résumerons brièvement les conclusions majeures de ces nombreux travaux.

### **5.1. ERODIBILITE DES TEPETATES DE TYPE FRAGIPAN DU MEXIQUE.**

#### **5.1.1. Régime des pluies et érosivité.**

A San Miguel Tlaixpan, le climat est de type tempéré (intertropical) subhumide (ustic) ; la saison des pluies dure 5 à 6 mois, mais le déficit hydrique dure au moins 7 mois. La hauteur des pluies moyenne annuelle est de 630 mm, mais la variation interannuelle est de 1 à 2 ; donc il y a des années sèches et peu érosives ( $R_{us}=55$ ) et d'autres pluvieuses et plus érosives ( $R_{us}=150$ ). Moins de 10% des pluies sont érosives. En année moyenne il n'y a que 3 pluies fortement érosives ( $>500$  MJ/ha) ; cette fréquence varie de 1 à 6 suivant les années. Deux "pics" d'érosivité des pluies sont observés, en juin et en août, le maximum étant en juillet-août. C'est la période des pluies les plus fréquentes et les plus intenses. Oropeza et Baumann observent en moyenne une bonne corrélation entre l'indice  $I_{30}$  d'intensité des pluies, le coefficient  $R = EI_{30}$ , et l'érosion. Cependant, une analyse plus fine de l'intensité sur des périodes de 5, 10 et 15 minutes montre que pour certaines pluies brèves, il conviendrait d'utiliser plutôt  $I_{15}$  ou  $I_{10}$  pour caractériser l'érosivité des pluies.

Sur les stations de El Carmen et de Tlalpan (Tlaxcala) des observations semblables ont été faites. Cependant il se confirme que sur le versant occidental de la Sierra Nevada, les pluies sont plus intenses et surtout plus érosives. Alors que de 1991 à 1996 à San Miguel Tlaixpan (versant Oriental), l'indice  $R_{us}$  n'a pas dépassé 160, à El Carmen il a varié de 110 à 260 (en moyenne 170) et à Tlalpan de 200 à 430 (moyenn 285). La variation interannuelle est encore de 1 à 2. Les plus fortes pluies enregistrées, de 62 et 67 mm, ont contribué entre 34 et 41% de l'érosivité globale annuelle. Les pluies d'intensité supérieures à 30 mm/heure ne représentent que 1 à 4% des pluies mais 20 à 50% de l'indice annuel d'érosivité. Donc ce n'est pas l'indice  $R_{us}$  global annuel qui importe mais la fréquence et l'intensité des pluies exceptionnelles.

## **5.1.2. Ruissellement et érosion.**

### ***5.1.2.1. Station de San Miguel Tlaixpan, parcelle de type Wischmeier.***

Il y a une certaine variabilité stationnelle interparcelle ; mais la moyenne des résultats par traitement sur les 3 années (1994-96) permet d'utiles comparaisons et conclusions.

Sur tepetate naturel le taux moyen annuel de ruissellement est de 32% ; le taux annuel d'érosion de 15 t/ha sans filet, 6 t/ha avec un filet (qui réduit l'énergie cinétique de la pluie et l'effet "splash").

Sur tepetate cultivé en blé (labour à plat) le taux de ruissellement est de 15% et celui d'érosion de 2 à 3 t/ha/an seulement. L'effet d'un apport de fumier est quasiment nul.

Sur tepetate cultivé, non billonné, à nu, sans filet le taux de ruissellement est de 33% et l'érosion de 23 t/ha/an. Sur le même avec filet le ruissellement est réduit à 26% et l'érosion à 12 t/ha/an.

Donc l'énergie cinétique de la pluie est pour une large part responsable de l'érosion, d'où l'intérêt d'un couvert végétal. L'effet du sarclage pour éliminer la croûte superficielle diminue un peu le ruissellement, à 19%, améliore l'infiltration, mais ne réduit pas sensiblement l'érosion (à 11 t/an/ha).

