RAPPORT SCIENTIFIQUE FINAL

SCIENTIFIC FINAL REPORT

N° TS2 - A - 212 - C

▼ TITRE :	*Etude des sols volcaniques indurés "Tepetates des Bassins de México et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole.*
▼ *Titlle* :	*Study of "Tepetates" indurated volcanic soils of the Mexico and Tlaxcala Basins in order to their agricultural rehabilitation*
▼ CHEF DE PROJET : *Project leader* :	Paul QUANTIN
▼ INSTITUTION-HOTE : *Host institution*	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM)
▼ ADRESSE : Address :	213, rue La Fayette 75480 Paris Cedex 10
▼ TELEPHONE :	33.1.48.03.77.77
▼ FAX :	33.1.48.03.08.29
▼ PAYS/ INSTITUTIONS ASSOCIEES *Associated countries/ Institutions*	- Mexique: Colegio de Postgraduados de Montecillo (CP)- Universidad Autonoma de Tlaxcala (UAT) - Comité de la Planeación para el desarollo del Estado de Tlaxcala (COPLADET) -Allemagne: Justus Liebig Universität Giessen, Tropeninstitut Bodenkunde und Bodenerhaltung.
▼ MOTS-CLES: *Key-words* :	Sols volcaniques indurés; tepetates; Mexique; Cartographie des sols; Caractères des tepetates; réhabilitation agricole; érosion; conservation; fertilité; étude agronomique; enquête socio-économique *Indurated volcanic soils; tepetates; Mexico; soil map; tepetates features;agricultural réhabilitation; erosion; conservation; fertility; agronomical study; socio-economical investigation; sustainability*

ORSTOM-Paris

Colegio de Postgraduados-Montecillo

Justus Liebig Universität-Giessen

Universidad Autónoma de Tlaxcala

ETUDE DES SOLS VOLCANIQUES INDURES (TEPETATES) DES BASSINS DE MEXICO ET TLAXCALA (MEXIQUE)

Rapport scientifique final

Paul Quantin

30 juin 1992

Commission des Communautés Européennes

Contrat CCE/ORSTOM n° TS2-0212

RESUME

L'étude des tepetates de Mexico et de Tlaxcala a pour but une meilleure connaissance des sols volcaniques indurés, cause de la désertification de cette région, en vue de leur réhabilitation agricole. Le programme a comporté deux opérations principales: 1 - Inventaire, caractérisation et cartographie des types de tepetate.
2 - Régénération de la fertilité des tepetates et conservation des sols.

Deux feuilles de carte morpho-pédologique ont été faites à 1/50000^{è} (Texcoco et Apan). La localisation des tepetates a été précisée, ainsi que la nature et la stratigraphie du matériau originel. Les types de tepetate ont été caractérisés par microscopie, minéralogie et des critères physiques et chimiques. Une classification est proposée tenant compte de la stratigraphie et du comportement de fragipan ou d'horizon pétrocalcique, selon le ciment.

Une expérimentation en laboratoire a déterminé l'agrégat optimum (d= 2-3 mm) pour un sol agricole stable. L'étude de l'érosion a été faite en parcelles expérimentales sur 4 stations, 2 types de tepetate et un sol. Elle a comporté des mesures d'intensité des pluies, du ruissellement et de l'érosion, ainsi que des observations sur l'évolution de l'état de surface et des propriétés physiques. Le ruissellement et l'érosion dépendent de l'érosivité des pluies et du traitement. Un tepetate cultivé à nu est très érodible. Un billonnage, avec ou sans couvert de maïs, est très efficace pour des pluies faiblement érosives, mais moins pour des pluies fortement érosives. L'accroissement du ruissellement et de l'érosion est dû à la fonte des agrégats inférieurs à 2 mm et à la formation d'une croûte.

Une expérimentation en serre et au laboratoire a montré que la fertilité chimique d'un tepetate est fortement limitée par une carence en azote et en phosphore labile. Le phosphore ajouté reste labile. Une fertilisation N, P, sans K, suffit. La régénération de fertilité est rapide; mais varie selon les plantes. Le blé et la vesce avec fertilisation minérale (N,P) ou organique ont un rendement presque normal dès la première année. Mais pour le maïs et le haricot, le rendement est très faible en 1ère année, puis devient normal en 3ème année. Un agent biologique en serait la cause. La fumure organique (fumier + P) et une texture fine (< 2 mm) permettent un rendement optimum.

Une enquête sur les systèmes économiques familiaux a montré que les tepetates sont une ressource en terre agricole nécessaire pour les petites exploitations (< 15 ha). Le coût des travaux de réhabilitation, avec l'aide de l'Etat, peut être rentabilisée en 8 ans.

SUMMARY

Study of "Tepetates" indurated volcanic soils of the Mexico and Tlaxcala Basins in order to their agricultural rehabilitation.

The aim of the study of the Mexico and Tlaxcala tepetates is a better knowledge about indurated volcanic soils which are a cause of desertification in this country, in order to rehabilitate agricultural soils. The program involved two main operations: 1 -Inventory, characterization and maping of tepetate types. 2. Improvement of tepetate fertility and soil conservation.

Two sheets of morpho-pedological map were made at 1/50000^{è} (Texcoco and Apan). We know more precisely the situation of tepetates, as well as the nature and the stratigraphy of parent material. The types of tepetate were characterized by microscopy, mineralogy and some chemical and physical properties.We propose a classification taking into account the stratigraphic level and the comportment of fragipan or of petrocalcic horizon, according to the cement.

A laboratory experimentation allowed to determine the optimum-aggregate (d= 2-3 mm) for stable agricultural soil. The study of erosion was made in experimental plots of 4 stations and on 2 types of tepetate and one soil. We made measures of rainfall intensity, runoff and soil loss, as well as observations on the evolution of surface features and physical properties. Runoff and erosion depend on rainfall erosivity and soil treatment. A bare tilled tepetate is very erodible. A ridging, with or without maïze cover, is very effective for weakly erosive rainfalls, but lesser for strongly erosive ones. The increase of runoff and erosion is due to the "melting" of less 2 mm aggregates which forms a crust.

An in greenhouse experimentation as well chemical tests showed that the fertility is strongly restricted by mineral deficiency in nitrogen and available phosphorus. The added phosphorus remains available. A mineral (N,P, without K) fertilization is effective. The improvement of fertility is rapid; but it depends on the plant species. Wheat and vetch, with mineral or organic fertilizing give a nearly normal yield since the first year. But for maize and bean the yield is very low in the first year, then becomes normal in the third one. That could be due to biological agent. An organic fertilizing (manure + P) and a fine texture (less 2 mm) allow an optimum yield.

An investigation on the budget of farmer family showed that tepetates are resources in agricultural ground for small farms (less 15 ha). The cost of works for tepetate improvement, with the help of State, can become profitable after 8 years of cultivation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

MILIEU PHYSIQUE

1. Situation géographique

2. Géomorphologie

3. Géologie

    3.1. Sierra Nevada
    3.2. Massif Tlaloc-Telapan

4. Climat

5. Sols et tepetates

6. Végétation et utilisation des sols

I. CARTOGRAPHIE des SOLS et TEPETATES

1. Cartes des sols et tepetates de la Vallée de México, feuille de Texcoco

    1.1. Légende des unités cartographiques
    1.2. Légende des unités-sols

2. Carte des sols et tepetates de la Vallée de Tlaxcala, feuille d'Apan

II. CARACTERISATION des SOLS et TEPETATES

1. Matériau originel des sols et tepetates

    1.1. Schéma stratigraphique
    1.2. Age

2. Classification des types de tepetate

3. Matériau originel et genèse des tepetates de type fragipan

    3.1. Composition chimique et minéralogique du matériau originel
    3.2. Granulométrie et sédimentologie
    3.3. Produits d'altération
    3.4. Micromorphologie
        a. traits hérités du matériau
        b. traits pédologiques
    3.5. Nature et genèse du ciment
        a. revêtements et remplissages
        b. nature du ciment
        c. formes et localisation de la silice "libre"
    3.6. Genèse du tepetate
        a. mode de dépôt du matériau originel
        b. processus de cimentation

4. Propriétés des tepetates de référence

4.1. Propriétés physiques
a. Couleur, minéraux argileux et présence de calcaire
b. Structure
c.Texture
d. Dureté, résistance
e. Rétraction-gonflement
f. Dissolution du ciment et désagragation
g. Conductivité hydraulique
h. Densité, porosité, capacités en air et en eau

4.2. Propriétés chimiques
a. pH, $CaCO_3$
b. Carbone, azote
c. Bases échangeables, CEC
d. Réserves et disponibilité en Potassium et en Phosphore

III. EROSION et CONSERVATION des SOLS et TEPETATES

A. *Région de Texcoco, expérimentation sur tepetate t3 et sur sol; station de San Miguel Tlaïxpan*

1. Propriétés initiales du tepetate et du sol

1.1. Propriétés physiques
1.2. Propriétés chimiques

2. Détermination expérimentale de l'agrégat optimum du tepetate

2.1. Expérimentation au laboratoire
2.2. Expérimentation au champ

3. Parcelles expérimentales de mesure de l'érosion, protocoles et méthodes

4. Suivi des propriétés du tepetate et du sol

4.1. Evolution de la porosité
4.2. Evolution de la vitesse d'infiltration
4.3. Evolution de l'humidité du sol
a. Relation humidité du sol et pluies
b. Impact des traitements sur l'humidité
4.4. Evaluation du rendement des cultures de maïs

5. Mesures de ruissellement et d'érosion

5.1. Régime des pluies et érosivité
5.2. Mesure de l'érosion
5.3. Intensité du ruissellement

6. Evolution des états de surface et de la fonte des agrégats

6.1. Périodes de travail du sol et régime des pluies en 1991
6.2. Evolution des états de surface sur parcelles billonnées
6.3. Fonte des agrégats sur parcelles billonnées

6.4. Mesure des points quadrats, évolution du relief en parcelle billonnée
6.5. Evolution des états de surface en parcelles non billonnées
6.6. Conclusions

B. *Région de Tlaxcala; expérmentation sur tepetates t2 et t3, et sur sol*

1. Stations, protocole expérimental et méthodes

1.1. Propriétés initiales des tepetates et du sol
1.2. Stations et protocoles
1.3. Méthodes

2. Régime des pluies et érosivité en 1991

2.1. Régime des pluies
2.2. Erosivité des pluies

3. Mesures de l'érosion en 1990-91

3.1. Tepetate nu
3.2. Tepetate labouré-nu
3.3. Tepetate labouré-billonné, en maïs
3.4. Tepetate planté de Tlaxistle
3.5. Sol non labouré

4. Ruissellement en 1990-91

5. Corrélations entre les coefficients EI.30 et AIm, et les résultats

6. Régime hydrique des tepetates cultivés

C. *Comparaison des stations de Texcoco et de Tlaxcala; conclusions*

1. Erosivité des pluies

2. Ruissellement, pertes en terre, effets des traitements sur l'érodibilité

3. Evolution des états de surface

IV. REHABILITATION DE LA FERTILITE DES TEPETATES

1. Détermination de la fertilité chimique au laboratoire

1.1.Essais vase de végétation, éléments limitants
a. Méthode
b. Résultats

1.2. Analyse de la dynamique du phosphore et du potassium
a. Méthodes et échantillons
a.1. Méthodes
a.2. Echantillons
b. Résultats
b.1. Phosphore
b.2. Potassium

2. Etude de la productivité agricole des tepetates

2.1. Productivité agricole en milieu paysan
a. Une première enquête en 1989
b. Un suivi agronomique en 1990

2.2. Expérimentation en station
a. Essais sur tepetate t3 à Tlalpan
b. Essais du CIFAP sur tepetate t2 à El Carmen

2.3. Analyse des composantes du rendement et des facteurs de production
a. Analyse des propriétés du tepetate en fonction du temps de culture
a.1. Propriétés chimiques
a.2. Propriétés physiques

b. Analyse des composantes du rendement, facteurs de production
b1. Suivi du maïs
b.2. Suivi du blé

2.4. Suivi socio-économique des systèmes économiques familiaux, rentabilité
a. Le tepetate, ressource en terre agricole
b. Rotation culturale spécifique
c. Façons culturales et fertilisation spécifiques
d. Coût de la réhabilitation, rentabilité
e. Plus-value des tepetates réhabilités en sols agricoles
f. Bilan de rentabilité des investissements

CONCLUSIONS

1. Cartographie des sols et tepetates

2. Caractérisation des tepetates

3. Susceptibilité à l'érosion des tepetates
3.1. L'agrégat optimum
3.2. Erosivité des pluies
3.3. Taux de ruissellement et perte en terre
3.4. Evolution de l'état de surface d'un tepetate cultivé
3.5. Evolution des propriétés physiques de surface d'un tepetate cultivé

4. Facteurs chimiques et physiques de fertilité du tepetate
4.1. Fertilité chimique potentielle
4.2. Evolution des propriétés chimiques et physiques du tepetate cultivé

5. Productivité agricole du tepetate cultivé

6. Facteurs socio-économiques de réhabilitation agricole des tepetates

REFERENCES

INTRODUCTION

L'étude des "tepetates", sols volcaniques indurés des Bassins de México et de Tlaxcala, a pour but d'apporter une contribution scientifique de base à la réhabilitation agricole de sols devenus stériles. Les tepetates sont situés sur des piémonts et plateaux de part et d'autre de la Sierra Nevada. L'érosion des sols a mis à nu de vastes étendues de ces couches indurées quasi-stériles, contribuant à la désertification de ces régions, qui ont une forte densité de population agricole. Mais le fort accroissement démographique implique la récupération des terres stériles, pour développer l'agriculture.

Le problème posé au scientifique concerne tout d'abord la connaissance de la nature et de l'origine des matériaux indurés dans les sols volcaniques, et de leur processus de formation. Ensuite il s'agit de déterminer leurs propriétés susceptibles de favoriser ou de restreindre leur utilisation agricole; notamment les facteurs potentiels de fertilité pour les plantes et de stabilité contre l'érosion; en bref leur capacité à reformer des sols fertiles et stables.

C'est pourquoi le programme d'étude comprend deux thèmes principaux:
1° Inventaire, caractérisation et cartographie des tepetates.2° Régénération de la fertilité et conservation des sols.

Un troisième concerne l'étude du fonctionnement d'un système tepetate, c'est à dire le processus de l'induration. Seules les deux premières opérations ont été menées à bonne fin. La troisième n'a pu être réalisée, faute de méthodologie appropriée et fiable.

Cette étude a duré 3 ans, du 1.04.1989 au 30.03.1992. Le programme a regroupé deux projets: l'un dans la région de México, présenté par le Colegio de Postgraduados de Montecillo (CPM) et l'ORSTOM; l'autre dans la région de Tlaxcala, proposé par l'Université de Giessen (UG), et un consortium de l'Université de Tlaxcala (UAT) et de Services du Gouvernement de cet Etat. C'est pourquoi il a été réalisé en deux lieux distincts et par deux équipes: Bassin de México, CPM-ORSTOM; Bassin de Tlaxcala, UG-UAT. Cependant le coordinateur scientifique s'est employé à la concertation des partenaires, pour obtenir une certaine complémentarité des travaux et des échanges bénéfiques entre les équipes.

Les principaux travaux réalisés et présentés dans ce rapport sont les suivants:

1 - Inventaire, caractérisation et cartographie des tepetates.

1.1. - La cartographie des sols et des tepetates a été faite à 1/50.000: 1° sur le versant Ouest de la Sierra, Vallée de Mexico, par D. Peña et C. Zebrowski; 2° au Nord-Est de la Sierra, Vallée de Tlaxcala (complément de cartes antérieures), par G. Werner. Cette cartographie a permis d'identifier les types principaux (corrélation entre les deux régions), et de montrer leur distribution spatio-temporelle.

1.2. - La caractérisation des principaux types de tepetates et des sols associés, a été faite par: des observations microscopiques (pétrographie - micromorphologie), l'analyse des constituants minéraux (minéralogie, sédimentologie), la détermination des propriétés physiques et chimiques, quelques datations des matériaux.

Les principaux résultats sont: une classification des types de tepetate; la nature et l'âge des matériaux originels; la nature des ciments, argile, silice et calcaire; les propriétés mécaniques et hydrodynamiques; les facteurs physiques et chimiques de fertilité potentielle.
Les principaux contributeurs sont: 1°) Equipe CPM-ORSTOM: D. Peña, C. Zebrowski, K. Oleschko, J. Etchevers, C. Hidalgo, M. Delaune, P. Quantin, et les laboratoires ORSTOM et CPM. 2°) Equipe UG-UAT: G. Werner et R. Hessmann.

2 - **Régénération de la fertilité des tepetates et conservation des sols.**

2.1. - L'étude expérimentale de l'érosion et de la conservation des sols a été faite seulement sur des tepetates faiblement silicifiés (fragipans), cas le plus étendu dans cette région. Elle a comporté des mesures au laboratoire et au champ.

2.1.1. - Au laboratoire, K. Oleschko et M. Martinez ont déterminé "l'agrégat optimum", du tepetate fragmenté.

2.1.2. - Au champ, l'expérimentation a été faite sur des petites "parcelles d'érosion".

a) Equipe CPM-ORSTOM :1° travaux de M. Arias et M.E. Miranda, de mesure de l'érosion et du comportement hydrique, sur un seul type de tepetate ~~et~~ en un seul site et en parcelles de type Wischmeier; en 1990, résultats incomplets sur tepetate + sol seul; en 1991, année complète d'observation 2° travaux de J.L. Janeau et G. Jérome en 1991 sur l'évolution des état de surface (fonte des agrégats).

b) Equipe UG-UAT: travaux de G. Werner, J. Baumann et assistants UAT: Mesures de l'érosion, du ruissellement et du comportement hydrique sur deux types de tepetate et en plusieurs sites, pendant 3 années: en 1989,1990,1991. Seuls les résultats de 1990 et 1991 sont vraiment fiables.

2.2. - L'étude de la régénération de la fertilité a comporté trois opérations: caractérisation de tepetates de référence, expérimentation au laboratoire, expérimentation au champ.

2.2.1. - La caractérisation des propriétés physiques et chimiques de tepetates de reférence a été faite par J. Etchevers, D. Peña et C. Zebrowski, avec les laboratoires du CPM et de l'ORSTOM.

2.2.2. - L'expérimentation au laboratoire a été conduite par J. Etchevers, au CPM et à l'ORSTOM. Elle a comporté deux opérations: une expérimentation en vase de végétation (en serre) qui a mis en évidence une carence en phosphore; une expérimentation au laboratoire sur la dynamique d'échange et la disponibilité des éléments K et P adsorbés par les tepetates.

2.2.3. - L'expérimentation agronomique au champ, a comporté deux volets: agronomique et socio-économique.

a) Expérimentation agronomique par l'équipe CPM-ORSTOM. Après quelques observations sur des parcelles de tepetates réhabilités en milieu paysan dans la région de Mexico, par C. Zebrowski et M. Ortiz en 1989, une expérimentation a été mise en place par H. Navarro, C. Zebrowski et A. Marquez, dans la région de Tlaxcala en 1990 et 1991. Elle a permis d'observer l'impact de deux types de tepetate sur plusieurs plantes cultivées, en fonction du nombre d'années de la réhabilitation agricole. L'évolution de certaines propriétés du sol (eau, nutriments) est comparée à celle du rendement des cultures.

Une partie des mesures hydriques au champ a été faire en collaboration avec J. Baumann et ses assistants de l'équipe U. Giessen - U.A. Tlaxcala. Par ailleurs il y a eu des expérimentations comparables mais insuffisamment contrôlées, faites par le CIFAP-Tlaxcala, en collaboration avec G. Werner, sur deux types de tepetate.

b) Etude socio-économique par l'équipe CPM-ORSTOM, H. Navarro, P. Zahonero et C. Zebrowski. Il s'agit d'une enquête sur les coûts des travaux de réhabilitation des tepetates et de leur rentabilité en comparaison des structures familiales agricoles. Les résultats de cette étude commencée en 1991 ne sont pas complètement analysés.

Ce rapport présente une synthèse des différents rapports et publications des principaux contributeurs, qui sont fournis en annexe. Il comporte successivement; une brève présentation du milieu physique; puis les principaux résultats concernant chaque partie du programme, à savoir: 1°) la cartographie des sols et tepetates, 2°) la caractérisation des tepetates et matériaux originels, 3°) l'érosion et la conservation des sols et tepetates, 4°) la réhabilitation de la fertilité des tepetates; puis les conclusions scientifiques et les conséquences pratiques pour la réhabilitation des tepetates; enfin un résumé et les références des contributeurs.

MILIEU PHYSIQUE

1. Situation géographique

La région étudiée se situe à l'Est de México, dans les Etats de México et de Tlaxcala, entre 19°10' et 19°40' Nord, 98°10' et 98°55' Ouest (Fig. 1). Il s'agit des versants occidental et oriental de la Sierra Nevada, respectivement de la Vallée de México et des Vallées de Puebla-Tlaxcala. Cette région est donc dans le domaine intertropical-nord.En outre elle est à haute altitude: les sommets de la Sierra volcanique, orientée Nord-Sud, s'étagent entre 3000 m au Nord et 5465 m au Sud; les plaines et plateaux des "Vallées" de México à l'Ouest et de Puebla-Tlaxcala à l'Est se situent entre 2200 et 2400 m. La Sierra comporte successivement du Nord au Sud trois massifs principaux: Tlaloc -Telapon (alt. 4120 et 4060 m), Iztaccihuatl (alt. 5230 m) et Popocatepetl (alt. 5465 m). Notre étude concerne surtout les versants et plaines autour du Tlaloc-Telapon.

2. Géomorphologie

Cette région se situe sur le "haut-plateau central" mexicain et à l'intersection de "l'axe néovolcanique" (d'âge plio-quaternaire), qui traverse d'Est en Ouest le Mexique, de Veracruz à Colima en passant par México. Ce haut-plateau est un ensemble tectonique de plateaux soulevés et de fossés remplis de lacs et de sédiments. La Sierra volcanique (S. Nevada) émerge du haut-plateau qu'elle sépare en deux ensembles de "Vallées": de México à l'Ouest et de Puebla-Tlaxcala à l'Est. Celles-ci sont parsemées de cônes volcaniques isolés. Sur chaque versant de la Sierra on distingue successivement du sommet à l'aval quatre formes de relief: sierra, piémont, glacis et plaine, qui constituent une toposéquence (Fig. 2). La Sierra, au-dessus de 2800 à 3000 m d'altitude, a un relief de montagne escarpé et très disséqué. Le piémont est une forme de "planèze" volcano-sédimentaire, en pente régulière de 8 à 15 %, laciniée de "barrancas" (ravins profonds et radiaux). Le glacis est une surface régulièrement aplanie, en pente faible de 3 à 5 %, qui raccorde le piémont à la plaine.

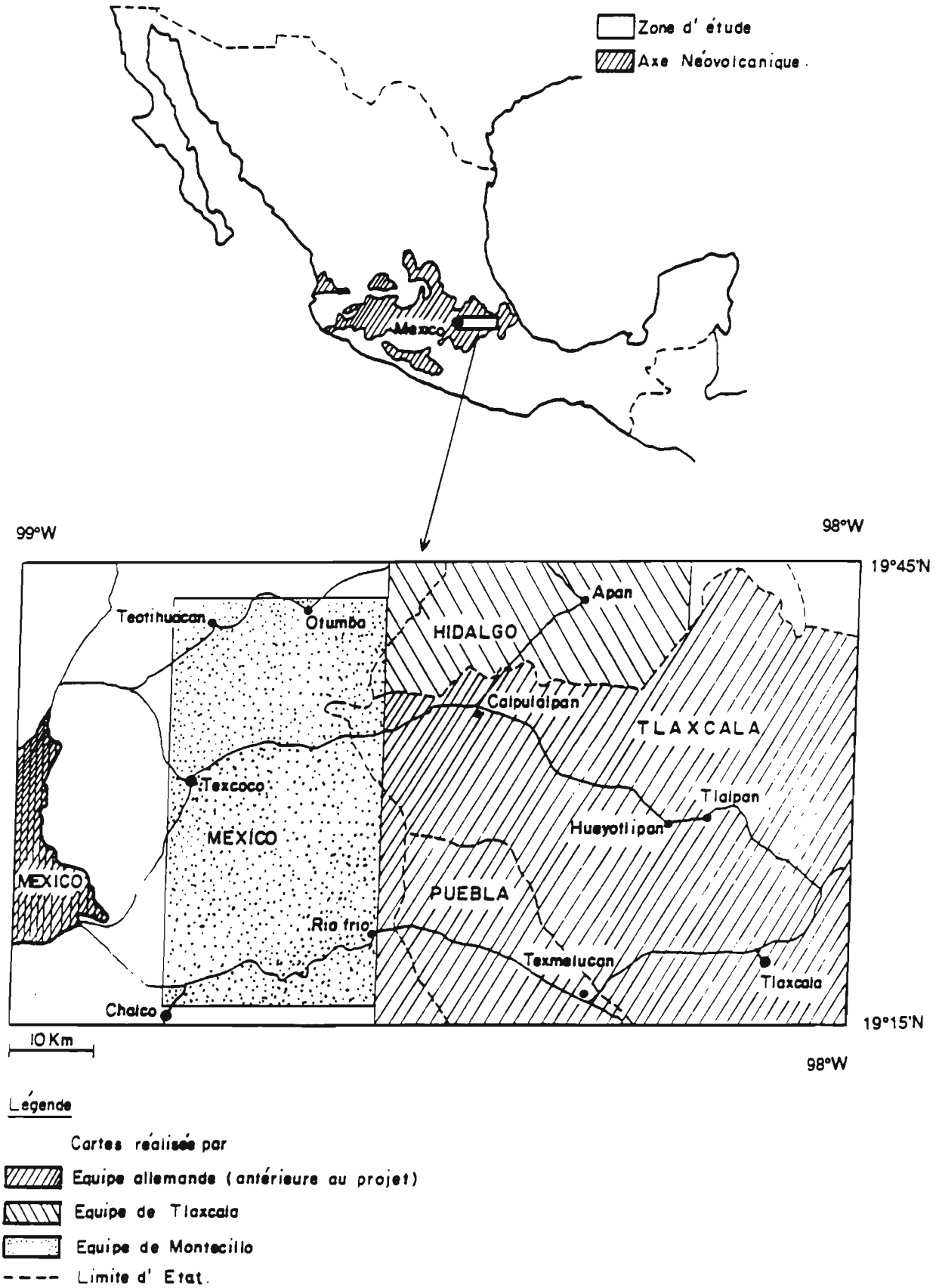


Fig.1. Carte de situation.

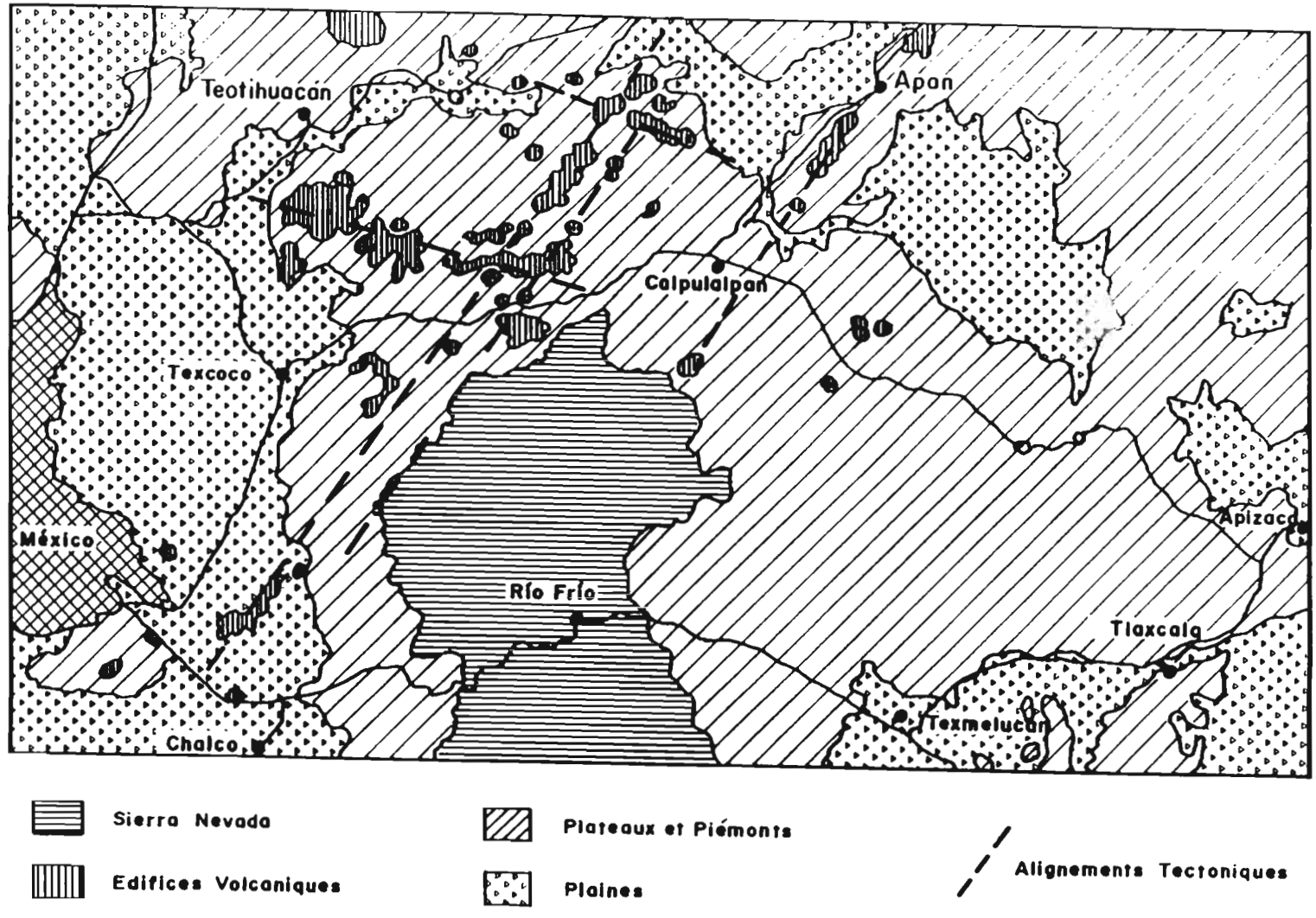


Fig.2. Schéma physiographique.

La plaine est d'origine lacustre et sédimentaire; elle est comblée de sédiments volcaniques. Des modelés glaciaires et périglaciaires sont observés sur les sommets de la Sierra (Tlaloc, Telapon, Iztaccihuatl, sauf Popocatepetl), au-dessus de 3200 à 3400 m d'altitude.

3. **Géologie**

Des sédiments lacustres marno-calcaires d'âge Crétacé ont été profondément recouverts par les formations volcaniques et volcano-sédimentaires d'âge Quaternaire. Les marnes crétacées apparaissent rarement, sur la bordure de failles (horst de Tlaxcala).

3.1. La formation volcanique de la Sierra Nevada a commencé il y a environ 1,7 MA (million d'années, fin Pliocène). Elle s'est prolongée jusqu'à l'Holocène dans l'Iztaccihuatl et elle est encore active au Popocatepetl (Robin 1984, Nixon 1989). Cette formation semble arrêtée depuis 1 MA sur le sommet du Massif Tlaloc-Telapon (datation de Cantagrel 1991); bien que des éruptions latérales récentes (0,1 à 0,01 MA) soient visibles au Nord et au Sud (Rio Frio) de ce massif.

La composition chimique des laves et des ponces est calco-alcaline, généralement riche en silice et en alcalins, surtout en sodium. Les laves les plus fréquentes sont des andésites "acides" (57 à 61% de SiO_2) et des dacites (62 à 68 % de SiO_2). Elles contiennent de 5 à 8 % d'alcalins, dont 3 à 5 % de Na_2O. Basaltes et rhyolites sont plus rares.

Dans les formations basales prédominent les coulées de lave. Tandis que dans les formations sommitales les plus récentes (Popocatepetl), alternent des formations effusives de lave et explosives de coulées "pyroclastiques" (laves éclatées par l'explosion) et de retombées de cendres et de ponces. La composition chimique et minéralogique de ces produits explosifs, suggère un mélange d'un magma dacitique originel par des injections périodiques d'un magma basaltique (Boudal et Robin 1988). Ces produits présentent aussi des caractères "hydromagmatiques" (dûs à la pénétration de l'eau des fossés tectoniques dans la chambre magmatique), fait qui expliquerait la violence des explosions.

Les formations pyroclastiques (cendres, coulées et ponces), surtout sous forme de "nuées ardentes" (avalanches et pluies de cendres), ont recouvert de grandes surfaces sur la Sierra, les piémonts et les plaines alentour, sur de grandes épaisseurs. Elles peuvent aussi provenir des nombreux autres appareils volcaniques autour de la Sierra Nevada. Ces formations superficielles ont pu être remaniées: par les dernières glaciations (40.000 à 10.000 BP, selon White 1962 et Heine 1973), sous formes d'arènes, coulées boueuses et tills; par le vent (lœss) ou par l'érosion (alluvions et colluvions). C'est à l'effet éolien que Heine et Schönhals (1973), puis Miehlich(1984) et Hessmann (1991) ont attribué la formation des "tobas" (tufs volcanoclastiques) sur les piémonts et plateaux qui entourent la Sierra; mais cette interprétation peut être discutée (Quantin et al. 1991).

3.2. Le massif du Tlaloc-Telapon est constitué dans sa majeure partie de laves andésitiques et dacitiques sombres et rubanées, dont l'âge est compris entre 1.7 et 1.0 MA (Cantagrel, 1991). Ces coulées de lave sont irrégulièrement recouvertes dans les dépressions, barrancas et surtout en bas des piémonts par d'épais dépôts de "nuées ardentes", en forme d'avalanches de blocs d'andésites et de dacites mêlés de ponces grises et de cendres blanches, ou de dépôts stratifiés (laminites, base-surges) de cendres et de ponces. Ces matériaux pyroclastiques ont une composition de rhyolite alcaline et de latite quartzifère à prédominance sodique (nos échantillons MXR 2 et 4). Leur origine vient probablement du même massif; leur âge serait du Pléistocène, inférieur ou moyen. La surface des laves ou des dépôts ponceux a été altérée en un sol brun-rouge argileux à halloysite.

Celui-ci a été partiellement érodé avant d'être recouvert par de nouveaux dépôts pyroclastiques du Pléistocène supérieur et de l'Holocène.
Il s'agit d'une part d'une série de "tobas", produits volcanoclastiques fins et partiellement altérés en sols, que Heine et Heide Weise (1973), Heine et Schönhals (1973), puis Miehlich (1984), ont daté entre 10.000 BP pour les plus récents à plus de 20.000 BP pour les plus anciens; d'autre part les "tobas" sur les piémonts ou directement les arènes périglaciaires sur la sierra, sont recouverts de dépôts holocènes de cendres grises et de ponces venant des dernières émissions du Popocatepetl (Robin 1984). Entre "tobas" et cendres, ou intercalés dans les tobas, apparaissent localement des dépôts de ponces rhyolitiques (notamment les ponces de Rio Frio, de 0,012 MA). Les matériaux pyroclastiques des "tobas" et des ponces et cendres du Pléistocène supérieur peuvent provenir de l'Iztaccihuatl et du Popocatepetl (Boudal et Robin 1988, Nixon 1989), ou d'autres volcans alentour. Leur composition (nos analyses) les apparente à des rhyodacites, rhyolites et rhyolites alcalines-sodiques. Ces dépôts ont pu être localement remaniés (dépôts éoliens, colluvions, alluvions).

4. **Climat**

4.1. Le climat de la région de México et de Tlaxcala est un climat intertropical* différencié en raison de l'altitude (2200 à 5465 m) et d'effets de versant (* la température moyenne mensuelle varie peu, seulement de 6°C au cours de l'année). De la Vallée de México au sommet de la Sierra Nevada on distingue quatre zones climatiques.

- Altitude 2200 à 2800 m; plaine, plateaux et piémonts:
T: 15 à 11 °C; P: 600 à 900 mm; saison des pluies estivale de 6 mois (mai à octobre); saison sèche hivernale de 6 mois, dont 2 à 1 mois subhumides (avril et novembre) et 4 à 5 mois subarides (décembre à mars). Le régime hygro-thermique est"ustic-isomesic"*. C'est un climat tempéré à pluies d'été et 6 mois de saison sèche hivernale.

- Altitude 2800 à 3400 m: Sierra inférieure:
T: 11 à 8°C; P: 900 à 1200 mm; saison sèche atténuée par les brouillards diurnes, de 5 à 4 mois subhumides (novembre à mars). Le régime hygrothermique est "udic-isomésic"*. C'est un climat tempéré plus froid et plus humide qu'en plaine, à forte nébulosité estivale, ou à brouillards et gels nocturnes fréquents en hiver.

- Altitude 3400 à 4000 m; Sierra moyenne:

T: 8 à 5°C; P > 1200 mm; saison sèche très atténuée par une forte nébulosité et des brouillards; gels nocturnes très fréquents en hiver. Le régime hygro-thermique est "perudic-isofrigid"*. C'est un climat froid et perhumide.

- Altitude > 4000 m; Sierra inférieure:
T< 5°C; régime "cryic"*; fortes variations diurnes de température; gel et neige très fréquents en hiver. C'est un climat froid de type andin.

NB: T et P = température et pluviosité moyennes annuelles;* régime hygrothermique, Soil Taxonomy 1975.

Les sols que nous avons étudiés sont situés dans les trois premières zones climatiques. Les "tepetates" sont présents seulement dans la première, en dessous de 2800 m d'altitude, en régime "ustic-isomesic".

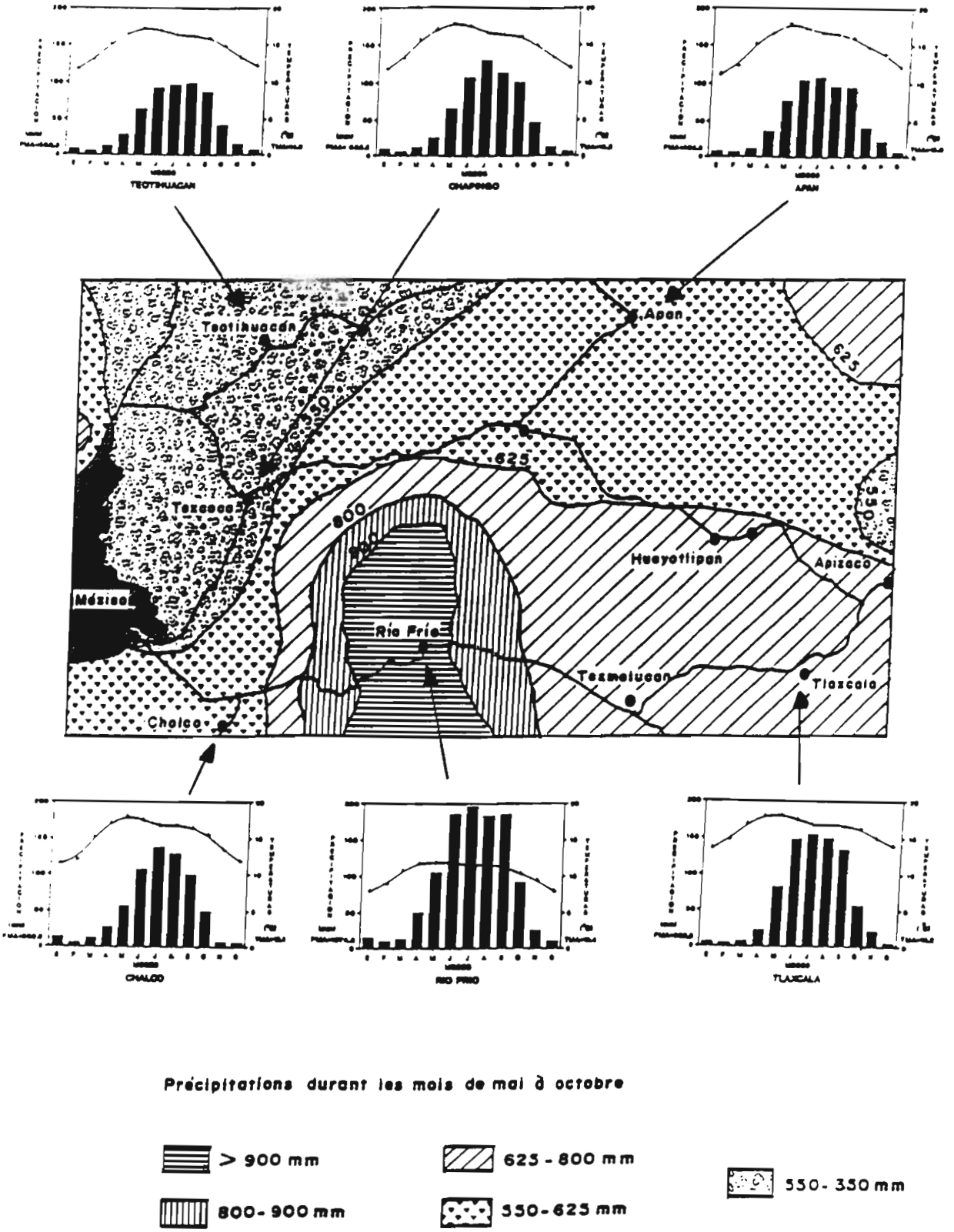


Fig.3. Distribution des climats, Climogrammes.

4.2. La distribution du climat sur les versants du piémont et de la Sierra (Fig. 3) suit un gradient altitudinal: négatif de température, positif de pluie et d'humidité. C'est une "climotoposéquence altitudinale". De 2200 m à 2800 m d'altitude, il y a transition progressive du régime d'humidité de "ustic" à "udic", et de la pluviosité de 600 à 900 mm/an. L'effet de la saison sèche s'atténue; l'excès pluviométrique (Pluie-Evapotranspiration) augmente; l'humidité des sols sous couvert végétal permanent demeure au-dessus du point de flétrissement. Ainsi de Chalco (SE de Mexico, alt. 2240 m) à Rio Frio (Sierra, alt. 3100 m), T diminue de 15 à 10°C, P augmente de 657 à 1074 mm/an, l'excès pluviométrique estival s'accroît de 290 à 710 mm et le déficit pluviométrique hivernal diminue de 200 à 80 mm.

4.3. Sur les hautes plaines et glacis de piémont des Vallées de México et de Tlaxcala, la température moyenne mensuelle varie peu, de 12° C en hiver à 18° C en été; mais en hiver pendant la saison sèche, la variation diurne est importante (> 10° C) et il y a des gels nocturnes.

En outre, on observe un gradient d'aridité latitudinal, du Sud vers le Nord (Fig. 3, climogrammes). Dans la Vallée de México P diminue de 657 mm (Chalco) à 563 mm (Teotihuacan), l'excès pluviométrique estival de 290 à 190 mm et le déficit hivernal augmente de 200 à 220 mm. Dans la Vallée de Tlaxcala, P diminue de 803 mm (Tlaxcala) à 625 mm (Apan), l'excès pluviométrique de 330 à 240 mm et le déficit hivernal s'accuse de 220 à 240 mm.

5. **Sols et tepetates**

5.1. Les sols des régions de Mexico et de Tlaxcala se sont formés à partir de matériaux pyroclastiques d'origine volcanique et d'âge quaternaire. Ce sont des sols jeunes (riches en minéraux volcaniques peu altérés) et complexes. Ils se sont constitués sur une succession de dépôts du Pléistocène supérieur et de l'Holocène, et de composition variée, que nous avons analysée en détail (voir plus loin). Un profil de sol présente souvent une série stratigraphique de sols d'âges différents. Ceci complique la caractérisation et la classification des sols.

5.2. Cependant, la distribution des groupes principaux de sols suit une climo-toposéquence, c'est à dire la zonalité climatique altitudinale (Miehlich 1984/Dubrœucq, Quantin et Zebrowski 1989). Ainsi sur le versant Ouest de la Sierra, du Tlaloc à Texcoco, on observe successivement (Fig. 4): 1° de 4100 à 2800 m, sur la Sierra en climat régulièrement humide (régime udic), des andosols; 2° de 2800 à 2250 m, sur le piémont et le glacis en climat subhumide à subaride (régime ustic), une transition de sols bruns-andiques aux sols bruns à croûte calcaire. Cette séquence est progressive. Une analyse détaillée montre la succession suivante.

- Plus de 3400 m; climat perhumide et froid: andosols noirs et désaturés (Umbric Andosols), de types "perhydratés-mélaniques" et "désaturés-mélaniques".

- 3400 à 2800 m; climat humide et tempéré froid: andosols noirs ou bruns et saturés de types "humiques-mélaniques" (Eutri-Umbric Andosols) et "saturés chromiques" (Mollic Andosols)

- 2800 à 2600 m; climat subhumide et tempéré, de transition: sols bruns andiques (Andi-Eutric Cambisols), sols bruns-eutrophes (Eutric Cambisols) ou bruns faiblement lessivés (Haplic Luvisols).