En conclusion la culture d'orge, sans façon anti-érosive particulière, a bien contrôlé l'érosion. Le courant d'un filet sur sol nu est beaucoup moins efficace ; il réduit surtout l'érosion. Le sarclage superficiel améliore l'infiltration, mais ne réduit pas l'érosion.

### ***5.1.2.2. Station de San Miguel Tlaixpan, terrasses "paysannes".***

Il y a une certaine variabilité stationnelle interterrasses qui réduit la portée des résultats et empêche la comparaison de certains traitements, faute de répétition. La superficie des terrasses cultivées est d'environ 50 m<sup>2</sup> ; celle du tepetate naturel de 1 800 m<sup>2</sup>.

Sur le tepetate naturel 75% des pluies ruissellent, car la vitesse d'infiltration (< 5 mm/h) est faible ; le taux moyen de ruissellement est de 43% sur 4 ans ; mais en année normale il est proche de 50%. Le taux moyen d'érosion est de 18 t/ha/an ; mais il peut atteindre 30 t/ha en année très érosive. Ces valeurs d'érosion sont un peu supérieures à celles mesurées sur parcelle "Wischmeier" en raison de l'effet cumulatif de l'énergie de la lame d'eau ruisselée, qui provoque un début d'érosion linéaire (en rigoles et petites ravines).

Sur les terrasses cultivées la fréquence des pluies ruisselées est 2 à 6 fois moindre que sur tepetate naturel. Il y a évidemment une forte variabilité interannuelle (de 1 à 4) entre année sèche et années pluvieuses. En outre il y a une variabilité stationnelle et nous devons distinguer deux groupes de terrasses, indépendamment des traitements culturaux : celles amont qui ruissellent et érodent plus, celles aval l'inverse. Enfin nous distinguerons la culture du maïs en billon et celle de l'orge avec labour à plat.

Sur les terrasses-amont cultivées en orge : en 1993, année sèche le ruissellement (Kr) a été de 8 à 13% et l'érosion (E) de 1 à 6 t/ha ; en 1996, année pluvieuse Kr a été de 50 à 53% et E de 11 à 30 t/ha.

Sur les mêmes terrasses cultivées en maïs, en années pluvieuses, en 1994 Kr a été de 31 à 38% et E de 15 à 12 t/ha, en 1995 Kr de 29% et E de 8 à 4 t/ha.

Donc en année pluvieuse, sur des terrasses particulièrement sensibles au ruissellement, la culture d'orge réduit moins le ruissellement et produit plus d'érosion que la culture du maïs en billon. Ces résultats sont beaucoup plus élevés que ceux mesurés sur les parcelles de Wischmeier en culture d'orge. En outre la culture de maïs en billon contrôle mal l'érosion en cas de pluies exceptionnellement érosives.

Sur les terrasses-aval cultivées en maïs, en années pluvieuses (1994-96) les taux de ruissellement (Kr) sont restés modérés : 10 à 13% en 1994, 11 à 5% en 1995 ; en 1996 l'effet du billonnage cloisonné a réduit le ruissellement à 4% versus 18% pour le billon traditionnel. Les taux d'érosion (E) sont demeurés faibles, de l'ordre de 1 t/ha/an en moyenne. Le cloisonnement a quasiment supprimé l'érosion. Ces résultats, sur des terrasses peu sensibles au

ruissellement et à l'érosion, sont comparables à ceux observés antérieurement (1991-92) sur des parcelles Wischmeier.

Il n'a pas été possible de discerner quel facteur stationnel a produit une telle différence entre terrasses-amont et terrasses-aval. Mais il est intéressant de savoir que cette variabilité importante existe dans les conditions naturelles. La terrasse de sol agricole naturel de référence, cultivée en orge (en 1993 et 1996) a produit des valeurs deux fois moindres de ruissellement et d'érosion que les terrasses-amont de tepetate ; en année pluvieuse Kr a été de 18% et E de 5 t/ha, valeurs sensiblement supérieures à celles des terrasses-aval en culture de maïs. Comme nous l'avions mesuré sur parcelles Wischmeier, l'érodibilité du sol naturel est comparable à celle du tepetate cultivé.