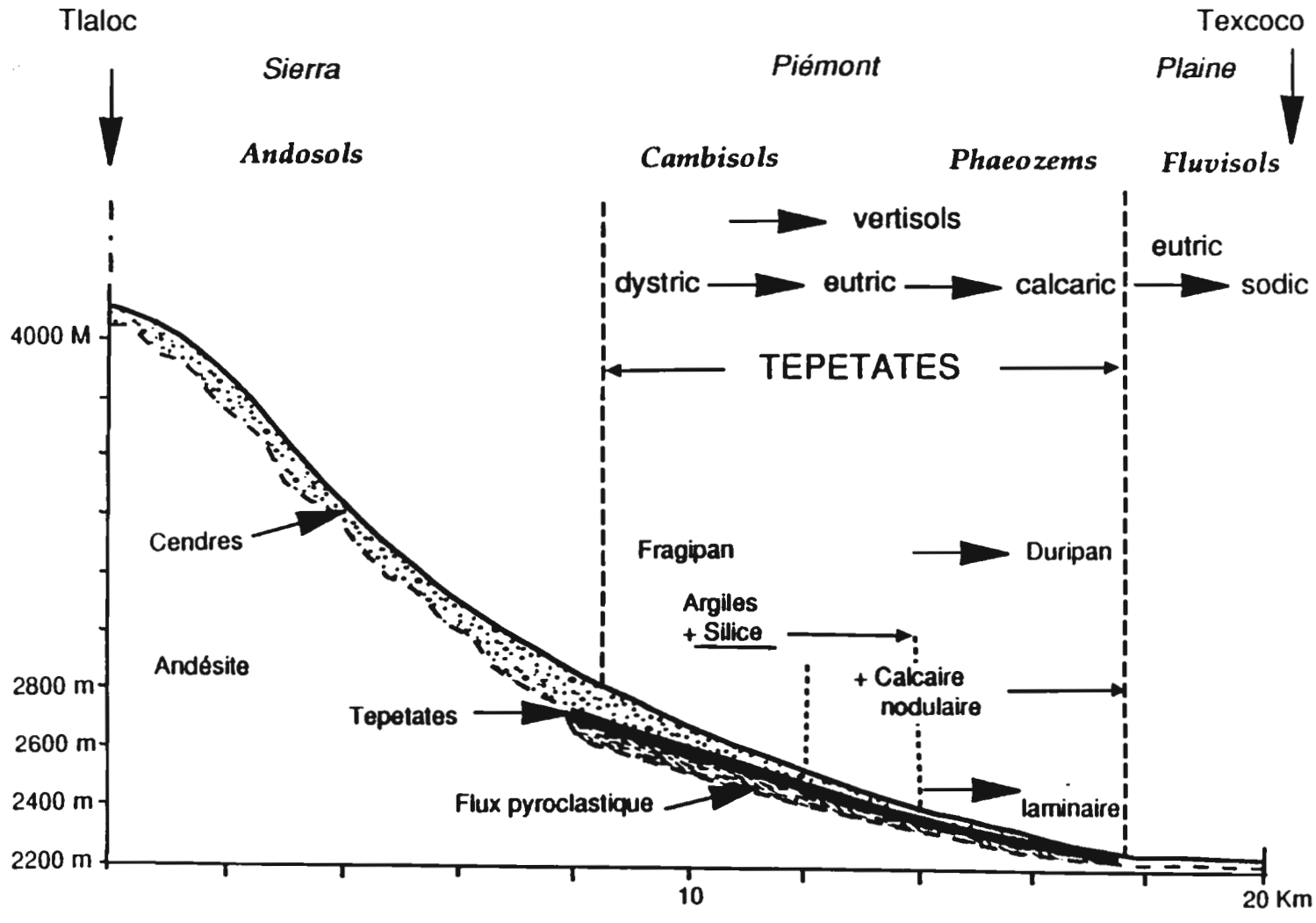


Fig.4. Climotoposéquence de sols.

- 2600 à 2250 m; climat tempéré avec gradient d'aridité vers subaride:
  - En mi-piémont: sols bruns-vertiques à calcaire friable (Calcari-Vertic Cambisols. En aval et glacis: sols bruns subarides à encroûtement calcaire (Calcaric Phœozems).

- 2250 m; la plaine alluviale, en climat tempéré-chaud et subaride, sur des matériaux fluviatiles et éoliens récents, comporte des sols bruns subarides (Haplic Phæozems), des sols peu évolués (Fluvisols) et des sols salés (Solonchaks).

Il y a donc transition des sols à allophane (andosols) en climat humide vers des sols bruns argileux (à halloysite, et, ou smectites), du climat subhumide à subaride, accompagnée d'une accumulation progressive de calcaire, au pôle subaride. En outre, les sols bruns argileux, avec ou sans calcaire friable, présentent tous des illuviations (accumulations) d'argile, et éventuellement de silice, dans la partie profonde du sol. On observe aussi une évolution de la nature des argiles: en haut du piémont, les sols sont brun-rougeâtre et leur argile à prédominance d'halloysite (minéral proche de la kaolinite) dans l'ensemble du profil. En aval, la partie supérieure du sol est gris-clair et vertique, et à prédominance de smectites (beidellite, montmorillonite, interstratifiés); elle peut présenter des nodules calcaires friables; tandis que la partie profonde du sol est brun-rouge et à prédominance d'halloysite.

Ceci suggère que le climat est devenu plus aride depuis la formation des derniers dépôts.

5.3. Des horizons indurés, appelés localement "tepetates" sont intercalés dans les sols du piémont et du glacis. Leur localisation sur le piémont en régime climatique subhumide à subaride(ustic), suggère un effet du climat et de la pédogenèse sur leur formation; bien que la nature de cet effet ne soit pas clairement établie et que l'on puisse invoquer aussi l'impact de la texture du matériau originel (Quantin, 1991, voir plus loin).

Sur le piémont, dans les sols bruns argileux (Cambisols), les horizons de tepetates ont une consistance de "fragipan" (dur à l'état sec, friable à l'état humide, Peña et Zebrowski, 1991). Ce sont des horizons d'altération de cendres volcaniques, enrichis en argile et en silice (Hessmann, 1991 - Hidalgo, Quantin et Zebrowski, 1991 - Oleschko et al. 1991). Parfois aussi sous le même nom on observe un horizon de tuf volcanique inaltéré ou peu altéré et dur (qui demeure stable à l'état humide).

Sur le glacis, à l'aval du piémont, et à la base des Phaeozems, le tepetate est un horizon "pétrocalcique"; il s'agit d'un encroûtement calcaire foliacé et dur (qui demeure stable à l'état humide), dans un horizon d'altération de tuf ou de brèche volcanique.

5.4. L'érosion a souvent dégagé le sol superficiel jusqu'aux horizons les plus durs, de lave, de tuf ou de tepetate. Sur la Sierra, ce sont des sols peu évolués d'érosion lithiques (Lithic Leptosols). Sur les piémonts, les sols d'érosion ont été classés comme "tepetates".

Les volcans isolés dans la plaine comportent sur leur sommet des sols d'érosion et sur leur piémont des sols bruns avec intercalation de tepetates. En outre les piémonts Nord-Est des volcans isolés ou au Nord de la Sierra sont souvent recouverts d'un sol brun sur un manteau de dépôts éoliens récents.

6. **Végétation et utilisation des sols**

Deux zones principales se distinguent: la Sierra essentiellement forestière et en dessous la zone agro-pastorale, sur les piémonts, plateaux, glacis et plaines. La frontière agricole se situe entre 2800 et 2900 m d'altitude. Elle est physiographique et surtout climatique, marquant la limite d'un relief de montagne et de risques de gels trop importants pour le maïs, culture de base au Mexique.

6.1. Sur la Sierra prédomine la forêt, jusqu'à environ 4000 m d'altitude; au-dessus succède une pelouse alpine, semblable au paramon andin. La composition de la forêt se modifie avec l'altitude. A l'étage inférieur, un mélange de chênes (Quercus sp.), de pins (P. Leiophylla, Montezumae, Pseudostrobus, ou Rudis), genévriers, ifs et Lauracées: à l'étage supérieur, plus humide et plus froid, des pins (P. Hartweggi) et des sapins (A.religiosa). Mais se développent aussi en clairières entre 2800 et 3100 m, des pâturages extensifs ou des prairies fourragères cultivées (avoine); ou gagnent sur le haut des planèzes des cultures de céréales, fève et pomme de terre.

6.2. Dans la zone agricole, l'utilisation varie selon les formes de relief. En plaine: cultures et prairies intensives avec irrigation, pour l'élevage de vaches laitières notamment. Sur les glacis: cultures intensives, pluviales ou irriguées, cultures maraîchères ou florales.Sur les piémonts et plateaux: agriculture vivrière pluviale semi-intensive, rarement irriguée, et fruticulture. La majeure partie des terres cultivées a été aménagée en banquettes en courbes de niveau, souvent bordées de "maguey" (Cactus), de "nopal" (Opuntia), ou d'arbres fruitiers. Les zones érodées et ravinées, où affleurent les tepetates, servent de parcours itinérant du bétail.

Les principales plantes cultivées sont des céréales: maïs et orge surtout, blé et avoine (le maïs est la culture de base); puis des légumineuses: haricot, fève et ayocote (Phaseolus Coccineus).

6.3. Les zones érodées, à tepetate affleurant, sont en cours de restauration. Soit, sur les parties hautes et les plus ravinées, il y a reforestation en pins et eucalyptus, avec des travaux de remodelage (terrasses en pente) ou de conservation (sous-solage sur la ligne de plantation, fossés ou talus anti-érosifs). Soit agricole, avec remodelage des sols par roturation (sous-solage profond, puis labour et pulvérisage des blocs de tepetate), et façonnement de banquettes en pente réduite, bordées d'ados et de fossés. Notre étude est consacrée spécialement a l'expérimentation de ces aménagements.

I - CARTOGRAPHIE DES SOLS ET TEPETATES

La reconnaissance des sols et des tepetates s'est accompagnée d'un lever cartographique à 1/50.000e dans les deux régions de cette étude: Vallée de México, par l'équipe CPM-ORSTOM; Vallée de Tlaxcala, par l'équipe U.Giessen U. Tlaxcala. Cependant les deux responsables C. Zebrowski et G. Werner se sont concertés quant à: la caractérisation des matériaux originels des sols et tepetates des piémonts et plateaux; l'observation en commun d'une toposéquence à la limite des deux régions, au Nord de la Sierra, ainsi que d'un profil de référence à Tlalpan, Tlaxcala; des échanges d'observations.

1. Carte des Sols et Tepetates de la Vallée de Mexico. feuille de Texcoco.

Cette carte a été dressée par C. Zebrowski et D. Peña (carte et notice, en annexe). Elle concerne tout le versant Ouest et Nord-Ouest du Massif Tlaloc-Telapon. Sa superficie est de 1023 km^2 (102 314 ha).

Trois méthodes ont été utilisées concuremment: 1° l'analyse sur des photographie aériennes à 1/25.000e des formes de relief et de la couverture superficielle; 2° l'observation des sols sur le terrain, ordonnée en 4 "climotoposéquences"; 3° une étude stratigraphique détaillée des matériaux volcaniques originels. 64 profils de sols ont été décrits et échantillonnés. Près de 300 échantillons de sols de référence, ont été analysés; 15 échantillons des différents types de tepetate ont été choisis pour une analyse détaillée de leurs propriétés physiques et chimiques. Il est vite apparu que la présence d'horizons de tepetate dans les sols est liée à trois facteurs principaux: 1° situation en piémont; 2° climat tempéré "xérique" (subhumide à subaride); 3° matériau originel pyroclastique consolidé, de type tuf (toba), datant de plus de 10.000 ans (Miehlich, 1984). Ils ne sont pas observés sur des formations superficielles meubles: cendres, dépôts éoliens, colluvions, alluvions. En outre les types de tepetate sont eux-mêmes dépendants du type de dépôt, de son âge et de sa position dans une climotoposéquence pédologique.

La cartographie a une base physiographique et pédologique. C'est pourquoi les unités de la carte sont "morpho-pédologiques". Cependant la légende des unités de sols est présentée dans la notice, selon trois systèmes de classification: Soil Taxonomy (SMSS, 1990), Légende FAO-UNESCO (1985), Classification Française (CPCS, 1967, 1972 et AFES, Référentiel, 1990).

1.1. Légende des unités cartographiques (unidades de mapeo).

Cinq ensembles majeurs de formes de relief sont successivement distingués: Sierra, appareils volcaniques isolés, piémont et glacis, barrancas, vallées et plaines alluviales. Ils sont subdivisés en unités cartographiques.

Chaque unité cartographique est définie par 3 paramètres dans l'ordre suivant: forme de relief, caractères apparents des sols, symbole de référence à l'unité-sol de la légende pédologique.

Les tepetates apparaissent dans l'ensemble physiographique "Piémont et Glacis". Ils sont soit en intercalation dans les sols des zones non érodées, soit en surface dans les zones érodées; dans ce cas, trois degrés d'érosion sont distingués suivant la proportion de tepetate en affleurement, ainsi que le type de tepetate (t2, t3, ti).

1.2. Légende des sols (unidades de suelo).

Trois ensembles principaux de sols sont distingués:

1° - Sols "peu évolués-lithiques", produit d'une érosion sévère jusqu'au substrat de roche dure;

2° - Sols "évolués-sans tepetate", profondément développés sur des matériaux meubles d'âge récent, tels cendres volcaniques, "loess", ou alluvions: Andosols sur la Sierra, Cambisols sur certains piémonts, Phaeozems et Fluvisols dans la plaine;

3° - Sols "évolués-avec tepetate", profondément développés sur des dépôts complexes et stratifiés de matériaux d'origine pyroclastique, qui comportent des couches indurées. Ces matériaux indurés sont classés suivant trois séries de dépôts: T2, T3 et Ti (indifférencié), ainsi que selon la présence de calcaire formé dans le sol: sans, un peu et friable, abondant et dur; les deux premiers étant des "fragipans", le troisième un horizon "pétrocalcique".

Les sols sont classés d'après les caractères pédologiques prédominants dans la partie supérieure du sol: andique, vertique, luvique, eutrique, etc.

L'importance des tepetates est soulignée, suivant que l'effet de l'érosion les fait apparaître: profonds, peu profonds ou affleurants; ainsi que s'il s'agit de fragipans ou d'horizons durs, pétrocalciques. En outre il y a une unité particulière de "tepetates réincorporés à l'agriculture".

Cette cartographie permet donc d'évaluer les surfaces de tepetate à nu et stérile , de tepetate déjà réincorporé à l'agriculture, et aussi des sols à tepetate susceptibles de désertification après érosion . Il y a 41968 ha de sols à tepetate, soit 41 % de la superficie totale; dont 14.216 ha ± érodés présentent des tepetates à nu, soit 13,9 % de S total ou 33,1 % des sols à tepetate. De ces surfaces érodées, 4077 ha sont reforestés, soit 28,7 % des tepetates dénudés, et 833 ha sont recultivés en terrasse, dont 423 ha avec réhabilitation d'un sol (roturation), soit respectivement 5,8 et 3 % des tepetates dénudés.

Une image SPOT de cette région, acquise spécialement pour notre étude, a été reproduite récemment en "fausse couleur" à l'échelle de la carte. Ceci a permis de contrôler la carte morpho-pédologique et de mettre en évidence les linéaments structuraux (alignements de failles et de volcans). Son analyse détaillée pourrait permettre d'extrapoler à des régions voisines la cartographie des sols, de l'érosion et des tepetates.

2. Carte des Sols et Tepetates de la Vallée de Tlaxcala, feuille d'Apan.

Il s'agit d'un complément à la carte des sols de l'Etat de Tlaxcala, à 1/100.000e, publiée par G. Werner (1988). Apan se situe au Nord-Ouest de Tlaxcala, au Nord Est du Massif Tlaloc-Telapon. Cette carte a été dressée à 1/50.000e par G. Werner en 1991-92 (carte et notice en annexe). Sa superficie est de 700 km^2

La légende de la carte est pédologique; elle utilise le système de la FAO, mais dans sa version de 1975, pour ne pas modifier la légende publiée en 1978. Il est regrettable qu'elle ne propose pas la légende révisée de 1985, ni des équivalences dans les systèmes américain et français, afin de pouvoir être comparée à la carte de Texcoco. Cependant G. Werner et C. Zebrowski se sont concertés pour harmoniser les limites d'unités entre les feuilles d'Apan et de Texcoco.

Les tepetates apparaissent parmi les Cambisols avec horizons de fragipan. L'auteur, à la suite d'observations nouvelles ne les considère plus comme duripan. Cependant les tepetates à encroûtement calcaire laminaire dur, sont des horizons pétrocalciques, non des fragipans. Une harmonisation des légendes de carte des sols, au moins dans la notice d'Apan, serait donc utile.

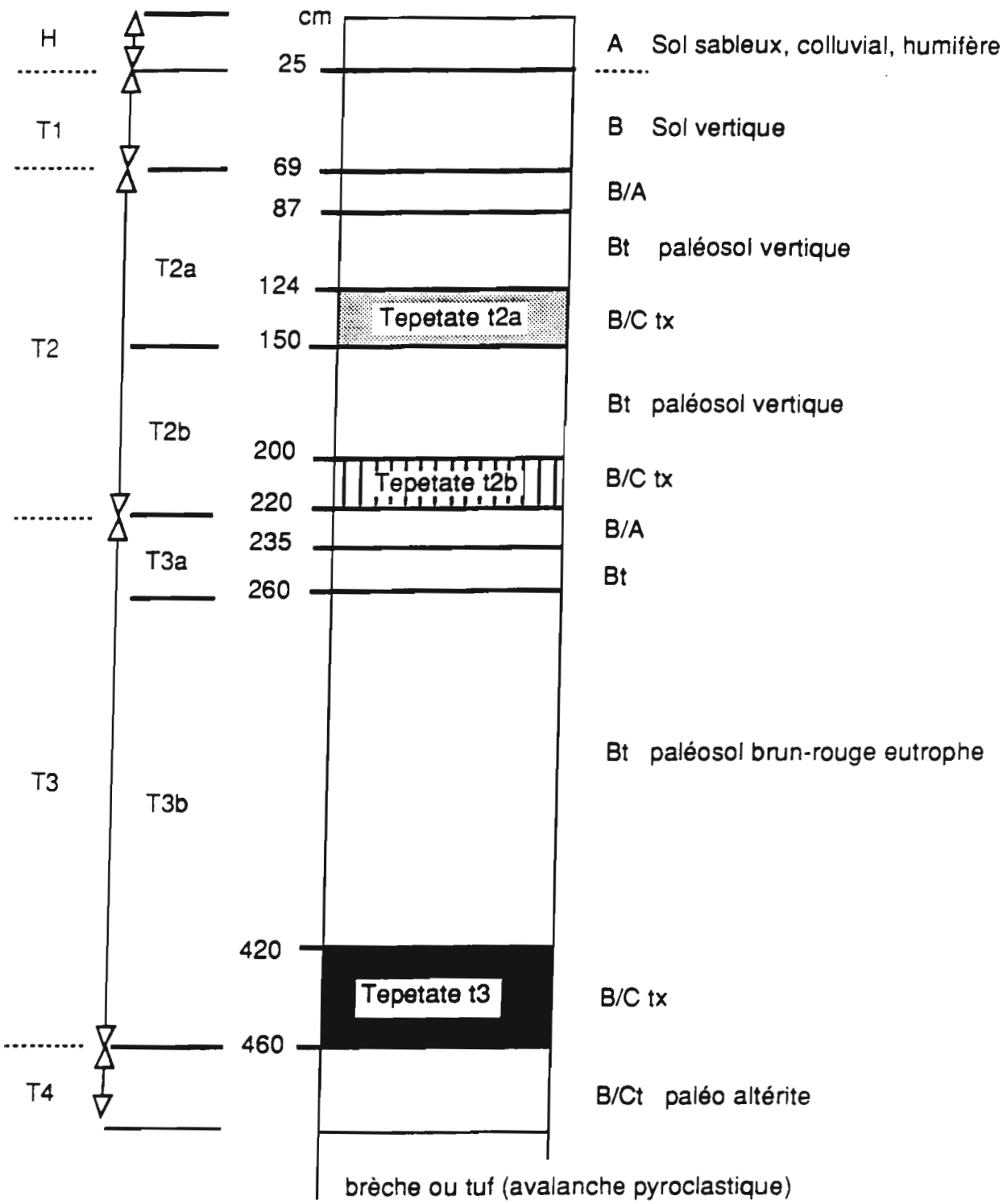


Fig.5. Stratigraphie des dépôts pyroclastiques, sols et tepetates.

II - CARACTERISATION DES SOLS ET TEPETATES

Cette étude traite successivement: des matériaux originels; de la classification des types de tepetate; des caractères des fragipans, leur genèse et leur cimentation; des propriétés des principaux types, mécaniques, hydrodynamiques, facteurs physiques et chimiques conditionnant la fertilité.
Elle est l'oeuvre de la plupart des partenaires du programme. Les références et données sont à rechercher dans les résumés étendus et les Actes du Symposium sur les sols volcaniques indurés (1991-1992), ainsi que dans les rapports en annexe de J. Etchevers, D. Peña et C. Zebrowski, K. Oleschko, R. Hessmann et G. Werner, ainsi que le mémoire de DEA de C. Hidalgo (1991).

1. **Matériaux originels des sols et tepetates.**

Les tepetates du piémont de la Sierra ~~ou~~ des plateaux de Tlaxcala, sont interstratifiés dans une succession de dépôts volcano-sédimentaires et de paléosols. Ces dépôts ont été dénommés "tobas" (Heine et Schönhals 1973, Miehlich 1984, Werner 1988). et /

1.1. Schéma stratigraphique.

Une coupe complète sur le piémont occidental de la Sierra, près de Texcoco (P30, in Hidalgo, 1991) montre au moins 5 séries de dépôts (Fig. 5), successivement de haut en bas: -H dépôt sablo-limoneux, éolico-colluvial, à fragments de poteries et obsidiennes; dépôt récent ayant formé le sol humifère actuel. -T1: sol vertique de couleur sombre; dépôt de cendres volcaniques de l'Holocène inférieur. -T2: ensemble de 5 à 6 horizons, de couleur gris-clair ou blanchâtre, apparenté à la "toba 2T" de Miehlich (1984) et d'âge entre 10.000 et 20.000 ans BP. -T3: ensemble de 3 à 4 horizons, de couleur brun-rougeâtre, apparenté à la "toba 3T" de Miehlich, d'âge entre 20 et 35.000 ans B.P. -T4: un paléosol brun-rougeâtre et une "altérite" de brèche ou tuf grossier ponceux.

L'ensemble T1 peut comporter un dépôt éolien de limon-sableux analogue à la série 1 T de Miehlich (1984); ce dépôt se trouve seulement au Nord de la Vallée de México, sur les piémonts orientés N-NE, de la Sierra et des volcans isolés.

L'ensemble T2 présente en fait deux séries de dépôts constitués alternativement d'un paléosol vertique et d'un tepetate. T2a: paléosol vertique sur tepetate "t2a"; T2b: paléo-vertisol sur tepetate "t2b"; latéralement il apparaît souvent sous t 2b un banc de tuf ponceux blanc quasi inaltéré (appelé aussi tepetate). De même on a distingué (après analyse détaillée) en T3 deux séries de dépôts T3a et T3b; ce dernier dépôt comporte un paléosol brun (brun-eutrophe tropical) sur un tepetate "t3". A noter une discordance stratigraphique entre les séries T2 et T3, marquant une surface d'érosion.

On observe presque toujours pour chaque série de dépôt, qu'un paléosol recouvre un matériau induré et partiellement altéré, à consistance de tuf, appelé tepetate. Parfois s'intercale localement un vrai tuf peu altéré. Cette succession, sauf en cas d'érosion, est observée de part et d'autre de la Sierra et sur les plateaux de Tlaxcala, notamment à Tlalpan. Dans ce dernier site, s'ajoutent en profondeur 4 autres séries de dépôts, semblables à celui de la série T3, jusqu'au substrat ancien de lave (Hessmann, 1992)..

Les tepetates t 2a t 2b et t 3 ont des traits pédologiques d'horizon d'altération et un comportement de fragipan. Chaque série de dépôt comporte donc la superposition d'horizons B et Cx.

1.2. Age: Quelques datations par ^{14}C (Marc Fournier, ORSTOM, 1991) de charbon ou d'encroûtement calcaire inclus dans ces dépôts sur le versant ouest de la Sierra, confirment l'âge des matériaux: 7000 à 8000 ans BP pour ceux qui recouvrent la série T2 et la dernière émission de ponces de "Rio Frio" (datée < 0.012 MA par Nixon, 1989); 13.000 BP pour un charbon et plus de 10.000 BP pour un revêtement calcaire dans la série T2; plus de 20.000, environ 22.000 BP dans un encroûtement calcaire, à la base de la série T3.

2. Classification des types de tepetate.

Les tepetates ne doivent plus être classés d'après leur couleur: gris ou blanc, brun ou iaunâtre, qui est un caractère imprécis. Nous proposons de les déterminer par trois critères: 1° - stratigraphique, les rattachant aux séries de dépôts, et les désignant par t2a, t2b, t3, etc.. ou ti si indéterminé; 2° - de consistance, soit de fragipan (friable à l'état humide), soit dure en permanence (duripan); 3° - la présence ou non d'accumulation calcaire dure, sous forme d'encroûtement laminaire (horizon pétrocalcique).

Les formations de tuf volcanique ou sédimentaire, non ou peu altéré, par exemple le tuf ponceux blanc à la base de la série T2, ne doivent pas être confondues avec un "tepetate", qui est un horizon modifié par la pédogénèse; un tuf ne peut être assimilé à un duripan (horizon de sol siliciflé, dur à l'état humide). Mais les brèches pyroclastiques ou tufs grossiers (à la base de T3) qui sont altérés et encroûtés de calcaire, sont considérés comme tepetate (mais non duripan). En fait la plupart des tepetates de la partie amont et moyenne des piémonts, avec ou sans calcaire friable, sont des fragipans.

3. Matériau originel et genèse des tepetates de type fragipan.

La connaissance du matériau originel et du mode de formation des tepetates est une tâche difficile. Elle a été obtenue par l'analyse des minéraux lourds, de courbes granulométriques, de la composition chimique et minéralogique des minéraux primaires et des minéraux argileux, et par la microscopie (optique et électronique) sur lame mince.

Cette analyse a été appliquée sur l'ensemble des horizons de profils de sols et tepetates; notamment les profils P30 et P37 près de Texcoco (Hidalgo, Quantin et Zebrowski, 1991) et celui de Tlalpan, au nord de Tlaxcala (Hessmann 1991-92), avec la collaboration de Werner et Baumann). Nous proposons une synthèse des nombreuses observations de R. Hessmann, M. Delaune, C. Hidalgo, K. Oleschko, C. Zebrowski et P. Quantin.

3.1. Composition chimique et minéralogique du matériau originel.

Tous les matériaux (sols et tepetates) sont constitués uniquement de produits volcaniques pyroclastiques, dont plus de la moitié des constituants sont des phénocristaux et des verres inaltérés. Ceci a permis d'analyser la composition probable du matériau originel (Quantin, Zebrowski, Delaune et Hidalgo, 1991-92). La composition chimique (tableau ci-dessous) des matériaux inaltérés des séries T2 et T3 est apparentée à des rhyolites alcalines sodiques; tandis que ceux des dépôts superficiels (H - T1) est plus basique et proche de dacites (rhyodacites alcalines). Chaque série montre une évolution, du matériau plus basique et sodique en bas, au plus siliceux et potassique en haut; Ce sont donc bien des séries magmatiques.

Le caractère constant de ces matériaux est d'être riches en silice et en sodium; c'est important pour la formation des tepetates. On remarque en outre dans chaque série de dépôts que chaque horizon de tepetate contient un peu plus de produit inaltéré (insoluble dans " Triacide") que l'horizon B de sol sus-jacent.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
H-T1	67-69	16-15	2.7-2.2	2.6-1.9	5.3-4.7	4.5-4.7	1.9-1.0
T2	78-70	12-16	0.6-1.2	0.4-0.8	3.0-5.1	3.6-5.8	2.3-0.8
T3	78-73	12-15	1.0-1.3	0.6-0.9	3.4-4.7	3.5-4.4	1.8-0.9

Les matériaux rhyolitiques et rhyodacitiques étaient à l'origine riches en verres alcalins-sodiques, dont une grande partie a été altérée en minéraux argileux et siliceux (opale - cristobalite). Leurs phénocristaux résiduels comportent: plagioclases du pôle sodique (albite - andésine), feldspaths potassiques et sodiques (anorthose, sanidine), quartz, hornblende, hypersthène, titano-magnétite. Plagioclases, quartz et hornblende prédominent. L'analyse des minéraux lourds montrent deux ensembles principaux:

H-T1-T2a : Ho< 80 %, Hy 20-40 %, Au 4-12 %
T2b- T3 : Ho> 80 %, Hy< 10 %, Au < 4%

* Ho = hornblende, Hy = hypersthène, Au = augite

On observe donc un accroissement des pyroxènes dans les formations les plus récentes, témoins d'apport de cendres du Popocatépetl. La prédominance (au moins 90 %) de la hornblende marque le tepetate "t3".

Les matériaux des séries T2 et T3 ont une composition chimique et minéralogique proche des ponces rhyolitiques de Rio Frio et des dacites du Papayo, qui sont des éruptions récentes entre Iztaccihuatl et Tlaloc-Telapon (Nixon 1989). Là pourrait être le foyer de ces matériaux, ainsi que les premières nuées ardentes dacitiques du Popocatépetl (Boudal et Robin 1988).

Tandis que les dépôts H et T1 viennent des dernières nuées dacitiques du Popocatépetl. Selon Boudal et Robin, les verres de ces nuées sont rhyolitiques alcalins-sodiques, et ces produits seraient un mélange de magma rhyolitique et basaltique (suite à une remontée de basalte dans la chambre magmatique).

3.2. Granulométrie et sédimentologie.

Dans le dépôt holocène H, la distribution de taille des particules est bimodale: les fractions sable fin (63-200 µm) et argile (< 2 µ) prédominent (Fig. 7). Cette courbe est comparable à celle de cendres du Popocatepetl altérées dans un sol (Fig. 6a). Miehlich (1991) l'interprète comme l'effet de l'altération, non d'un tri par le transport aérien. Il montre aussi (Fig. 6b) que cet effet se poursuit dans la séquence des "tobas" 1T, 2T, 3T. Ceci se traduit par l'accroissement de la fraction argile aux dépens des sables fins. Nous observons une évolution semblable de H vers T1, T2, et T3. Il y a en fait 3 modes: sable fin, limon fin (6 - 20 ~m) et argile. Le limon fin se développe par fragmentation des sables; l'argile est le produit d'altération des verres.

a/ de cendres 1C-3CD - b/ de "toba" 1T-3T

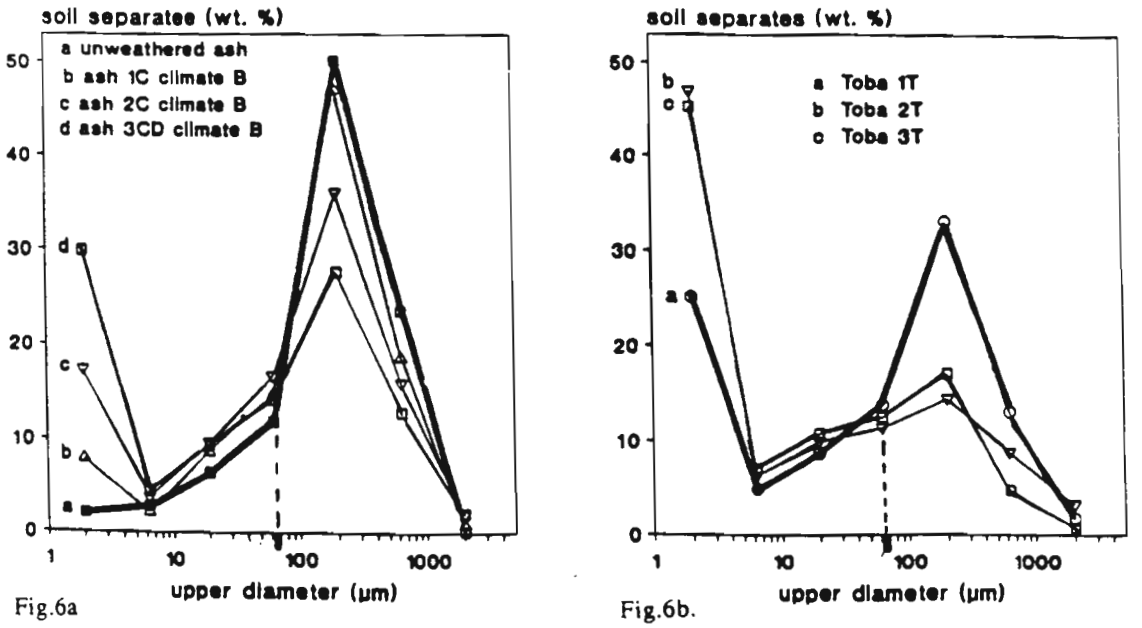
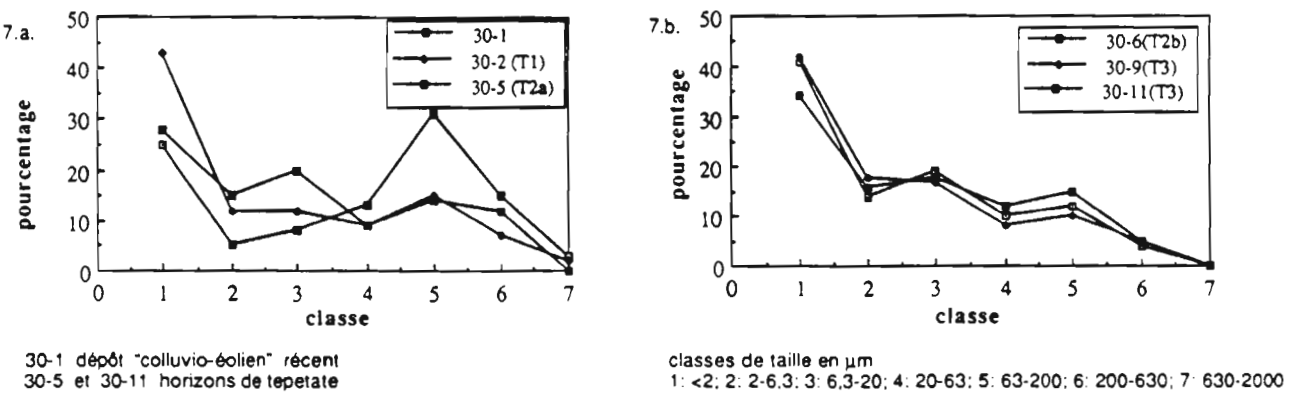


Fig.6a Fig.6b.

Fig.6. Distribution de taille des particules, de cendres et de "toba" (Miehlich, 1991).



30-1 dépôt "colluvio-éolien" récent
30-5 et 30-11 horizons de tepetate

classes de taille en µm
1: <2; 2: 2-6,3; 3: 6,3-20; 4: 20-63; 5: 63-200; 6: 200-630; 7: 630-2000

Fig. 7. Distribution de taille des particules, d'un sol à tepetate (P.30, Texcoco).

Mais il n'apparaît pas de limon grossier (20-63 µm), qui habituellement caractérise un loess (Pye, 1987). Ces dépôts sont donc des retombées de cendres volcaniques, non des loess. En outre dans chaque série de dépôt, l'horizon B de sol présente un peu plus d'argile et moins de sables que le tepetate sous-jacent; celui-ci est moins altéré et considéré comme horizon C.

3.3. Produits d'altération: argiles, silice, calcaire, oxydes de fer.

a. Dans les profils de la partie moyenne des piémonts (P30 - Tlalpan), on observe une succession dans la composition des argiles: - en H et T1, argiles mal cristallisées et un peu d'halloysite - en T2a, un interstratifié à composante de smectite et un peu d'halloysite - en T2b, 80 % de smectite bien cristallisée et 20 % d'halloysite - en T3a, 80 % d'halloysite et 20 % de smectite mal cristallisée - en T3b, 90 à 100 % d'halloysite et des traces d'interstratifié indéterminé. Un minéral siliceux, de la cristobalite, est présent en petite quantité (5 à 10 %) dans la série T2; il augmente (15 à 20 %) à la base de la série T3. De la calcite est seulement présente localement (nodules, filaments) dans la série T2b, dans le paléo-vertisol. Des oxydes de fer et de manganèse mal cristallisés revêtent les argiles dans la série T3, ou se concentrent dans des nodules ou revêtements à la base de T3. On remarque que la composition des argiles est la même dans l'horizon B de sol et dans le tepetate, dans chaque série de dépôts.

b. Dans les profils de la partie amont des piémonts (P37), en climat plus humide, l'halloysite est prédominante dans l'ensemble des séries T2 et T3. Cependant de la cristobalite est présente dans la majeure partie du profil. Les oxydes de fer sont mal cristallisés. Il n'y a pas formation de calcite.

c. La composition chimique globale du produit d'altération met en évidence un fort excès de silice en comparaison de la composition des argiles, surtout dans la série T3 et dans le tepetate "t3", à la base du profil P30. Cet excès est très réduit dans la série T2b, à caractère de vertisol. Il est encore important dans l'ensemble du profil amont P37. Cela correspond à la présence importante de silice libre (cristobalite, opale). Donc il est probable que les produits d'altération, quel que soit le type d'argile formé, ont subi une silicification.

3.4. Micromorphologie: traits du matériau et traits pédologiques.

L'observation microscopique en lame-mince des divers horizons des séries T2 et T3 montre des traits hérités du matériau originel et d'autres conséquents de la pédogénèse.

a. Traits hérités du matériau.

a.1. Le "squelette" sableux est formé de fragments anguleux de phénocristaux, lapilli de lave et de ponce, et de verres. Leur distribution non classée, dite "porphyrique" indique des retombées aériennes de cendres ou de "nuées ardentes" plutôt qu'un processus de redistribution par le vent ou par l'eau. Il n'y a pas, ou rarement, de litage indiquant un processus sédimentaire classique. Dans les horizons des séries T2a et T2b, les cristaux de quartz restent limpides, sans signe d'usure par le vent ou par l'eau; certains phénocristaux restent entourés de leur gangue vitreuse. A la base de la série T3, certains cristaux, bien que demeurant anguleux, ont des faces légèrement dépolies; mais il s'agit d'une corrosion chimique, normale dans les sols tropicaux; les lapillis sont altérés et les verres plus rares et pour la plupart altérés.

a.2. La matrice des horizons de tepetate t2a et t3 paraît massive et peu fragmentée, comme c'est le cas d'une altération sans modification structurale d'un tuf ou d'une cinérite (tuf fin, de cendre fine consolidée par un ciment). Une coupe dans le tepetate t2a, de couleur gris-clair, montre de bas en haut, la transition d'une structure massive à une structure divisée par des fissures planaires verticales (effet de retrait) et pénétrée de plus en plus par des tubes biologiques, au contact du sol sus-jacent. Le tepeptate t2a, partiellement altéré en argile, est donc un horizon C.Le tepetate t3, de couleur brune, montre une structure semblable, massive, finement recoupée de fissures verticales et perforée de tubes biologiques; cette structure semble héritée du tuf initial et seulement "recoupée" par la pédogenèse. Cependant la matrice brun-rougeâtre et "pointillée", peu biréfringeante, manifeste une altération in situ en argile et une redistribution du fer liée à la pédogenèse; mais avec peu de redistribution plasmique, comme c'est le cas d'un horizon C à structure conservée dans un sol fersiallitique tropical.

Au contraire, le tepetate t2b, de couleur gris-clair, montre une fragmentation polyédrique grossière de la matrice et une réorganisation plasmique réticulée qui est caractéristique d'un vertisol; cet horizon friable ne devrait pas être appelé tepetate.

Selon Hessmann (1992, rapport annexe), dans chaque série de dépôt, la part de la matrice est plus importante dans l'horizon B de sol que dans le tepetate; c'est évidemment le contraire pour le squelette. Ainsi à Tlalpan, dans la série T2a, la matrice occupe 78 % du volume de l'horizon B et seulement 58 % dans le tepetate "t2a"; dans la série T3, 72 % en B et 65 % dans le tepetate "t3".

b. Traits pédologiques

Les horizons de paléosol et de tepetate de chaque série de dépôt abondent en traits pédologiques, signes d'une transformation du matériau originel durant la formation du sol.

b.1. La matrice est fragmentée, surtout dans les horizons B, par des fissures dues au processus saisonnier de gonflement-retrait. Elle s'organise en agrégats grossiers, prismatiques ou polyédriques; il y a "réorganisation plasmique" des argiles et oxydes de fer (biréfringence, striation, ponctuation). Ce processus est très net dans les "horizons vertiques", moindre dans les horizons "cambiques", très atténué dans les tepetates typiques (t2a et t3).

b.2. L'activité biologique est toujours bien marquée par: des vides biologiques (tubes racinaires et cavités), remplis de boulettes fécales (d'Arthropodes), restes de racines, phytolites silicifiés. Dans les tepetates t2a et t3, les tubes biologiques recoupent la structure massive du matériau.

b.3. Une redistribution de matière est toujours présente sous forme de revêtements dans les vides ou de nodules dans la matrice:

- revêtements d'argile dans les vides biologiques et les fissures, sous forme d'un remplissage d'argilane jaune-limpide dans les cavités, ou d'un dépôt orienté d'argilane micro-laminé sur les parois du vide, marque d'illuviation périodique. Ces revêtements laminés d'argile sont souvent recouverts d'oxydes de fer et manganèse dans les horizons bnun-rougeâtres, ou parfois intercalés de dépôts de limon.

- redistribution des oxydes de fer et de manganèse dans la matrice en nodules diffus ou en ponctuation, dans les horizons de la série T3.

- concentrations éparses de calcite dans les horizons vertiques de la série T2b, en nodules friables de 'micrite' dans la matrice, ou en filaments (mycelium) dans les vides.

- des silicifications sont présentes dans la plupart des horizons, surtout des séries T2a et T3; mais difficiles à mettre en évidence, car associées intimement aux dépôts d'argile; dans les vides leur formation est pédologique, tandis que dans la matrice elle pourrait être aussi antérieure à la pédogenèse.

3.5. Nature et genèse du ciment

a. Les revêtements et remplissages des vides, essentiellement d'argile accompagnée de silice et d'oxydes de fer et de manganèse, ne sont pas particuliers aux tepetates. Cependant Hessmann (1992) observe que le remplissage des macropores est toujours un peu plus développé dans les horizons de tepetate t2a et surtout t3, que dans les horizons B susjacents; par exemple dans le profil de Tlapan: 25 % de remplissage dans l'horizon B et 54 % dans le tepetate de la série T2a; 47 % de remplissage dans l'horizon B et 62 % dans le tepetate de la série T3. Ce fait a été confirmé par Oleschko (1992). Donc la conductivité hydraulique est réduite dans les tepetates, provoquant une accumulation de matière. Ceci est confirmé par une diminution de la macroporosité et de la conductivité et un léger accroissement de densité apparente, par rapport à l'horizon B de sol au dessus (Werner 1992; Oleschko 1992).

b. La nature du ciment est encore controversée. Les revêtements argileux ne sont probablement pas (malgré leur abondance) le ciment d'un tepetate de type fragipan. Car l'argile est plastique et gonflante; mais elle permet l'accumulation d'autres matériaux, notamment de silice et d'oxydes de fer, dont l'induration après déshydratation provoque une cimentation (Flach, Nettleton et Chadwick, 1991-92). Le rôle de la silice est connu dans les duripans (Soil Taxonomy 1975); la présence de gels de silice pourrait expliquer le comportement de fragipan. C'est pourquoi nous avons fait une analyse approfondie des formes et de la localisation de la silice dans les horizons superposés de sol et de tepetate.

c. Formes et localisation de silice "libre".

L'existence de silice "libre" est déjà apparue en comparant les compositions chimique et minéralogique du produit global d'altération, notamment sous forme de cristobalite.

c.1. La microscopie optique à contraste de phase (Hessmann 1992), montre de l'opale et sa localisation: en revêtement et intercalation dans les argilanes microlaminés des vides biologiques, ou autour de certains minéraux du squelette et lapilli de lave dans la matrice, et également dans des phytolites siliceux.

c.2. La microscopie électronique à balayage et la micro-analyse chimique sur lame mince (Hessmann 92, Hidalgo 91, Oleschko 92) a confirmé l'existence de ces concentrations de silice: 1° dans les fissures et les vides biologiques, notamment entre les lamelles d'argilanes microlaminés; la silice est plus abondante vers le centre du vide; c'est donc un produit de la pédogenèse. 2° dans la matrice, à part quelques films de silice autour de certains grains du squelette (plagioclases, lapilli), la concentration de silice est diffuse, intimement mêlée à l'argile et aux fines particules de verre altéré.