L'effet d'un apport de fumier à dose modérée (20 t/ha) sur tepetate cultivé, n'a pas eu de conséquence significative sur le ruissellement ni sur l'érosion.

Le pourcentage de sédiments transportés en suspension (charge solide) est très significatif. Sur le tepetate naturel il n'est que de 30% ; cela signifie une érosion globale du matériau, laminaire (en surface) et linéaire (en rigole) sous l'effet d'un fort ruissellement. Au contraire sur les terrasses cultivées, le taux est proche de 70% ; c'est l'énergie directe des pluies qui provoque le détachement des particules fines puis, le flux ruisselé leur entraînement en suspension. Ce taux augmente avec l'intensité et l'énergie des pluies.

L'érosion sur les talus non enherbés qui limitent deux terrasses n'est pas négligeable : entre 8 et 18 t/ha/an en moyenne pendant 4 ans, elle est comparable à celle d'un tepetate naturel.

Une première observation des états de surface au cours du précédent programme (Jérôme) avait démontré l'importance du développement de croûtes superficielles sur l'infiltration, le ruissellement et l'érosion. De nouvelles observations (Leroux, Lauffer, Prat) le confirment. Il y a une fonte rapide des agrégats fins sous l'impact de la pluie. Le sarclage et le buttage améliorent temporairement cet état mais accroissent aussi la rapidité du processus, donc diminuent temporairement le ruissellement, mais peu finalement l'érosion. Le seuil d'énergie cinétique cumulée de la pluie à partir duquel se généralise l'encroûtement et se déclenche l'érosion a été évalué à 560 J/m<sup>2</sup>. La couverture de maïs et fève associés est plus efficace contre l'érosion que le maïs seul. La culture à plat de l'orge contrôle insuffisamment une érosion diffuse. Le billonnage du maïs est plus efficace. Le billonnage cloisonné (contreo) est la meilleure pratique pour contenir l'érosion et améliorer l'infiltration de la pluie.

#### ***5.1.2.3. Stations de El Carmen et Tlalpan, parcelles de type Wischmeier.***

Trois traitements ont été comparés sur trois parcelles dans chaque station : tepetate naturel, tepetate cultivé à nu, ou billonné en maïs. Les résultats sont comparables à ceux des années antérieures (1991-93). Les deux types de tepetate testé t2 à El Carmen, t3 à Tlalpan ont en 1994 le même comportement, donc la même érodibilité.

La moyenne des résultats de 1994 à 1996 à Tlalpan, station deux fois plus érosive que celle de San Miguel Tlaxpan sont les suivants : tepetate naturel Kr 35%, E 20 t/ha/an ; tepetate cultivé à nu Kr 27%, E 48 t/ha/an ; billonné avec maïs Kr 1%, E 0,6 t/ha/an. Ces résultats sont semblables à ceux de San Miguel Tlaxpan, en dépit d'une plus forte érosivité des pluies.

#### ***5.1.2.4. Station de Tlalpan, terrasses "paysannes".***

Trois terrasses (de 1 600 à 1 500 m<sup>2</sup>) ont servi à expérimenter de 1995 à 1996 l'impact du labour minimum (à plat, sans sarclage) par rapport au buttage traditionnel du maïs. Une variante a comparé le désherbage chimique et le maintien d'un couvert végétal intercalaire. Les résultats moyens (1995-96) sont les suivants : en labour traditionnel Kr 9% et E 4 t/ha/an ; ces taux sont plus élevés qu'en petite parcelle (Wischmeier) ; le taux de ruissellement est semblable à celui des terrasse-aval de San Miguel Tlaxpan, mais l'érosion quatre fois plus élevée, tout en restant modérée.

Sur labour minimum, le ruissellement est deux fois plus intense, mais l'érosion demeure modérée (5 t/ha). Avec un couvert végétal intercalaire, Kr est réduit à 5% et E à 2 t/ha/an. C'est donc le labour minimum avec végétation intercalaire qui est la pratique agricole la moins érosive ; le problème est qu'elle est moins productive pour le maïs que le buttage traditionnel, du fait de la concurrence des deux plantés. Il faudrait utiliser une plante intercalaire également productive.

Les pertes en éléments nutritifs (P assimilable et bases échangeables) en une année sont plutôt négligeables.

## **5.2. ERODIBILITE DE LA CANGAHUA D'EQUATEUR DE TYPE DURIPAN CALCIQUE.**

### **5.2.1. Régime des pluies et érosivité.**

Le climat est de type tempéré, équatorial de montagne, à régime US-tic, plutôt subhumide à La Tola (760 mm de pluie/an de 1986 à 1996), ou subaride à Cangahua (545 mm de pluie/an de 1986 à 1996). La saison sèche dure 5 mois à La Tola, près de 7 mois à Cangahua. La saison des pluies est bimodale. L'indice global d'érosivité des pluies est modéré ( $R_{US}=200$ ) à La Tola, plutôt faible ( $R_{US}=100$ ) à Cangahua. La fréquence moyenne des pluies érosives ( $IM 15' > 30$  mm/h) est de 4 par an à La Tola, 2 seulement à Cangahua (de 1994 à 1996). Les pluies de forte intensité sont exceptionnelles 80 à 90% des pluies sont inférieures à 10 mm. Ces conditions sont donc relativement moins érosives que sur les stations observées au Mexique.

### **5.2.2. Ruissellement et érosion sous pluie naturelle.**

A La Tola nous avons expérimenté quatre traitements (parcelles de 40 m<sup>2</sup>) ; tous cultivés en avoine (sous engrais) : 3 parcelles en pente moyenne de 15%, l'une témoin (P1), l'autre avec préculture irriguée (P2), la troisième avec muret de cangahua à l'aval (P3) ; et une terrasse en pente de 2%. Pendant les deux années (1994-96) de mesure, les résultats moyens du taux de ruissellement (Kr) et d'érosion (E) sont les suivants : en P1 1,9% et 13,5 t/ha/an ; en P2 3,2% et 6 t/ha/an ; en P3 2,0% et 6,5 t/ha/an ; en P4 1% et 5,5 t/ha/an. Les taux de ruissellement annuel sont très faibles, mais le taux d'érosion est relativement élevé, surtout sur le témoin. Cela peut s'expliquer par le faible couvert végétal de l'avoine (qui s'est mal développée) et par la forte pente. Les trois traitements supposés réduire l'érosion sont efficaces, mais modérément par rapport au témoin. Il a été noté qu'une seule forte pluie en 1995 est responsable de 70% de l'érosion sur les deux années. Contrairement à ce que laissait prévoir un indice modéré d'érosivité des pluies, une érosion importante est donc possible sur la cangahua cultivée, mais exceptionnelle.

A Cangahua, nous n'avons expérimenté que les 3 traitements sur pente moyenne de 15%. Les résultats moyens (1994-96) de Kr et E sont les suivants : en P1 1,3% et 4 t/ha/an ; en P2 0,9% et 3,3 t/ha/an ; en P3 0,9% et 1,2 t/ha/an.

Les taux de ruissellement annuel sont très faibles, mais le taux d'érosion est notable 3 à 4 t/ha sans muret anti-érosif, 1 t/ha seulement avec muret. L'efficacité du muret de cangahua est donc démontrée. Cependant, malgré la faible érosivité des pluies, l'érosion sur culture d'avoine (sans doute mal couvrante) n'est pas négligeable ; peut-être est ce dû à de rares pluies exceptionnelles.