Le plasma matriciel des horizons B et C (tepetate) des séries T2a et T3, est plus siliceux et riche en cations basiques que les argilanes en revêtement dans les vides; c'est un mélange d'argile de silice et de verres altérés. La question est de savoir si ce produit est dû seulement à la pédogenèse ou si une première altération hydromagmatique s'est produite au moment de la mise en place du dépôt volcanique, suivie de la pédogenèse.

Au contraire, dans les horizons du sol vertique de la série T2b, il n'y a pas de différence significative entre la composition de la matrice et des argilanes, qui est proche de celle de l'argile (smectite), donc non ou peu silicifiée.

On remarque en outre que les silicifications sont plus évidentes à la base de la série T3, où les caractères du tepetate (t3) sont les plus affirmés; mais ils ne sont pas plus nets dans le tepetate que dans l'horizon B du sol au-dessus.

c.3. L'analyse chimique sélective par dissolution séquentielle (par NaOH 0,5 N) des formes de la silice montre qu'il n'y a pas ou seulement des traces d'allophane, mais toujours une quantité notable de silice libre (non liée à l'aluminium des argiles). Une faible part (0,3 à 0,5 % du sol) est sous forme de gel très soluble; la majeure partie (1 à 2 % du sol) est un produit plus stable, composé probablement d'opale. Ce produit plus stable est plus abondant dans le tepetate t3 que dans l'horizon B de sol au dessus; c'est un signe probable de l'induration du tepetate.

Une estimation du taux probable de silice libre (gel, opale, cristobalite a été tentée à partir de l'analyse chimique globale du produit d'altération (extrait triacide) et de la composition des minéraux argileux. Ce taux serait de 5 a 10 % dans les horizons de la série T2a, moins de 5 % en T2b, de 10 à 20 % dans la série T3, dont 15 à 20 % dans le tepetate t3.

c.4. L'origine de la silice est à rechercher dans l'altération des verres rhyolitiques sodiques. En présence de sodium, la dissolution de la silice est très intense, fournissant des solutions riches en cet élément. En solution moyennement concentrée, la silice contribue à la formation des argiles. Mais en solution concentrée, elle précipite sous forme de gel, puis recristallise en opale ou en cristobalite. Cette formation a pu se produire au moment du dépôt, par un processus d'altération hydromagmatique des verres et (ou) ensuite par hydrolyse durant la pédogenèse. Dans ce cas elle est dépendante du régime de drainage; un régime "ustic" favorise successivement la dissolution de la silice et la formation d'argile, puis sa concentration et la précipitation de gels de silice; ensuite, une forte déshydratation entraîne la cristallisation sous une forme plus stable d'opale ou de cristobalite. La formation de phytolites, organismes végétaux silicifiés, contribue aussi au stockage puis à la fourniture additionnelle de silice.

3.6. Genèse du tepetate

L'origine d'un tepetate reste controversée, quant au mode de formation du matériau parental et quant au processus de cimentation.

a. Mode de dépôt du matériau originel: Tous admettent à l'origine des éruptions de cendres volcaniques. Mais pour certains les cendres ont été redistribuées par le vent, à la manière d'un lœss (Heine et Schönhals 1973; Miehlich 1984; Hessmann 1992; Oleschko 1992); cela pour trois propriétés principales: une distribution granulométrique bimodale, un squelette minéral en éclats anguleux, des phytolites siliceux dans l'ensemble du matériau.

Nous avons vu que ce matériau ne comporte pas un mode bien développé de limon grossier qui caractérise un lœss, et que sa distribution bimodale en sable et argile est due à une altération météorique dans un sol. Le squelette minéral brisé en éclats anguleux caractérise un produit pyroclastique. Des phytolites siliceux se rencontrent toujours dans les sols jeunes de cendres volcaniques (andosols) aussi bien en climat humide sous forêt dense qu'en climat "xérique" sous prairie (Quantin 1991). Il n'y a pas de trait sédimentaire évident, sauf cas particuliers. Il s'agit donc très probablement de retombées de cendres volcaniques fines, non ou peu remaniées par le vent et par l'eau après leur dépôt.

b. Processus de cimentation: La consolidation du matériau originel est-elle antérieure ou conséquente de la pédogenèse? Dans les tepetates typiques (t2a et t3), l'abondance des traits pédologiques d'accumulation d'argile, d'oxydes de fer et de silice, corrélée à un régime climatique "ustic", est en faveur de la pédogenèse. Cependant ces traits sont observés autant dans l'horizon B du sol que dans le tepetate; ils ne suffisent donc pas à expliquer le caractère massif et consolidé du tepetate.

Le tepetate a conservé en partie la structure massive d'un tuf fin; il est toujours moins fragmenté et altéré que le sol situé au dessus, bien qu'il dérive de la même série pyroclastique; c'est un horizon C dans un matériau consolidé. Il y a toujours un couple: horizon B de sol meuble, sur horizon C de tepetate. La consolidation n'est probablement pas la conséquence de la pédogenèse. Au contraire, la compacité du tuf originel a réduit la vitesse d'altération et provoqué les accumulations d'argile, de silice et d'oxydes de fer, voire de calcaire en bas de séquence. Une pédogenèse en régime climatique "ustic" favorise les accumulations de matière et renforce ainsi la consolidation du tuf originel. Silice et oxydes de fer qui recouvrent les argiles, contribuent après déshydratation à l'induration de ces matériaux.

Pour expliquer cette alternance d'un matériau consolidé et d'un matériau meuble, nous pensons que les séries de dépôts pyroclastiques proviennent d'éruptions phéato-pliniennes. Celles-ci comportent successivement un dépôt de flux (base surge) et des retombées de cendres fines, (Fisher et Schminck 1984). Ce dépôt de flux aurait été consolidé peu après le dépôt par une altération hydromagmatique des particules fines de verre qui en constituent la matrice.

4. Propriétés des tepetates de référence

Les propriétés de tepetates de référence ont été analysées pour servir de base aux études expérimentales. 18 échantillons de 6 types de tepetate ont été choisis pour cela par Peña et Zebrowski, selon leur appartenance aux séries t2, t3 ou ti (non déterminée) et leur teneur en calcaire.

type	0,2 % $CaCO_3$	2-3 % $CaCO_3$ friable	5-15 % $CaCO_3$ dur
t2	3 éch.	-	1 éch.
t3	5 éch.	1 éch.	1 éch.
ti	-	-	1 éch.

Les résultats sont publiés dans les Actes du Symposium "Suelos volcanicos endurecidos" (1992, ~~impression en cours~~), par: Peña et Zebrowski; Arias et Miranda; Etchevers, Lopez et al. D'autres études de tepetates des types t2 et t3 non ou peu calcaires de la Vallée de Mexico (Hidalgo 1991; Hidalgo, Quantin et Zebrowski 1992), ou de Tlaxcala (Werner 1992, en annexe) complètent ces données.

4.1. Propriétés physiques

a. Couleur, minéraux argileux et présence de calcaire

-Série t2: gris à brun-jaune-clair; smectites, argiles interstratifiées et opale
-Série t3: brun à brun-rouge; halloysite; oxydes de fer et opale.

La distinction des tepetates des séries t2 ou t3 est justifiée. Mais la présence de calcaire n'est pas particulière aux séries t2 ou t3. Elle apparaît aussi dans des tufs grossiers ou brèches d'autres séries volcaniques antérieures. Elle n'est souvent pas évidente dans les tepetates t2 ou t3, bien que l'analyse chimique en révèle des traces (1 à 2 %), ou localisée en formes friables (revêtements, nodules). La distinction des tepetates "non calcaires" ou "modérément calcaires", nous allons le voir, n'est pas justifiée par des propriétés physiques ou chimiques bien distinctes. Mais les tepetates à encroûtement calcaire dur ont un comportement bien particulier.

b. Structure

Tous les tepetates, non ou "modérément" calcaires ont une structure massive, faiblement fragmentée par des fentes de retrait en un réseau prismatique ou polyédrique grossier. Les tepetates encroûtés de calcaire dur ont souvent une structure lamellaire de revêtements calcaires.

c. Texture

Les résultats de l'analyse granulométrique ne sont pas homogènes dans chaque série. Ils diffèrent selon la méthode utilisée (Bouyoucos au C.P.M., Sédigraph à l'ORSTOM); ou selon l'induration des matériaux; ainsi la granulométrie des tepetates encroûtés de calcaire révèle peu d'argile, alors que leurs propriétés de rétention d'eau et d'échange cationique en indiquent autant que dans les autres tepetates.

Tous les tepetates non ou peu calcaires contiennent au moins 25 % d'argile (< 2 µm); la teneur en argile varie de 25 à 54 %. Mais il n'y a pas de texture spécifique de chaque série t2 ou t3; chacune présente deux groupes de texture.

Type de tepetate	Type de texture	Argile %	Limon %	Sable %
non-peu-calcaire t2 1	Sable argileux-limoneux	25-34	13-24	50-60
2	Argile limoneuse	36-42	34-42	22-30
t3 1	Sable argilo-limoneux	31-40	11-16	48-53
2	Argile limoneuse	46-54	22-25	24-29
modérément calcaire t3	Sable limoneux	8-15	12-22	68-75
calcaire encroûté t2,t3,ti	Sable limoneux	7-9	9-12	80-82

d. Dureté, résistance

Des mesures du comportement des tepetates ont été faites suivant leur état: sec à l'air, ou différents degrés d'humidité (saturation, capacité au champ, point de flétrissement). Il s'agit de la dureté en surface (pénétromètre conique) ou de la résistance à la compression ou à la déformation (module de rupture).

1° Les tepetates non ou peu calcaires des séries t2 et t3 ont un comportement de "fragipan": à l'état sec, ils sont peu durs à la pénétration (< 20 Kg/ cm^2) et à la compression (< 10 Kg/ cm^2) et friables. A l'état humide ils sont plastiques et peu résistants et se déforment sans éclat.

2° Les tepetates encroûtés de calcaire dur, de toutes séries, ont un comportement de "duripan", autant à l'état sec qu'à l'état humide: très durs à la pénétration (100-200 Kg/cm^2) et à la compression (40-60 Kg/cm^2); ils éclatent brusquement en éclats.

3° Les tepetates "modérément calcaires", ont un comportement intermédiaire, plutôt proche de celui d'un fragipan: à l'état sec assez dur à la pénétration (20-50 Kg/cm^2) et à la compression (15-25 Kg/cm^2) et friable; à l'état humide, moins dur, plus friable ou plus plastique.

e. Rétraction, gonflement

Cette mesure sur cylindre a été faite à l'ORSTOM, de l'état saturé en eau à l'état sec jusqu'au retrait maximum. La rétraction est d'au moins 15 % du volume dans le cas des tepetates de la série t2, constitués d'argile de type smectites, et 5 % dans ceux de la série t3, constitués d'halloysite et d'oxydes de fer. On observe qu'au moins 80 % du retrait concerne le volume poral des micropores du "fond matriciel" c'est à dire de l'espace interparticulaire (< 0,2 µm).

f. Dissolution du ciment et désagrégation

Les tepetates ont été soumis à trois tests de comportement, dans l'eau distillée, HCl 1 N, NaOH 1 N.

- Les tepetates t2 et t3, non ou peu calcaires, à comportement de fragipan, se désagrègent partiellement ou presque totalement dans l'eau (19 à 67 % des agrégats).

- Les tepetates "modérément calcaires" se désagrègent partiellement dans HCl 1 N; après disparition du ciment calcaire, ils se comportent en fragipan.

- Les tepetates à encroûtement calcaire dur demeurent stables après traitement HCl 1 N ou NaOH 1 N (mais il aurait fallu appliquer successivement ces deux réactifs, car un ciment siliceux s'ajoute probablement au ciment calcaire). Ces tepetates ont un comportement de duripan.

g. Conductivité hydraulique

Cette mesure a été faite en laboratoire sur des cylindres de tepetate; mais après saturation en eau et gonflement, les fentes de retrait et la porosité grossière sont en majeure partie fermés. De ce fait, la conductivité hydraulique est toujours "très lente" (0,3 à 0,5 mm/heure) dans les fragipans, non ou peu calcaires. Cependant, elle est plus élevée (2 à 10 mm/heure) et qualifiée de "lente" dans les tepetates à encroûtement calcaire; l'architecture rigide du ciment calcaire maintient une porosité grossière.

Il est certain que la perméabilité est beaucoup plus importante (10 mm/heure) au champ, du fait des fentes de retrait; mais elle se réduit dans les fragipans au cours de la saison des pluies, du fait de leur gonflement.

h. Densité, porosité, capacités en air et en eau

Les mesures de densité réelle faites au CPM (moyenne 2,3) sont bien inférieures à la réalité. Mais celles obtenues dans de meilleures conditions par Werner (1992) et par l'ORSTOM, sont comprises entre 2,5 et 2,7 et la moyenne est de 2,63. Finalement une valeur moyenne de 2,65 (celle habituellement utilisée pour les sols sablo-argileux) a été retenue pour le calcul de la porosité totale.
Les mesures de densité apparente, obtenues par plusieurs méthodes, sont plus fiables. Sur des échantillons secs (humidité < pF 2,5), la densité apparente des tepetates varie de 1,2 à 1,6. Les valeurs les plus fréquentes sont entre 1,35 et 1,5 et la moyenne est proche de 1,45. A partir de ces valeurs, la porosité totale calculée varie de 40 à 55 %, et la valeur moyenne est de 45%, (voir le tableau ci-dessous). Ces valeurs ne sont pas significativement différentes dans les deux séries T2 et T3 de matériaux, ni dans les tepetates à encroûtement calcaire dur. Mais en comparaison la porosité totale est un peu supérieure (de 2 à 7 %) dans l'horizon de sol d'une même série de matériau à celle du tepetate sous-jacent.

Il est important de noter que le tepetate de type fragipan, saturé en eau, a une densité apparente plus faible (1,2 à 1,5 - moyenne 1,3) et en conséquence une porosité totale plus grande (48 à 56 % - moyenne 51 %); soit une augmentation relative moyenne de 13 %. Ainsi, du fait du gonflement le volume d'eau mesuré à saturation peut être supérieur à la porosité totale calculée sur tepetate sec).

Tableau des valeurs de densité apparente et de porosité calculée (vol. %)

Série tepetate	Mesures sur tepetate sec(pF 2,5)						Tepetate à saturation Pt %
	Da g/cc	Pt %	P< 10 µm	Pf< 0,2 µm	Pm 0,2-10 µm	Pg> 10 µm	
T2 (1)	1,35-1,45	49-45	42-40	30-26	16-12	7-5	55-53
T2 (2)	1,36-1,41	48-46	44-36	33-29	11-7	9-4	
T3 (1)	1,2-1,5	56-43	56-41	41-27	15-12	2-0	64-45
T3 (2)	1,48-1,6	45-40	38-29	30-9	20-6	9-3	
T3K (1)	1,55	41	37	27	10	4	35
TK (1)	1,35-1,45	49-45	43-35	34-27	12-7	12-2	42-39

(1) Tepetates de la Vallée de Mexico, mesures CPM et ORSTOM
(2) Tepetates de Tlaxcala, mesures U.A.T-U.G

Da: densité apparente. Pt: porosité totale calculée

Pf: H_2O à pF 2,5 - Pg: H_2O à pF 4,2 - Pm: H_2O pF 2,5-pF 4,2, en volume.
T3K, à calcaire friable; TK à encroûtement calcaire dur

On voit que la porosité totale est toujours supérieure à 40 %. Mais la macroporosité (> 10 µm) est inférieure à 10 % du volume; elle est même souvent inférieure à 5 %, surtout dans les tepetates de la série T3. Ceci signifie un drainage ralenti et une trop faible capacité à l'air pour un bon développement des racines des végétaux; d'où la stérilité de ces matériaux.Cependant la microporosité (< 10 µm) globale est toujours importante et supérieure ou égale à 30 %, même dans les tepetates encroûtés de calcaire. Le volume de la porosité moyenne (10-0,2 µm), qui correspond à la "réserve d'eau utile" pour les plantes, est souvent supérieure ou égale à 10 % du volume; cette réserve est normalement suffisante pour un bon développement des plantes. Cependant la porosité fine (< 0,2 µm), interparticulaire dans la matrice fine du tepetate, représente plus de 25 % du volume; l'eau fortement retenue dans ses pores n'est pas accessible par la plante. En outre, ce volume poral microscopique augmente très fortement pendant la réhumectation (+ 15 % du volume total saturé), provoquant ainsi le gonflement des tepetates de type fragipan et la réduction de l'espace des macropores. Ceci ne se produit pas dans les tepetates à encroûtement de calcaire dur.

4.2. Propriétés chimiques

Aux 12 échantillons utilisés pour l'analyse physique se sont ajoutés 3 échantillons de tepetate peu calcaire des séries t3 ou ti. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (m, valeur moyenne):

Série Tepe-tate	pH (eau)	$CaCO_3$ %	C ‰	N ‰	Ca	Mg	K	Na	SB	CEC	B sat. %	P. ass. ppm
					Bases échangeables mé/100 g							
T2 m	7,3-7,8 7,5	1,4-1,8 1,6	0,15	0,04	7-9 7,7	6,1-6,3 6,2	1-1,3 1,2	0,6-1,2 0,9	15-17 16	18-21 20	75-82 80	1,4-3 2,3
T3 m	7,6-8,2 7,8	4,9-2,5 2,2	0,14	0,025	7-14 12,3	7-12 8,4	1-3 2,1	0,5-4 1,6	16-31 24	17-41 30	60-100 80	2,5-2,8 2,6
Ti m	8,6-8,9 8,7	2,5	0,14	0,025	18,8	4,5-5,4 5,0	0,6-1 0,8	0,6-1 0,8	25*	21	100	-
TK m	8,3-8,9 8,7	5-14 8	0,22	0,04	41-45 43,7*	8-12 10,3	1,2-2,6 2,0	1-1,3 1,2	57*	26-34 29	100	2,0

TK tepetate à encroûtement calcaire; * excès de Ca soluble

a. pH (eau). $CaCO_3$

Le pH est toujours un peu alcalin, car il y a au moins 1 % de calcaire, même si ce n'est pas toujours évident sur le terrain; donc la capacité d'échange cationique est toujours saturée.

Les tepetates t2 et t3 de type fragipan "non ou peu calcaire" ont un pH inférieur ou égal à 8 et moins de 2,5 % de calcaire. Les tepetates à encroûtement calcaire dur, ont un pH supérieur à 8,5 et plus de 5 % de calcaire.

b. Carbone, Azote

Tous les tepetates ne contiennent que des traces de carbone (0,1-0,3 ‰) et d'azote (0,02-0,04 ‰). De plus ce carbone est fortement minéralisé (C/N ~ 5). Donc il n'y a quasiment pas d'humus, ni d'azote disponible pour les plantes.

c. Bases échangeables, C.E.C

Les teneurs en bases échangeables sont toujours élevées, surtout en Calcium et Magnésium; celles en Potassium sont importantes et le plus souvent supérieures ou égales à 1 me/ 100 g. Ces matériaux peuvent fournir largement la plante en Ca, Mg et K.

Les valeurs de capacité d'échange cationique (CEC) sont un peu surestimées; la CEC effective est au plus égale à la somme des bases dans le cas des tepetates peu calcaires. Elle est d'environ 15 me/100 g dans ceux de la série T2; de 15 à 25 mé/100 g dans ceux de la série T3 et probablement inférieure ou égale à 25 mé/100 g dans les tepetates à encroûtement calcaire. Dans ces derniers le calcium soluble provoque une sur-saturation de la CEC; mais cette valeur est au moins de 15 me/100 g, dans tous les tepetates, en l'absence d'acides humiques.

A noter la présence relativement importante de sodium (1 me/100 g, > 5 % de CEC) elle pourrait justifier une certaine dispersion et mobilité des argiles, malgré l'abondance du calcium (Robert et Tessier, 1992).

d. Réserves et disponibilité en Potassium et en Phosphore

21 échantillons de tepetate t3, 4 de t2 et 3 de sols, analysés par J. Etchevers, pour déterminer la disponibilité en K et P, ont foumi les résultats suivants:

	Série T3				Série 2		Sol
	Hueyotlipan		San Pablo		Hueyotlipan		
	C	NC	C	NC	C	NC	C
K tot ‰	2,4	2,5	2,2	2,3	2,4	2,8	1,9
K éch. ‰	0,52	0,63	0,35	0,58	0,60	0,80	0,36
P tot. ppm	510	420	580	380	270	230	740
P Olsen ppm	6,4	3,0	4,8	2,4	4,2	2,7	30,4

C tepetate cultivé; NC tepetate non cultivé, initial

Les réserves minérales en potassium sont très importantes, (2 à 3 ‰), ainsi que leur disponibilité sous forme échangeable (0,6 à 0,8 ‰), dans tous les tepetates.

Cette disponibilité diminue légèrement dans les tepetates cultivés sans apport de fertilisant potassique.

Les réserves de phosphore minéral sont modérées (~ 400 ppm) dans les tepetates t3, ou faibles (~ 200 ppm) dans les tepetates t2; leur disponibilité sous forme "assimilable" par la plante, est très faible (2-3 ppm) dans tous les tepetates. Ces valeurs augmentent légèrement dans les tepetates cultivés avec apport de fertilisant phosphaté. En comparaison, elles sont bien plus élevées dans les sols cultivés. Tous les tepetates ont donc une carence sévère en phosphore minéral (et organique).

III EROSION et CONSERVATION des SOLS et TEPETATES

Cette étude a été faite en deux régions distinctes, l'une près de Texcoco par l'équipe CPM-ORSTOM, l'autre au Nord de Tlaxcala par l'équipe Univ. Giessen - Univ. Tlaxcala.

A. REGION DE TEXCOCO; EXPERIMENTATION SUR TEPETATE T3 ET SUR SOL; STATION DE SAN MIGUEL TLAIXPAN.

Les résultats de caractérisation et de mesure ont été présentés par Arias et Miranda (1992), Jérome (et collaboration de Janeau, 1992), Martinez, Oleschko et Arias (1991). Le tepetate est de type t3.

1. Propriétés initiales du tepetate et du sol.

Il s'agit de l'analyse d'échantillons du profil 30: Sol "S" = horizon 1; tepetate t3 "T" = horizon 11.

1.1. Propriétés physiques.

	Granulométrie					Da	Ptot %	Humidité vol. %			K mm/h	Dureté kg/cm²	
	A	Lf	Lg	Sf	Sg			CC	PF	RU		Hum.	Sec
S	25	13	13	31	18	1,56	41,1	33,8	20	13,8	-	-	
T	34	34	12	15	5	1,47	44,5	44,4	32,3	12,1	0,25	5	16

Da: densité apparente - Ptot: porosité totale - CC: capacité au champ - PF: point de flétrissement - RU: eau utile - K: conductivité hydraulique.