En conclusion l'érosion sur cangahua cultivée en avoine et en forte pente est plutôt modérée avec des façons anti-érosives. Elle n'est pas plus intense que la culture d'orge sur tepetate au Mexique.

### **5.2.3. Observations sous pluies simulées.**

Des séquences de pluie simulée d'intensité croissante (de 20 à 80 mm/h) ont été appliquées sur des mini parcelles (1 m<sup>2</sup>) de cangahua cultivée, de différente granulométrie

(fine, moyenne, grossière) et de différentes pentes (4, 12, 16 et 21%). Les conclusions principales sont les suivantes : la susceptibilité à l'érosion ne se développe qu'à de fortes intensités des pluies, au moins 40 à 60 mm/h. Elle augmente en raison du colmatage de la macroporosité par suite de la désagrégation des agrégats fins sous l'impact des pluies (effet splash) et en conséquence la réduction du seuil minimal de vitesse d'infiltration à 15-20 mm/h ; ou elle diminue temporairement après sarclage. Ceci se produit aussi bien sur texture fine que grossière. Mais la rugosité de la texture grossière intervient en réduisant la vitesse et l'énergie des flux, ce qui favorise l'infiltration et la sédimentation des particules grossières. Cependant si la rugosité réduit le coefficient de ruissellement et l'énergie du flux, elle ne diminue pas significativement l'érosion totale par rapport au témoin en texture fine ; la raison n'est pas évidente. Une pente forte (15%) augmente sensiblement l'énergie des flux ruisselés dans le cas d'une texture fine et d'une faible rugosité ; à hauteur égale d'eau ruisselée, elle augmente sensiblement l'érosion par rapport à une parcelle en pente réduite (4%). Cet effet est curieusement plus marqué sous culture de maïs (peut-être mal développé en 1<sup>ère</sup> année de culture) que sur le témoin à nu.

Sous pluies naturelles le coefficient de ruissellement est un peu inférieur à celui mesuré sous pluies simulées, sans doute à cause de la plus forte intensité de celles-ci. Mais les taux d'érosion sont sensiblement plus élevés, probablement à cause de l'accumulation de la lame d'eau ruisselée sur une longueur 10 fois plus grande ; peut-être aussi à cause d'une certaine dégradation structurale en deuxième année de culture.

### **5.3. ERODIBILITE DES ANDOSOLS DES ANDES DU SUD-CHILI.**

L'expérimentation sur des andosols de la précordillère andine du Sud-Chili, station de Paillahuente près de Valdivia, avait pour but de tester l'érodibilité de ces sols, lors de la déforestation pour une utilisation mixte de prairie et de cultures (Oyarzun et al.). Sur une pente forte, de 28%, ont été comparées 6 parcelles de culture, avec minibandes d'arrêt enherbées, et 2 parcelles de prairie. La forte pluviosité, 4 m/an, la forte pente et la friabilité des andosols laissaient prévoir une érosion très forte. Les résultats sont seulement d'une année, d'octobre 1995 à septembre 1996.

La pluie a été de 4 175 mm, mais les vitesses d'infiltration dans ces andosols peuvent atteindre 400 mm/h et les taux de ruissellement enregistrés par pluie, seulement 1 à 2%. En outre, les bandes d'arrêt enherbées (chaque 4 m en longueur) provoquent une sédimentation des matériaux grossier transportés. L'érosion a été quasi nulle : 62 kg/ha sur parcelles cultivées, 55 kg/ha sur prairie.

En conclusion pour les andosols, sur prairie ou en présence d'une agriculture bien contrôlée par des bandes d'arrêt enherbées, l'érosion es quasi-nulle, même par très fortes pluies. Ceci n'est sans doute valable que si on ne modifie pas les propriétés physiques de ces sols par des pratiques culturales trop drastiques, tel que le labour profond, et si on utilise des façons anti-érosives sur les hauts -versants des Andes d'Equateur et du Pérou.