Le tepetate est plus argileux, moins dense et plus poreux que le sol. Il retient plus d'eau, mais sa réserve utile est un peu inférieure et sa porosité grossière est presque nulle, sa conductivité hydraulique très lente. Cependant il est friable. Après fragmentation sa porosité totale atteint 53 à 58%, permettant une macroporosité suffisante et une vitesse d'infiltration d'au moins 50 mm/heure.

1.2 Propriétés chimiques.

	pH	Bases échangeables me/100g							Mat. Org. ‰		P ppm	
		Ca	Mg	K	Na	SB	CEC*	S%	C	N	Pt	Pas
S	6,4	0,8	3,6	0,4	0,15	4,95	12,6	39	7,1	0,74	600	30
T	7,6	6,7	7,8	1,5	0,9	16,2	19	88	1,7	0,43	500	3

S%: Saturation en bases échangeables - Pt: Phosphore total - Pas: P assimilable - Sol: S - tepetate: T.

Le tepetate est plus alcalin et contient plus de bases échangeables, surtout Ca et K, que le sol; il est saturé * en bases (* les valeurs de CEC sont surestimées). Mais il est déficient en azote et en phosphore assimilable. Cette déficience sera palliée par une fertilisation de 120 unités de N et 80 unités de P/ha, sur les essais de tepetate cultivés en maïs.

2. Détermination expérimentale de l'agrégat optimum de tepetate.

L'agrégat optimum obtenu par fragmentation du tepetate est celui qui fournit les meilleures propriétés physiques pour le développement des plantes: réserve utile en eau, porosité à l'air et vitesse d'infiltration suffisantes; tout en maintenant une bonne stabilité structurale.

2.1. Expérimentation au laboratoire.

Une méthode de fragmentation contrôlée (Martinez, Oleschko et Arias, 1991), a permis de tester 7 classes de taille d'agrégat (de 40 à 0,5 mm): stabilité à une pluie simulée, capacité de rétention en eau, vitesse d'infiltration, porosité, perte de matière par ruissellement et par effet "splash", fonte des agrégats sous pluie simulée (méthode de Dexter, 1976), etc... - Tous les agrégats supérieurs à 2 mm sont stables.

Finalement, ce sont les fragments de 3,4 à 2,4 mm de diamètre qui constituent l'agrégat optimum: stabilité de 98% des agrégats; vitesse d'infiltration maximum, sans effet de colmatage; capacité de rétention en eau élevée (= 29% en poids et 39% en volume), comparable à celle d'un sol argilo-limoneux. Une fragmentation plus fine serait dangereuse pour la stabilité des agrégats.

2.2. Expérimentation aux champ.

La fragmentation du tepetate sur les parcelles expérimentales a été obtenue successivement par un sous-solage profond (h = 55 cm), plusieurs labours et pulvérisages (disques) de manière à obtenir un agrégat moyen de 3-4 mm. Le résultat final a été le suivant (en mm):

D 10	D 50	D 60	D 60 /10
0,2	2,9-4,3	4,5-9,3	25-42

La médiane recherchée est satisfaisante; mais il n'est pas possible d'obtenir une fraction homogène et il s'est formé une part importante de fraction fine (< 0,5 mm), instable et susceptible de colmater la porosité.

3. Parcelles expérimentales de mesure de l'érosion, protocole et méthodes.

Les parcelles sont situées à San Miguel Tlaixpan, sur le piémont ouest de la Sierra du Tlaloc-Telapon, à 2560 m d'altitude, et sur une pente d'environ 8-9%. Leurs dimensions sont normalement de 22 m de long par 2 m de large, selon le modèle de Wischmeier.

En 1990, 6 parcelles, seulement sur tepetate (t3) à nu, sans plante cultivée, mais avec divers traitements. 1: Témoin nu; 2: sous-solage; 3, 4, 5 et 6: sous-solage et fragmentation par labour et pulvérisage; mais 3 et 4 sur 22 m de long, 5 sur 10 m et 6 sur 5 m de long pour tester l'effet longueur de pente. Le sol restant nu, on peut comparer les effets du sous-solage, de la fragmentation du tepetate et de la longueur de la pente. Mais les mesures n'ont commencé que le 7 août 1990 et n'ont duré que 2 mois (août-septembre) en fin de saison des pluies.

En 1991, 7 parcelles, dont 5 sur tepetate et 2 sur sol non érodé, avec culture de maïs (var. Criollo, sol billonné suivant courbes isohypses):

a. sur tepetate: 1: Témoin tepetate nu; 2: Sous-solé (en 1990), nu; 3: sous-solé (en 1990) et labour (1990-1991), billonné, nu; 4 et 5: Idem 3 + culture de maïs.

b. sur sol: 7: Sol, labour + billon, nu; 8: Idem + culture de maïs.

Ainsi, on peut comparer sol et tepetate et l'effet de la culture de maïs. Les observations en 1991 ont duré du 5.05 au 24.10, pendant toute la saison des pluies.

Les mesures concernent l'intensité des pluies (pluviographe), l'intensité du ruissellement (limnigraphe), la perte en terre (sédiment dans la cuve). En outre, des mesures ont été faites sur l'espace entre les parcelles soumis au même traitement, concernant l'évolution des paramètres suivants; densité apparente et porosité, vitesse d'infiltration, humidité du sol, granulométrie, état de la surface du sol et fonte des agrégats (G. Jérome, 1992); et finalement le rendement de la culture de maïs, en 1991. Ces mesures ont permis de déterminer d'une part les paramètres de l'érosion: régime des pluies et érosivité (E.I30), intensité du ruissellement et perte en terre; d'autre part l'évolution des propriétés du sol et du tepetate, qui conditionnent l'érosion et la fertilité. En outre l'analyse des états de surface permettra d'expliquer le processus de cette évolution et de l'érosion.

4. Suivi des propriétés du tepetate et du sol.

La culture du maïs en 1991 a été faite selon les pratiques paysannes mexicaines. Après le labour et le creusement de sillons (surcos) en courbes isohypses (13/05), où le maïs a été semé en poquets, formant ainsi des billons intercalaires, il y a eu successivement: un premier sarclage (8/07) pour mouvoir la terre du billon dans le sillon et faire un premier buttage du maïs, puis un deuxième sarclage (6/08) pour creuser un sillon entre les rangs et parfaire le buttage du maïs, produisant ainsi le billon final à la place du sillon initial. C'est pourquoi on doit distinguer trois périodes d'observation du 6/05 au 8/07, du 8/07 au 6/08 et du 6/08 au 24/10. La dénivellation billon/sillon varie de 15 à 25 cm; elle va produire un barrage efficace au ruissellement superficiel des pluies, pendant la première et la troisième période du travail du sol.

4.1. Evolution de la porosité, en 1991 (porosité totale en %).

1. début et 2. fin de période

Période	1.1 | 1.2	2.1 | 2.2	3.1 | 3.2
Sol	56,4 | 50,9	55,3 | 51,5	50,0 | 48,9
Tepetate	58,1 | 53,2	57,7 | 54,3	51,1 | 50,6

La très forte augmentation de porosité du tepetate de 44% initiale à 58% après labour, est entretenue par le sarclage; mais elle diminue à près de 50% en fin de saison des pluies, par suite du tassement des agrégats.

4.2. Evolution de la vitesse d'infiltration, en 1991 (en mm/heure).

L'observation a été faite sur le billon (1) et dans l'inter-billon (2)

Période	1.1 | 1.2	2.1 | 2.2	3.1 | 3.2
Tepetate (1)	96 | 45	48 | 28	21 | 10
Tepetate (2)	52 | 16	24 | 12	8 | 2
Sol (1)	68 | 32	16 | 8	10 | 4
Sol (2)	52 | 0	12 | 2,4	5 | 0

La très forte augmentation de la vitesse d'infiltration de moins de 1 mm/heure sur le tepetate saturé initial, à 50-100 mm/heure dans le tepetate labouré, décroît progressivement sur la partie billonnée jusqu'à 10 mm/heure; mais cette valeur chute rapidement à près de 0, sur le sillon inter-billon, par l'effet combiné d'une croûte "de dépôt" et de la proximité d'un horizon de tepetate, très peu perméable quand il est saturé en eau (gonflement). Sur le billon, la diminution de perméabilité est due au tassement et surtout à la for··/··

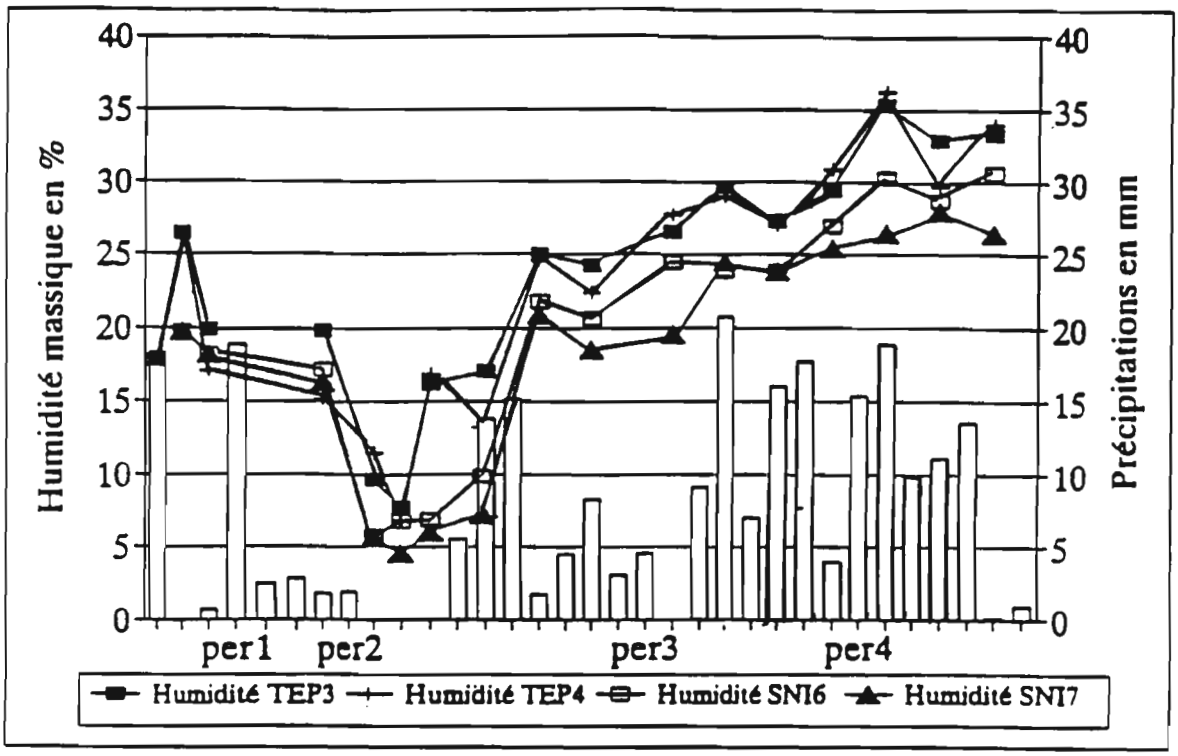


Fig.8. Relation précipitation-humidité superticielle, 1ère période.

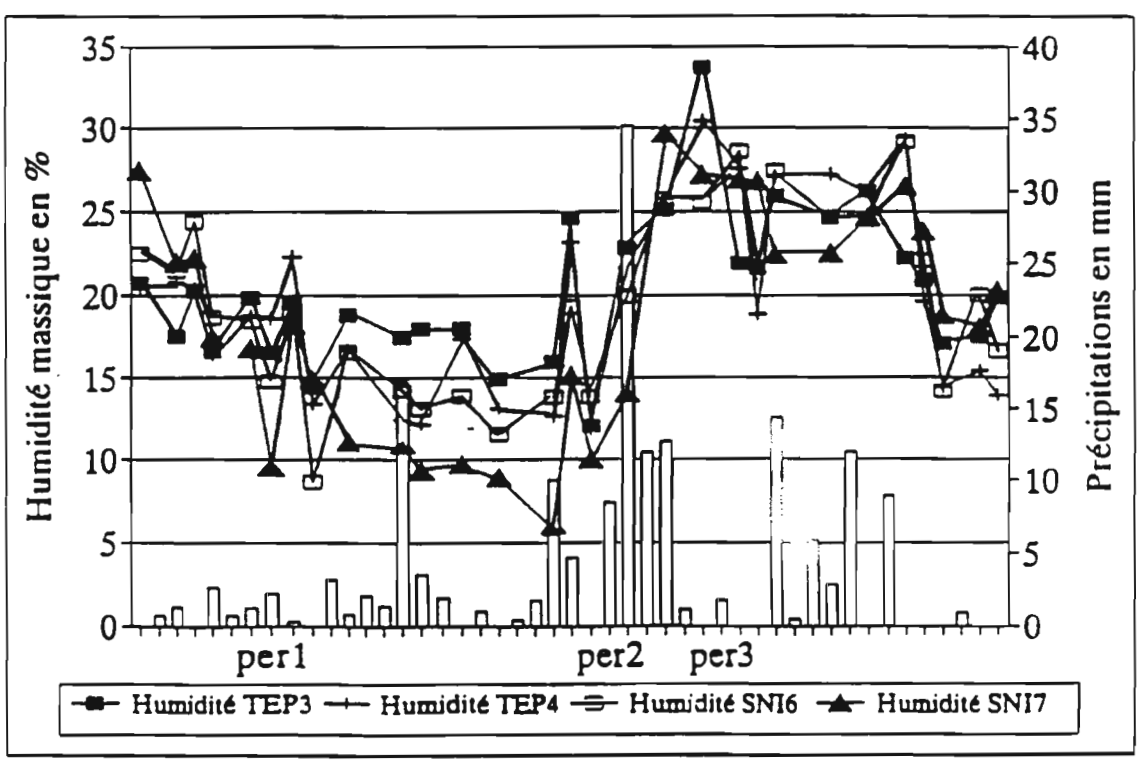


Fig.9. Relation précipitation-humidité superficielle; 3ème période.

- mation d'une croûte "structurale" en surface. L'évolution du sol est semblable, mais encore plus rapide et plus accentuée, du fait de son instabilité structurale et de la présence d'une semelle de labour (compaction du sol vertique sous-jacent).

4.3. Evolution de l'humidité du sol.

a. Relation entre humidité du sol et pluies (en 1991).

L'humidité (en % de poids minéral sec) a été mesurée deux fois par semaine pendant les six mois de saison des pluies, sur les parcelles de sol labouré, nu ou cultivé (6 et 7), et celles de tepetate labouré, nu ou cultivé (3 et 4). On observe premièrement une évolution parallèle de toutes les parcelles, notamment de sol et de tepetate labourés; l'humidité du sol sablo-argileux demeure environ 5% inférieure à celle du tepetate argilo-limoneux. Le tepetate fragmenté se comporte donc comme un sol argilo-limoneux dont la capacité de rétention en eau au champ (CC) se situe entre 25 et 30% (en poids de sol sec) et le point de flétrissement (PF) entre 15 et 17%. Sur le tepetate labouré l'impact du couvert de maïs ne se marque pas sur l'humidité du sol, sauf pendant la petite saison sèche du mois d'août, où l'humidité du sol est un peu inférieure et en dessous du PF sous maïs, sans doute à cause de la forte évapotranspiration à ce stade de végétation de la plante.

Deuxièmement on remarque un parallèle entre l'humidité du sol et du tepetate, et le régime des pluies (Fig. 8). Après les premières pluies en mai, suivies de sécheresse, l'humidité diminue et devient proche, voire un peu inférieure au PF; puis pendant une période de pluie abondante du 8 juin au 7 juillet, l'humidité augmente jusqu'à la capacité au champ et un peu plus. Ensuite elle fluctue entre CC et PF, pendant une période de pluies irrégulières et même descend près du PF à la fin d'août (petite saison sèche). Enfin (Fig. 9) elle remonte brusquement près de CC pendant les fortes pluies de septembre-octobre (2.09 au 20.10). Cette évolution montre une bonne infiltration des pluies dans le tepetate labouré et dans le sol. Les valeurs au dessus de CC pendant les fortes pluies indiquent cependant une limite de drainage à la base du sol et du tepetate labouré.

b. Impact des traitements sur l'humidité du sol et du tepetate.

Un pourcentage a été calculé des valeurs où l'humidité du sol est inférieure à PF (déficit), ou au dessus de CC (excès) et entre les deux (eau utilisable), pendant les deux derniers mois de pluie en 1990, puis les six mois de pluie en 1991. Les moyennes des valeurs obtenues (tableau ci dessous) mettent en évidence l'effet des traitements.

% de valeurs d'humidité	< PF	PF ~ CC	> CC
1 - Tepetate nu	57	28	15
2 - Tepetate sous-solé, nu	40	32	28
3 - Tepetate, labour, sans billon, nu	33	39	28
4 et 5 - Tepetate, labour, sans billon, nu (90)	32	48	20
- Tepetate, labour + billon + maïs (91)	33	28	39
6 - Sol, labour + billon, nu (91)	32	32	36
7 - Sol, labour + billon + maïs (91)	34	43	23

Les valeurs des seuils de point de flétrissement (PF) ont été probablement un peu surestimées et celles de capacité au champ (CC) sous-estimées,

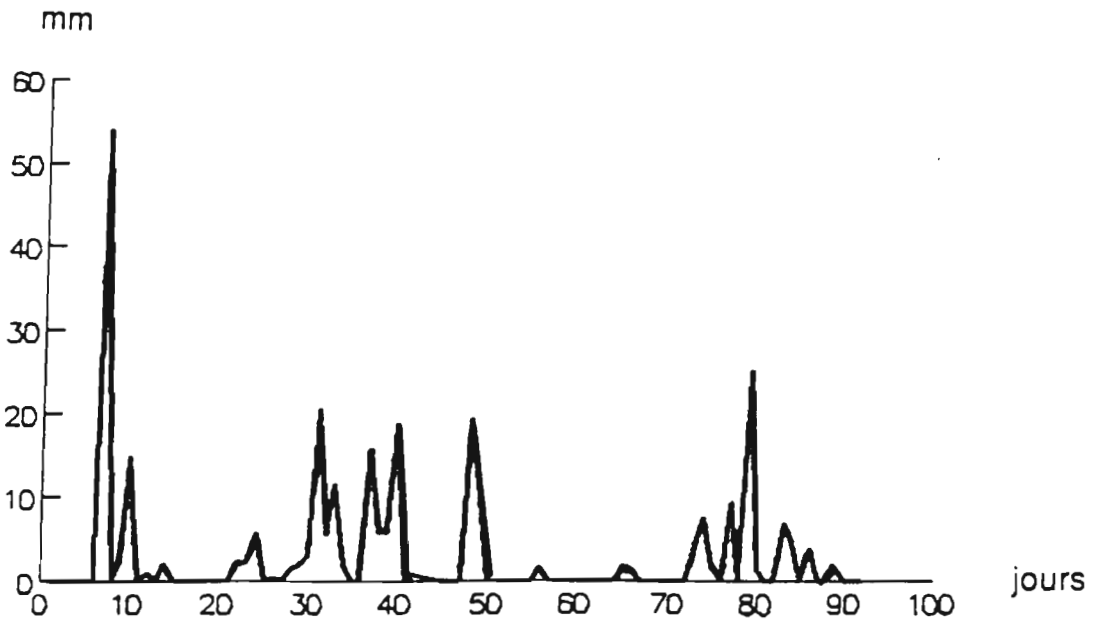


Fig.10. Précipitations en 1990 (août à septembre),à San Miguel Tlaixpan.

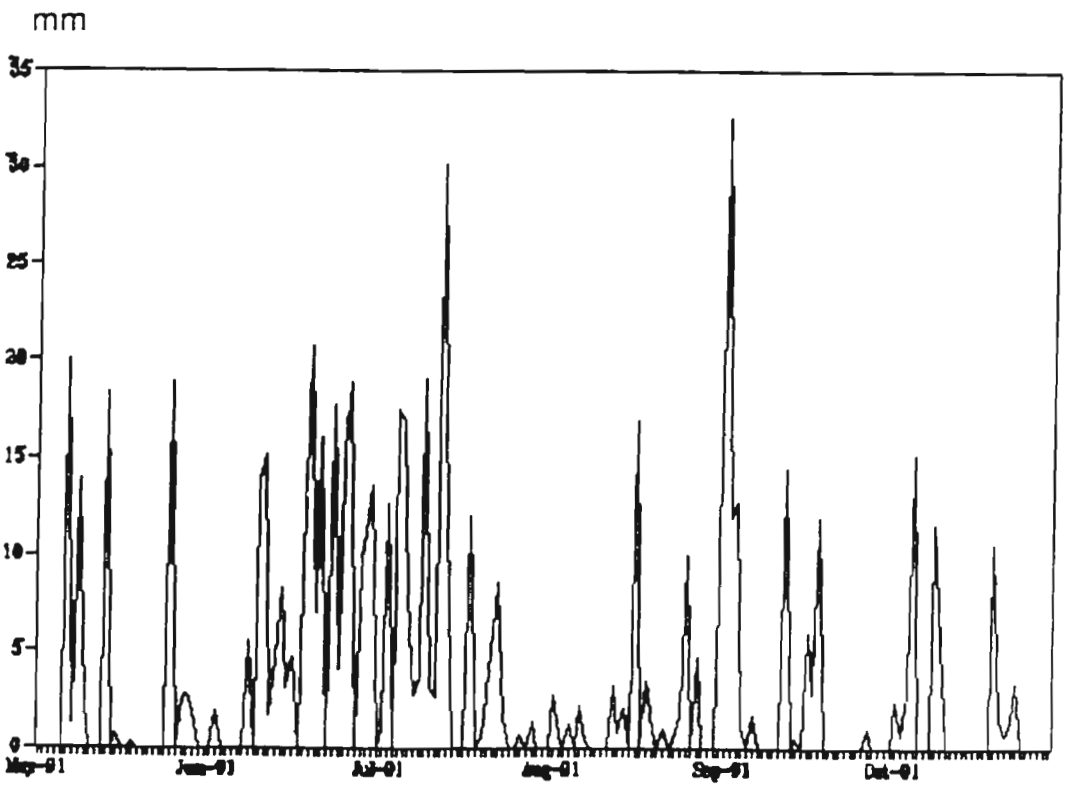


Fig.11. Précipitations en 1991 (mai à octobre), à San Miguel Tlaixpan.

ce qui a réduit l'évaluation des valeurs intermédiaires correspondant à l'eau utilisable, sans excès ni déficit nuisible pour la plante. Cependant ces résultats montrent bien qu'un tepetate naturel infiltre mal l'eau et se comporte comme un matériau aride. Le simple effet du sous-solage améliore déjà l'infiltration de l'eau. Mais il faut en plus la fragmentation par labour pour obtenir le comportement d'un sol agricole. L'effet du billon ou de la culture de maïs n'est pas significatif dans le cas du tepetate labouré; il n'améliore pas l'infiltration des pluies.

4.4. Evaluation du rendement de culture de maïs.

En deuxième année de traitement du tepetate sous-solé et labouré, les parcelles 4 et 5 ont été cultivées en maïs Criollo (variété locale), avec une fertilisation N: 120, P: 80 et K: 0; De même la parcelle 7 de sol labouré (en première année de culture après jachère).

Les parcelles de tepetate ont produit de 1,24 à 1,74 T/ha de grain, en moyenne 1,5 T/ha; celle de sol 2,8 T/ha. Le rendement du tepetate est estimable, en raison de l'absence d'apport organique; il est supérieur à la moyenne de production en agriculture paysanne de cette région. Donc le tepetate ainsi fragmenté a acquis les propriétés d'un sol agricole.

5. Mesures de ruissellement et d'érosion.

Il s'agit des mesures d'intensité des pluies, du ruissellement et des pertes en terre. Elles ont duré 2 mois seulement en 1990 (septembre-octobre) et les 6 mois de pluies de 1991 (mai à octobre). Revoir le protocole expérimental, paragraphe 3 ci-dessus.

5.1. Régime des pluies et érosivité.

a. En 1990, pendant les seuls mois de septembre et d'octobre il y a eu au total 184 mm de pluies, un peu moins qu'une pluviosité annuelle normale. Une seule pluie, de 54 mm est fortement érosive; 5 autres, de 15 à 21 mm, sont peu érosives (Fig. 10). L'érosivité cumulée de cette période serait selon Arias (1992) en E.I30 = 684 MJ/ha x mm/h.

b. En 1991, pendant les 6 mois de mesure, de mai à octobre, il est tombé au total 669 mm de pluie (Fig. 11), un peu moins que la pluviosité annuelle moyenne (750 mm). La répartition des pluies est irrégulière, en 4 vagues: mi-mai, juin-juillet, mi-août à mi-septembre, début octobre; elles sont surtout abondantes en juin-juillet, puis en septembre; il y a une petite saison sèche en août. Il y a eu seulement deux pluies de 30 et 34 mm et de forte intensité (13.07 et 2.09) et deux pluies de 18 et 19 mm et de forte intensité (13.05 et 10.07); 13 pluies de 15 à 21 mm et d'intensité modérée.

L'érosivité des pluies a été calculée pour chaque évènement selon le coefficient E.I30 de Wischmeier (1978) en système métrique international (MJ/ha x mm/heure). E est l'énergie cinétique; I30 l'intensité moyenne pendant 30 mn. La valeur cumulée pendant l'ensemble des mesures (du 6.05 au 24.10), pour une somme de pluies de 669 mm, est d'environ 3500 (d'après Jérome 1992). La transformation en unités de mesure américaines (tonne-courte x pied/acre x pouce/heure; soit x 1/17,356) donne une valeur d'environ 200, qui peut être comparée à celles rapportées dans la littérature (Roose, 1981). Cette valeur est comparable à celle d'un climat subaride méditerranéen (50-350) ou tropical-sahélien (200-600) de caractère modérément érosif. (La valeur 1957 donnée par Arias, 1992, ne semble pas avoir pris en compte la totalité des évènements; elle montre la difficulté de cette évaluation).

Les quatre pluies érosives ont une valeur E.I30 supérieure à 100 et une valeur de I30 égale ou supérieure à 25 mm/heure:

date	H mm	I30 mm/h	E.I30 u. amér.	
13-05	18,3	31,1	140,7	Pluies faiblement érosives
10-07	19	24,5	108,7	
1-07	30,2	24,7	170,4	
2-09	34,5	27,8	194,9	Pluie moyennement érosive

Il y a en outre 10 pluies très faiblement érosives, de hauteur 12 à 21 mm, I30: 12 à 24 mm/h et E.I30: 50 à 80. C'est dire qu'en 1991, il y a eu peu de pluies vraiment érosives.

5.2. Mesure de l'érosion.

Les résultats de sédiments sont exprimés en Tonne/ha. En 1990*(1) les valeurs obtenues sur deux mois ont été extrapolées, d'après l'érosivité des pluies, par rapport à une année moyenne; sur la parcelle 4*(2), des fuites latérales de ruissellement ont perturbé cette mesure. En 1991, les résultats concernent la majeure partie de la saison des pluies, à l'exception des premières de mai et des pluies tardives. Le tableau suivant (d'après Arias, 1992) donne ces résultats.

Année 1990 *(1)			Année 1991		
Traitement	Long. m	Perte en terre T/ha		Long. m	Traitement
1: Tepetate, nu	22	5,09	5,05	22	1: Tepetate, nu
2: T, SS, nu	22	1,95	21,89	22	2: T, L, nu (sans B)
3: T, SS + L, nu	22	5	1,04	22	3: T, L + B, nu
4: T, idem 3	22	* (2)	1,24	22	4: T, L + B, maïs
5: T, idem 3	10	5,62	1,18	10	5: T, idem 4
6: T, idem 3	5	5,66	1,1	22	6: Sol, L + B, nu
			1,79	22	7: Sol, L + B,maïs

T: tepetate - SS: sous-solage - L: labour - B: billonnage.

a. Tepetate: - Le tepetate à nu est érodible malgré sa dureté en surface; mais à un taux limité de 5 T/ha/an. Ceci est dû à un fort ruissellement.

- L'effet du sous-solage seul (trait. 2, 1990) est très net, réduisant à 2 T/ha/* la perte en terre. C'est peut-être dû à l'infiltration dans les fentes du sous solage et à l'effet de butte isohypse formé par ce traitement (* mais ce résultat obtenu en 1990 sur 2 mois seulement n'a pas été vérifié en 1991).

- L'effet du labour seul, sans billonnage sur la parcelle 2 en 1991, a favorisé une forte perte en terre de 22 T/ha, malgré une bonne perméabilité initiale et la faible érosivité de la plupart des pluies. Bien que le tepetate fragmenté ait une structure stable, il est évident que les agrégats les plus fins

sont facilement érodibles. Il est notable que seulement deux pluies majeures, au plus quatre, sont responsables d'une telle érosion.

- L'effet du billonnage, sur la parcelle 3 en 1991, est spectaculaire, puisqu'il réduit la perte en terre de 22 à 1 T/ha. Il stoppe complètement l'érosion à l'échelle de la parcelle. Mais ceci ne signifie pas que des pluies plus abondantes que 35 mm et d'intensité I30 supérieure à 30 mm/h, ne seraient pas fortement érosives (en général à partir de 50 mm/h pendant 30 mn, aucun billon ne résiste à la pression de l'eau accumulée dans l'inter-billon).

- L'effet de la couverture du maïs (en 1991) n'apparaît pas, du fait du billonnage; la perte en terre demeure voisine de 1 T/ha.

- L'effet de la longeur de pente est nul, que ce soit sur tepetate labouré-nu en 1990, ou labouré-billonné sous culture de maïs en 1991. Ce fait déjà connu (Roose, 1981; Casenave et Valentin, 1989), est donc vérifié.

b. Comparaison sol-tepetate: les résultats sont peu différents sur sol et sur tepetates labourés et billonnés. L'effet du billonnage est primordial, malgré une moins bonne stabilité structurale du sol et une rapide baisse de l'infiltration après encroûtement du sol.

5.3. Intensité du ruissellement.

Les responsables des mesures de ruissellement n'ont pas publié leurs résultats. Il semble qu'ils aient eu des problèmes imprévus dans l'interprétation des hydrogrammes fournis par les limnigraphes; (il est regrettable qu'ils n'aient pas mesuré le volume total ruisselé à chaque pluie). Cependant Arias (1992) dans son rapport de synthèse présente des évaluations concernant les trois pluies érosives des 10.07, 13.07 et 2.09 de 1991. Les résultats du volume ruisselé par parcelle sont exagérés par suite d'une erreur systématique de calcul. Après évaluation de cette erreur et correction, on a pu estimer une valeur approchée du taux de ruissellement "r", en pourcentage du volume de pluie correspondant:

Parcelles n°			1	2	3	4	5	6	7
Pluies dates	H mm	I 30 mm/h	Valeur r % volume de pluie						
10-07	19	24,5	83,4	48,2	0,6	0	23,4	14,8	14,7
13-07	30,2	24,7	92,1	38,2	23,6	11,3	0,3	23,2	21,4
2-09	34,5	27,8	88,1	48,3	8,9	2,1	0	0,2	1,2
moy.	83,7*	25,9	88,5	44,6	12,3	4,9	5,4	11,8	11,5

* somme des pluies

Cette approche, nous fournit des valeurs probables et surtout nous permet de comparer les effets des traitements. Evidemment sur le tepetate nu (saturé en eau, après gonflement) le ruissellement est proche de 90% du volume de pluie. L'effet du sous-solage et du labour, sans billon sur la parcelle 2, réduit de moitié la valeur "r". Sur les autres parcelles les résultats varient d'une pluie à l'autre en raison du travail du sol pour déplacer le billon (voir paragraphe 4 ci-dessus). En effet le 8.07, peu avant la pluie du 10.07 un premier "sarclage" a fermé le sillon initial aux dépens du premier billon. Puis le 6.08 le deuxième sarclage a permis de former le billon final sur la ligne des plants de maïs.

Il est évident que le nouveau billon a réduit à près de 0 le ruissellement lors de la forte pluie du 2.09, tant sur tepetate que sur sol. Le "sarclage" précédent, début juillet, s'est révélé peu efficace lors de la forte pluie du 13 juillet.

La comparaison des valeurs moyennes de "r" montre que le ruissellement est deux fois plus élevée sur le sol (12%) que sur le tepetate fragmenté (5%), du fait de la moindre stabilité du sol et en conséquense de sa perméabilité réduite. En outre sur tepetate, il semble que le couvert de maïs (parcelles 4 et 5) réduise de moitié le taux de ruissellement (par rapport à la parcelle 3, à nu).

6. Evolution des états de surface et de la fonte des agrégats.

Il s'agit de l'observation des réorganisations structurales, notamment la formation de croûtes, et de la diminution de taille des agrégats en surface. C'est le travail de G. Jérome (1992) en 1991, dirigé par J. L. Janeau selon la méthode de Valentin (Casenave et Valentin, 1989).

6.1. Périodes de travail du sol et régime des pluies en 1991.

Nous avons décrit aux paragraphes 3 et 4 ci-dessus, le protocole des traitements des parcelles et les travaux pour la culture du maïs, notamment le "billonnage". Les travaux du sol déterminent trois périodes d'observation des états de surface. Ils sont mis en correspondance avec le régime des pluies, voir le schéma suivant.

Pluies	Premières			Fortes		Faibles		Fortes	Faibles	
mm	37,2	19	0	283,6	84,7	25,7	50	114,8	53	
Dates	6-5	13-5	17-5	25-5	8-7	19-7	6-8	31-8	21-9	24-10
Travaux	L.S.	Se		1° Sa		2° Sa B				
Périodes	1 ère				2 ème	3 ème				

LS: Labour + Sillon; Se: Semis - 1° Sa: 1er Sarclage - 2° Sa B: 2ème sarclage + Billon.

6.2. Evolution des états de surface, sur parcelles billonnées.

Cette étude consiste en une observation et cartographie en surface du développement de croûtes sur les billons et dans les sillons inter-billons; elle est faite au début et à la fin de chacune des trois périodes, c'est à dire 6 fois.

A partir de l'état fragmentaire et rugueux initial il se forme d'abord une croûte structurale "S" sur le billon, puis une croûte de dépôt "D" dans le sillon, où le maïs est semé. Le premier sarclage brise le premier billon et recouvre de ses matériaux fragmentés le sillon, initiant ainsi un deuxième billon pour "butter" le maïs. Une deuxième croûte structurale puis de dépôt se reforme sur les nouveaux billon et sillon. Le deuxième sarclage recreuse le sillon entre les rangs de maïs, souvent jusqu'à l'horizon compact (tepetate ou semelle de labour), et parfait le buttage en forme de billon du maïs. Il se forme alors rapidement une croûte structurale et une croûte de dépôt. Mais le billon final conserve superposées la première croûte de dépôt du sillon initial et la deuxième croûte structurale, sous l'ultime croûte S.

Une croûte structurale est formée sur les billons par colmatage des vides et cimentation des particules fines entre les agrégats et par la fonte partielle des agrégats les plus fins; elle se forme sous l'effet "splash" de la pluie; elle est vésiculaire, emprisonnant des bulles d'air et friable, mais quasi imperméable. Elle reste rugueuse, mais moins que la surface initiale.

La croûte de dépôt apparaît dans les sillons. Elle est laminaire, formée de feuillets sableux clairs et de feuillets argilo-limoneux bruns. Elle est dense, indurée et imperméable, moins friable qu'une croûte S. Dans le cas du tepetate labouré, cette croûte comporte des lits irréguliers de petits "agrégats", les plus gros recouvrant les plus fins (sédimentation inversée); elle reste un peu rugueuse et friable. Dans le cas du sol, les sédiments sont mieux "classés", plus denses et plus fermes; la croûte est plus lisse et plus dure.

Dans le cas du tepetate labouré, la formation des croûtes S et D est d'abord lente et successive; le dépôt D dans le sillon ne se forme que quand toute la surface du billon est encroûtée, c'est à dire quand la pluie s'infiltre lentement et ruisselle fortement. En deuxième et surtout en troisième périodes, malgré le sarclage, la formation des deux croûtes est plus rapide et plus intense. C'est aussi le moment des pluies les plus érosives (10 et 13.7 en début de 2ème période; 2.9 en 3ème période. Mais il semble qu'une fragmentation accrue des agrégats par le sarclage intensifie l'encroûtement; la croûte D finale est plus dure.

Sur le sol labouré, plus instable que le tepetate, le processus est plus rapide, et finalement la croûte de dépôt est plus épaisse et plus ferme que sur le tepetate labouré.

Ces faits se sont bien traduits dans les mesures de porosité et d'infiltration (voir le paragraphe ci-dessus), par un tassement et une forte diminution de la perméabilité, surtout en troisième période. Cette diminution est moins forte sur tepetate que sur sol, et sur billon que dans le sillon inter-billon.

6.3. Fonte des agrégats, sur parcelles billonnées.

La fonte des agrégats a été mesurée par l'évolution du diamètre de ces agrégats, selon deux classes de taille: grossière et fine. Cette observation a été faite au début et à la fin de chaque période, sur sol ou tepetate, nu ou couvert de maïs. En outre il y a eu des mesures du "D minimum": le plus petit agrégat non fondu incorporé à la croûte S; l'accroissement de "D min" est corrélé à l'érosivité des pluies (E.I30), (d'après Casenave et Valentin, 1989 et Boiffin, 1984).

Sur le tepetate fragmenté, la fonte des agrégats est lente et progressive pendant les trois périodes, quelle que soit la taille des agrégats. On n'observe pas une fonte totale. La diminution de taille n'est pas due à l'effet "splash"; il n'y a pas de corrélation avec l'érosivité des pluies (E.I30). La diminution de taille se fait par fissuration et fragmentation superficielle, sous l'effet d'une alternance humectation-dessication, c'est à dire gonflement-retrait.

Sur le sol au contraire, la fonte des agrégats est spectaculaire, dès la première période de pluies et du travail du sol (Fig. 12). La diminution est proportionnelle à l'érosivité des pluies (E.I30), surtout pendant les pluies fortement érosives des première et troisième périodes (Fig. 13). La fonte totale d'agrégats est importante dès les premières fortes pluies; elle se généralise au cours de la dernière période (Fig. 14). Ce sont les petits agrégats qui fondent les premiers et le plus vite; ils sont très instables et très sensibles à l'effet splash, donc à l'intensité érosive des pluies; les plus gros sont plus résistants.

L'effet de protection de la couverture de maïs sur la fonte des agrégats n'est pas évident sur le tepetate fragmenté; ni même en valeur moyenne sur le sol; dans ce cas il n'est observé que localement pendant la troisième période. Ceci suggère que la protection du maïs ne se fait sentir que tardivement et localement; son effet est donc restreint. Ceci est confirmé par l'observation du "Dmin".

La mesure du plus petit diamètre d'agrégat non intégré dans la croûte, "Dmin", montre les faits suivants: Au cours des périodes 1 et 2, les plus petits agrégats (< 2 mm) fondent, ne laissant que les plus gros (20 à > 50 mm); qui eux-mêmes disparaissent à la fin de chaque période; la croûte dev../..

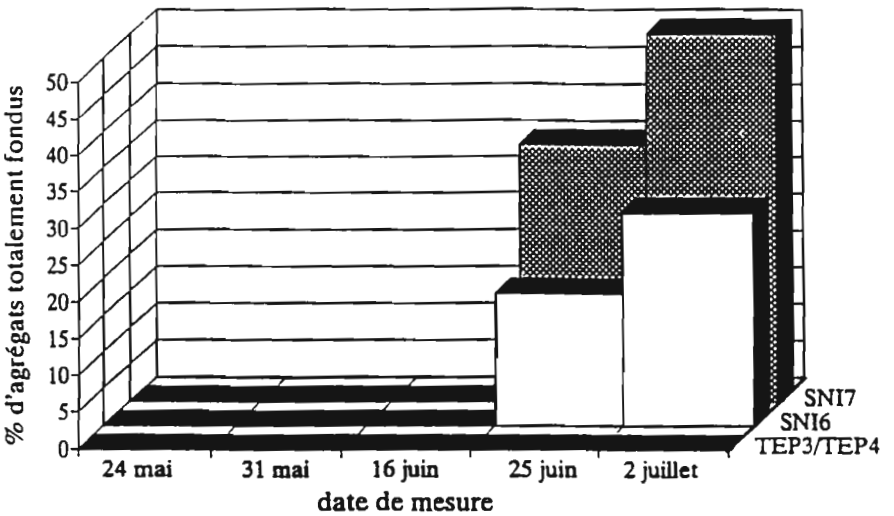


Fig.12. Evolution de la fonte totale d'agrégats en surface; 1ère période.

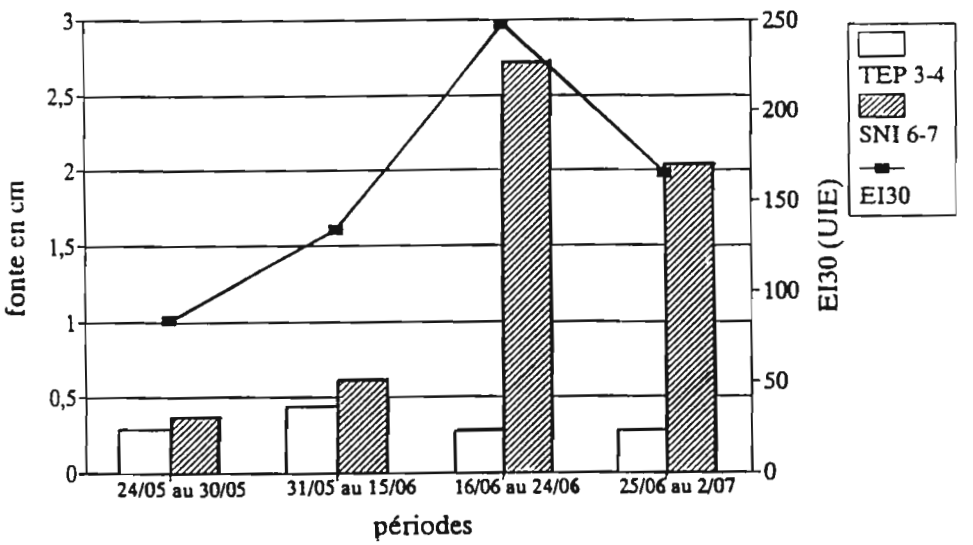


Fig.13. Relation entre fonte des agrégats et érosivité (E.I.30); 1ère période.

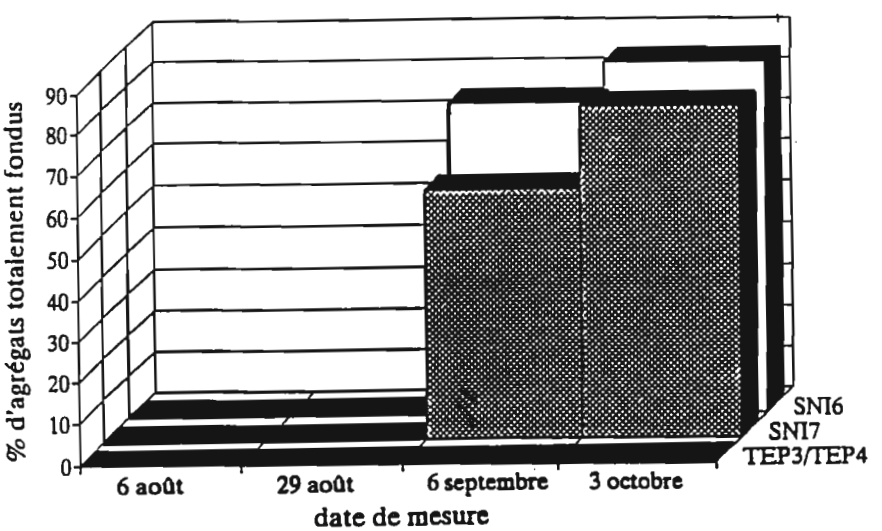


Fig.14. Evolution de la fonte totale d'agrégats en surface; 3ème période.

-ient lisse. En période 3, il n'y a dès le départ que des agrégats inférieurs à 10 mm, qui disparaissent rapidement. Cette évolution est la même avec ou sans couvert végétal; elle est plus rapide sur le sol que sur tepetate fragmenté. Il faut donc éviter une fragmentation trop fine, surtout < 2 mm.

6.4. Mesure des "points quadrats", évolution du relief superficiel, en parcelle billonnée.

Il s'agit de la variation de hauteur moyenne de la surface des billons "Hb" et des sillons inter-billons "Hs". En première période la diminution de Hb précède l'augmentation de Hs. Donc le tassement et la formation de la croûte S précèdent le dépôt et la croûte D. En deuxième et surtout troisième période, le processus est plus rapide et presque simultané. Il n'y a pas d'effet du couvert végétal. L'évolution est un peu plus rapide sur sol que sur tepetate. La diminution de la hauteur moyenne de l'ensemble de la surface à la fin des pluies, ne peut être interprétée seulement comme un effet de l'érosion, puisqu'il y a eu un tassement généralisé et formation de croûtes.

6.5. Evolution des états de surface en parcelles billonnées.

Sur la parcelle de tepetate labourée, non billonnée et nue, la surface initiale est motteuse et irrégulière. Elle se couvre rapidement d'une croûte structurale, d'abord sur les plages de particules fines, puis sur celles d'agrégats grossiers, par fonte des agrégats fins. Une croûte de dépôt se forme ensuite dans les petites dépressions. La fonte des agrégats est progressive; elle concerne d'abord les plus fins. Il se forme alors en surface des griffes d'érosion, dès les plus fortes pluies (fin juin); elles s'approfondissent ensuite. Ainsi se manifeste l'effet du ruissellement, non contrôlé, comme dans les autres parcelles, par des billons. Dans ce cas on observe une diminution généralisée du relief de surface; il s'explique par le tassement et aussi par l'érosion linéaire.

6.6. En conclusion:

Il se forme toujours des croûtes superficielles, successivement structurales sur les surfaces en relief, puis de dépôt dans les dépressions. Elles sont dues à l'impact des pluies les plus fortes. Le processus de dégradation est plus rapide sur le sol, où les agrégats sont instables et fondent rapidement. Le couvert de maïs intervient trop tard pour réduire cet effet.C'est l'encroûtement qui accroît le ruissellement et déclenche l'érosion.

Le billonnage a maîtrisé complètement le ruissellement et l'érosion dans les conditions climatiques de 1990 et 1991. Mais on peut craindre qu'il ne soit inefficace pour des pluies plus intenses que I30 de 30 mm par heure.

La taille des agrégats joue un rôle important; ce sont ceux plus fins que 2 mm qui fondent rapidement et déclenchent le processus d'encroûtement. L'idéal serait de n'avoir pas de fragment inférieur à 2 mm. Le système mexicain de billonnage du maïs nécessite trois opérations de travail du sol après le labour; les deux "sarclages" nécessaires au buttage des plants de maïs, se révèlent finalement dangereux pour la stabilité des agrégats et le contrôle de l'infiltration des pluies, et donc du ruissellement et de l'érosion.

B. REGION DE TLAXCALA; EXPERIMENTATION SUR TEPETATE T2 ET T3, ET SUR SOL.

Les résultats sont présentés par J. Baumann (1992); ils proviennent de trois stations: El Carmen, Matlalohcan et Tlalpan, situées entre 2500 et 2600 m d'altitude, sur une pente comparable de 8 à 9%. Il y a eu deux années de mesure pendant la saison des pluies de 1990 et 1991. Les premiers résultats de 1989, sur des parcelles trop petites et insuffisamment équipées n'ont pas été pris en compte.

Il y a eu des aléas qui ont perturbé sensiblement les observations. Les mesures de ruissellement et d'érosion sur les parcelles cultivées ont commen-

cé après le début des pluies: le 15 mai en 1990, le 20 juin en 1991. Les pluviographes (mexicains) ont mal enregistré les fortes pluies en 1990; ils ont été remplacés en 1991 par des appareils allemands plus fiables et associés à des pluviomètres, pour le contrôle du volume global. Enfin, le système collecteur du ruissellement était insuffisant* pour les fortes pluies, sur les parcelles nues à fort taux de ruissellement; il y a eu débordement des cuves et perte d'eau et de sédiments en suspension. Les résultats sont donc incomplets. (* l'équipement était imparfait par manque de crédits).

1. Stations, protocole expérimental et méthodes

1.1. Propriétés initiales des tepetate et du sol.

Les propriétés chimiques (voir le tableau ci-dessous) et physiques initiales des tepetates t2 et t3 sont semblables et comparables à celles du tepetate t3 de Texcoco. Ils sont pauvres en Carbone organique et en Phosphore, et riches en bases échangeables, notamment en Calcium, en Magnésium et en Potassium; ils sont faiblement alcalins. Le sol est plus riche en Carbone, mais plus pauvre en bases échangeables, surtout en Potassium; il est faiblement acide. Le tepetate t2 est aussi argileux que le t3; mais il est plus gonflant, parce que constitué de smectites, et de ce fait plus instable que t3. Le sol est plus sableux et instable que les tepetates.

Matériau	C	Pt	Bases échangeables me / 100g				
	°/₀₀	ppm	Ca	Mg	K	Na	SB
t2	1,2	300	10,3	8,3	1,5	0,7	20,8
t3	1,5	420	10,5	8,7	1,9	0,7	21,8
Sol	8,9	450	5,0	3,3	0,5	0,2	9,0

Pt: Phosphore total - SB: Somme des bases échangeables.

1.2. Stations et protocoles.

Station	Matériau	Pente %	Dimension L x l, m	Traitement
El Carmen	t3	7	3 x 2	tepetate, nu
alt. 2600 m	t2	9	3 x 2	tepetate, nu
pente 7-9%	t2	9	22 x 2	T, SS + L, nu
	t2	9	22 x 2	T, SS + LB, maïs
Matlalohcan	t3	9	6 x 2	tepetate, nu
alt. 2500 m	t3	8	6 x 2	T, SS, Tlaxistle (1)
pente 8-9%	Sol	9	22 x 2	nu
	Sol	9	22 x 2	Savane arbustive
Tlapan	t3	8	3 x 2	tepetate, nu
alt. 2600 m	t3	8	22 x 2	T, SS + L, nu
pente 8%	t3	8	22 x 2	T, SS + LB, maïs
	t2	8	3 x 2	tepetate, nu

On peut donc comparer le comportement des deux types de tepetates nus, des tepetates fragmentés (SS: sous-solé, L: labouré) nus ou cultivés en maïs (LB: labour + billon), du sol nu et sous couvert de savane arbustive naturelle.

N.B. Une parcelle expérimentale de 500 m² sur t3 labouré, planté en maïs, avait été équipée d'un système récepteur avec roue de "Coshocton" comme partiteur; mais l'imperfection de son installation ne permet pas de prendre en compte les résultats.

1.3. Méthodes.

a. Régime de pluie: les pluies ont été mesurées avec un pluviographe. Outre le problème de l'appareil en 1990, déjà relaté, les pluviographes ont été installés à une distance de 1 à 2 km des parcelles et à 2,5 m de hauteur, pour des raisons de sécurité. En 1991, un pluviomètre a été placé près des parcelles, pour contrôler la hauteur réelle des pluies.

b. Ruissellement: Il a été calculé à partir du volume mesuré dans les cuves de réception des eaux.

c. Pertes en terre: Elle a été calculée à partir du poids de sédiments recueillis dans les cuves.

d. Régime d'humidité du sol: Il a été obtenu par des mesures in situ d'humidité volumétrique du sol, entre les parcelles, à l'aide d'un appareil TDR (Time Domaine Reflectometry) de Soil Moisture Equipement, entre 0/15 et 0/30 cm de profondeur; d'autre part des mesures de tension capillaire de l'eau. Ces mesures ont été faites 1 à 2 fois par semaine de juin à octobre.

2. Régime des pluies et érosivité, en 1991.

2.1. Régime des pluies.

La quantité de pluie enregistrée sur les trois stations d'avril à octobre est de 779 mm à El Carmen, 775 mm à Matlalohcan et 803 mm à Tlalpan; elle varie peu; mais elle est supérieure de plus de 100 mm à celle de San Miguel Tlaixpan (Texcoco).

Les pluies sont réparties en trois périodes: avril-mai, juin-juillet, septembre-octobre, entrecoupées de deux périodes sèches (15 mai-8 juin; 10-30 août). Les pluies les plus intenses ont eu lieu en juin-juillet et en septembre (Fig 15). Les pluies sont en majeure partie inférieures à 20 mm et peu intenses. Seules 6 à 10% des pluies sont supérieures à 20 mm et intenses (> 25 mm/h).

2.2. Erosivité des pluies.

Les trois stations se distinguent, à hauteur presque égale des pluies, par une forte variation dans l'intensité et l'érosivité des pluies (Fig. 15, 16, 17), qui est exprimée par la somme des coefficients E.I30 (de Wischmeier, en unités américaines) et AIm (de Lal), dans le tableau suivant.

Station	Pluie		E.I 30	AIm
	H mm	N jours	(U.Am)	
El Carmen	779	120	234	261
Matlalohcan	775	96	429	418
Tlalpan	803	112	357	330

On remarque que l'érosivité augmente avec l'irrégularité des pluies (inverse du nombre de jours de pluies).

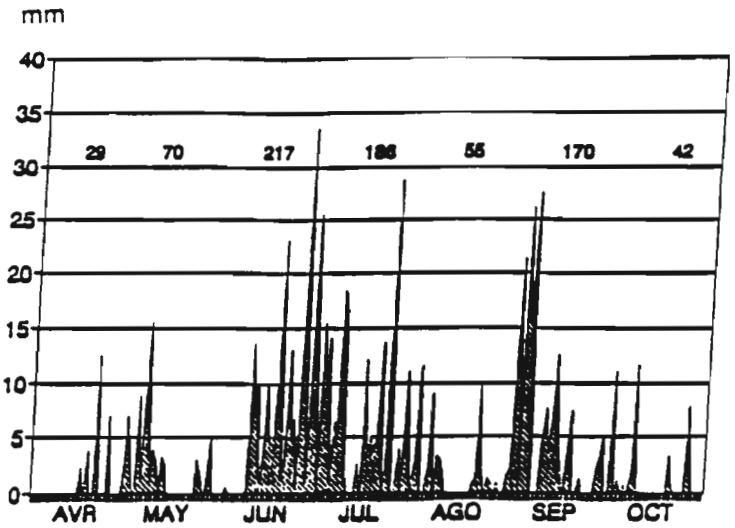


Fig.15. Précipitation en 1991 (avril à octobre), à El Carmen.

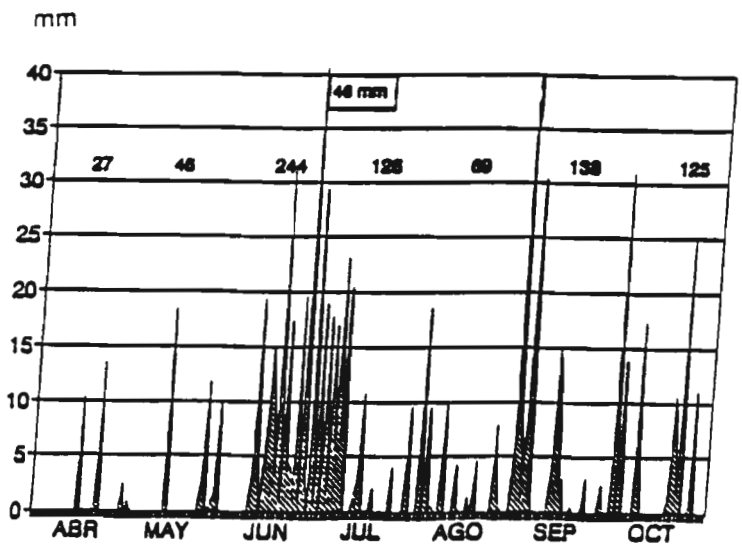


Fig.16. Précipitation en 1991 à Matlalohcan.

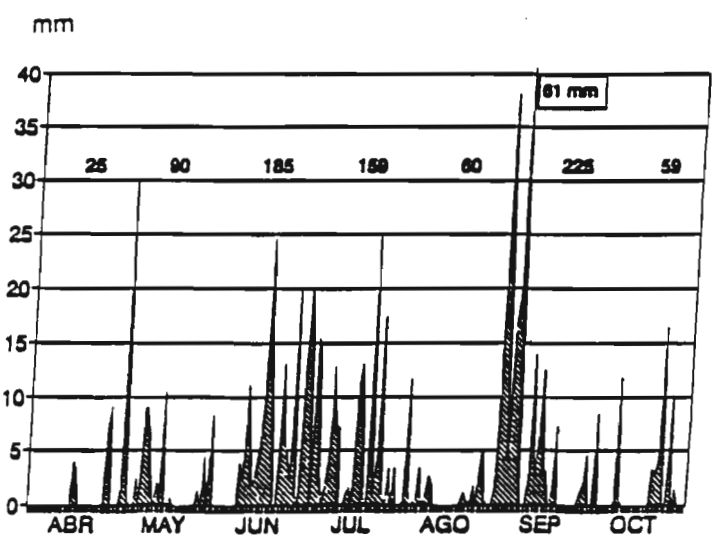


Fig.17. Précipitation en 1991 à Tlalpan.

Il y a peu de pluies vraiment érosives. Elles peuvent être classées en fonction des valeurs d'intensité I30 (mm/h) et E.I30 (MJ/ha x mm/h) en:

- fortement érosives "FE" pour I30 > 50 mm/h et E.I30 > 1000
- moyennement érosives "ME" pour I30 ~ 30-50 et E.I30 ~ 400-1000
- un peu érosives "PE" pour I30 ~ 25-30 et E.I30 ~ 200-400

La station El Carmen a eu 6 pluies érosives dont 3 ME et 2 PE, dont 5 en juin-juillet (18, 25 et 29.07) et 1 début septembre (6.09). A Tlalpan il y a eu 8 pluies érosives, dont 2 FE, 3 ME et 3 PE, dont 1 le 1er mai, 4 en juin-juillet (16, 25 et 29.06-21.07) et 3 fin août-début septembre (31.08-1 et 6.09). A Matlalohcan, il y a eu 13 pluies érosives, dont 1 FE, 3 ME et 9 PE, dont 9 rassemblées en juin-juillet (10, 17, 19, 23, 25 et 28.06-4, 6 et 8.07) et 4 en septembre-octobre (1 et 5.09-2 et 23.10).

On remarque que les pluies érosives sont rassemblées surtout en juin-juillet, quand le couvert du maïs est encore peu développé. Il n'y a en fait que 3 à 5 évènements susceptibles d'entraîner une érosion sérieuse et seulement 1 ou 2 (à Matlalohcan et à Tlalpan) une érosion très forte. En comparaison, sur la station proche de Texcoco, il n'y a eu en 1991 qu'une seule pluie moyennement érosive.

3. Mesure de l'érosion, en 1990-1991.

Les pertes en terre ont été mesurées en 1990 et 1991. Elles sont exprimées en T/ha/an (T/ha). Le tableau suivant donne ces résultats et la valeur "r" du ruissellement moyen annuel (en % du volume de pluie), en fonction des traitements de chaque parcelle.

Tableau: Perte en terre et ruissellement dans la région de Tlaxcala

Station	Tepetate-traitement	Long m	Perte en terre T/ha		Ruissellement valeur r moy. %	
			1990	1991	1990	1991
El Carmen	t3 tepetate, nu	3	7,2	8,0	-	70
	t2 tepetate, nu	3	6,0	6,3	-	67
	t2 T, SS, L, nu	22	76	78	-	34
	t2 T, SS, LB, maïs	22	9,0	23	-	11
Matlalohcan	t3 tepetate, nu	6	9,8	8,8	62	75
	t3 T, SS, Tlax.*	6	17	26	52	61
	S Sol, nu	22	18	47	30	34
	S Sol, Sav.*	22	0,3	0,3	6	10
Tlalpan	t3 tepetate, nu	3	51	41	66	68
	t2 tepetate, nu	3	21	7,5	69	65
	t3 T, SS, L, nu	22	-	128	-	43
	t3 T, SS, LB, maïs	22	2,6	26	8	21

Long.: longueur des parcelles (x 2 m de large) - T: tepetate - S: sol - SS, L: sous-solé, labouré - LB: labour-billonné - Sav: prairie arbustive - Tlax: arbustes de Tlaxistle.

3.1. Tepetate nu: Les pertes en terre sont peu différentes sur les deux types de tepetate à El Carmen et à Matlalohcan: de 6 T/ha sur t2 et de 7 à 10 T/ha sur t3*. Les valeurs élevées, de 41 à 51 T/ha obtenues à Tlalpan sur t3 paraissent anormales.

(*ces valeurs sur t3 sont comparables aux 5 T/ha obtenues près de Texcoco pour une moindre érosivité des pluies).

3.2. tepetate labouré-nu. Les valeurs sont très élevées: de 76-78 T/ha sur t2 à El Carmen, 128 T/ha sur t3 à Tlalpan*. (* à Tlalpan il y a eu 2 pluies fortement érosives). Elles sont nettement supérieures à celles mesurées près de Texcoco, environ 22 T/ha, sans doute en raison des pluies beaucoup moins érosives. La fragmentation du tepetate augmente donc très fortement son érodibilité.

3.3. Tepetate labouré-billonné, cultivé en maïs.

En 1990, aussi bien sur t2 à El Carmen que sur t3 à Tlalpan, les pertes en terre sont réduites entre 9 et 2,6 T/ha, respectivement. L'effet du billonnage et du couvert du maïs est donc efficace, mais moins cependant que sur la station près de Texcoco.

Mais en 1991, les pertes en terre deviennent élevées: 23 T/ha sur t2 à El Carmen, 26 T/ha sur t3 à Tlalpan. Ces valeurs supposent une rupture partielle des billons sous l'effet des pluies de forte intensité (I30 > 30mm/h et E.I30 > 400).

3.4. tepetate, planté de Tlaxistle.

Le Tlaxistle (Amelanchier denticulata) est un arbuste fruitier natif de cette région. Mais sa croissance est lente et son couvert trop espacé; ceci explique une perte en terre de 17-26 T/ha, supérieure au tepetate nu, du fait du travail de ce matériau à la plantation.

3.5. Sol non labouré.

Sous savane arbustive naturelle il n'y a pas d'érosion du sol. Mais le sol nu, sans travail du sol, a subi une perte en terre de 18 T/ha en 1990, année peu érosive, et de 47 T/ha en 1991 du fait des pluies fortement érosives.

4. Ruissellement en 1990-1991.

En 1990, les résultats sont imparfaits du fait du mauvais fonctionnement des pluviographes. Il n'est rendu compte que des parcelles des stations de Matlalohcan et de Tlalpan. Même en 1991, la mesure du taux de ruissellement "r" est approximative, puisque les cuves ont débordé sur certaines parcelles lors des pluies les plus fortes. Sur ces parcelles les résultats sont probablement sous-estimés.

Sur tepetate nu, t2 et t3, le taux moyen annuel est proche de 70%; mais il atteint au moins 85% lors des plus fortes pluies. Les travaux de sous-solage et de labour réduisent ce taux à 34% sur t2 et à 43% sur t3. L'effet du billonnage et du couvert sous culture de maïs a restreint très fortement le ruissellement en 1990, à 8% sur t3 à Tlalpan; mais sur le même site en 1991 le taux est monté à 21%; cependant sur t2 à El Carmen en 1991 le taux n'est que de 11%. Ces dernières valeurs indiquent probablement un débordement du ruissellement sur les billons, voire une rupture des billons à Tlalpan en 1991, du fait des très fortes pluies. Le ruissellement est très élevé sur la parcelle plantée de Tlaxistle: près de 60% en 1991, un peu moins seulement que sur tepetate nu.

Le sol sous savane naturelle ne présente qu'un faible taux de ruissellement, 10% en 1991; tandis que sur sol nu le taux augmente à 34%.

5. Corrélation entre les coefficients E.I30 et AIm d'érosivité, et les résultats.

Les deux coefficients, l'un de Wischmeier: E.I30 (en unités américaines), l'autre de Lal: AIm, calculés pour l'ensemble des pluies de 1991, ont des valeurs voisines. Ils sont corrélables avec la perte de terre d'un sol nu.

En fait on observe une certaine corrélation entre ces indices et le taux de ruissellement sur le sol nu (0,6) ou sous savane (0,7), et d'autre part l'érosion (0,5) et le ruissellement (0,6) sur le sol nu (pas sous savane).

Sur tepetate (t2 et t3) nu, la corrélation est assez bonne avec le taux de ruissellement (0,7); mais très faible ou nulle avec l'érosion.

Sur tepetate t3 labouré-nu, la corrélation est bonne (0,8) avec l'érosion, mais curieusement très faible (0,2) avec le ruissellement. Sur tepetate t2 labouré-nu, il y a une assez bonne corrélation avec le ruissellement (0,6) et l'érosion (0,5).

Sur les tepetates labourés-billonnés et sous couvert de maïs, il n'y a jamais corrélation avec le ruissellement. Il n'y a pas non plus de corrélation avec l'érosion sur tepetate t2 à El Carmen, avec des pluies modérément érosives; tandis qu'il y en a une assez bonne (0,7) sur tepetate t3 à Tlalpan, du fait de pluies très érosives. L'effet des pluies très érosives est déterminant sur l'évolution des tepetates cultivés, même en présence de billons et sous couvert de maïs.

6. Régime hydrique des tepetates cultivés.

La méthode de mesure (T.D.R.) n'est pas parfaite. Les résultats sont aléatoires quand le sol est proche de la saturation en eau. En outre l'écartement des deux sondes ne demeure pas strictement constant jusqu'à 30 cm de profondeur, ce qui a entraîné une certaine "distorsion" des valeurs mesurées entre 0/15 et 0/30 cm de profondeur (sur les parcelles de Tlalpan et de Matlalohcan). L'avantage est que les mesures sont répétées fréquemment au même endroit sans perturber le sol. Finalement les résultats obtenus en humidité volumique sont comparables à ceux relatés sur les stations proches de Texcoco pour le sol de surface (0/15 cm).

et la courbe d'humidité du tepetate cultivé

On observe un parallèle entre le régime des pluies (0/15 cm) sur la station d'El Carmen (Fig. 18). En profondeur (15/30 cm) la courbe est légèrement déphasée, conformément au temps de latence nécessaire à l'infiltration de l'eau. Le tepetate sous-solé et labouré, sous culture de maïs, se comporte donc comme un sol perméable. La courbe de tension d'humidité est évidemment inverse: la tension augmente en période sèche jusqu'à une valeur proche du point de flétrissement (16 à 20% d'eau en volume); puis diminue en période de pluies fréquentes jusqu'à une valeur proche de la capacité au champ, voire un peu au dessus (PF 2, 32 à 34% d'eau en volume); On atteint une limite de vitesse d'infiltration, due au comportement moins perméable du sous-sol. Les résultats obtenus sur les parcelles de tepetate t3 cultivées en maïs, à El Carmen et à Tlalpan sont similaires. On observe cependant que le régime hydrique est plus régulier, "amortissant" les variations du régime des pluies sur un tepetate cultivé depuis 5 ans, par rapport à celui en première année de culture (de texture plus grossière). Il y a amélioration de la réserve en eau, et donc des propriétés agricoles du tepetate après 5 années de culture.

C. Comparaison des stations de Texcoco et de Tlaxcala; conclusions.

Les quatre stations étudiées ont une situation comparable: tepetates t2 et t3 de propriétés semblables, altitude voisine de 2500-2600 m, pente de 8-9%, régime climatique "ustic" avec 6 mois de saison sèche. Mais la quantité de pluie et surtout l'érosivité des pluies diffère fortement.

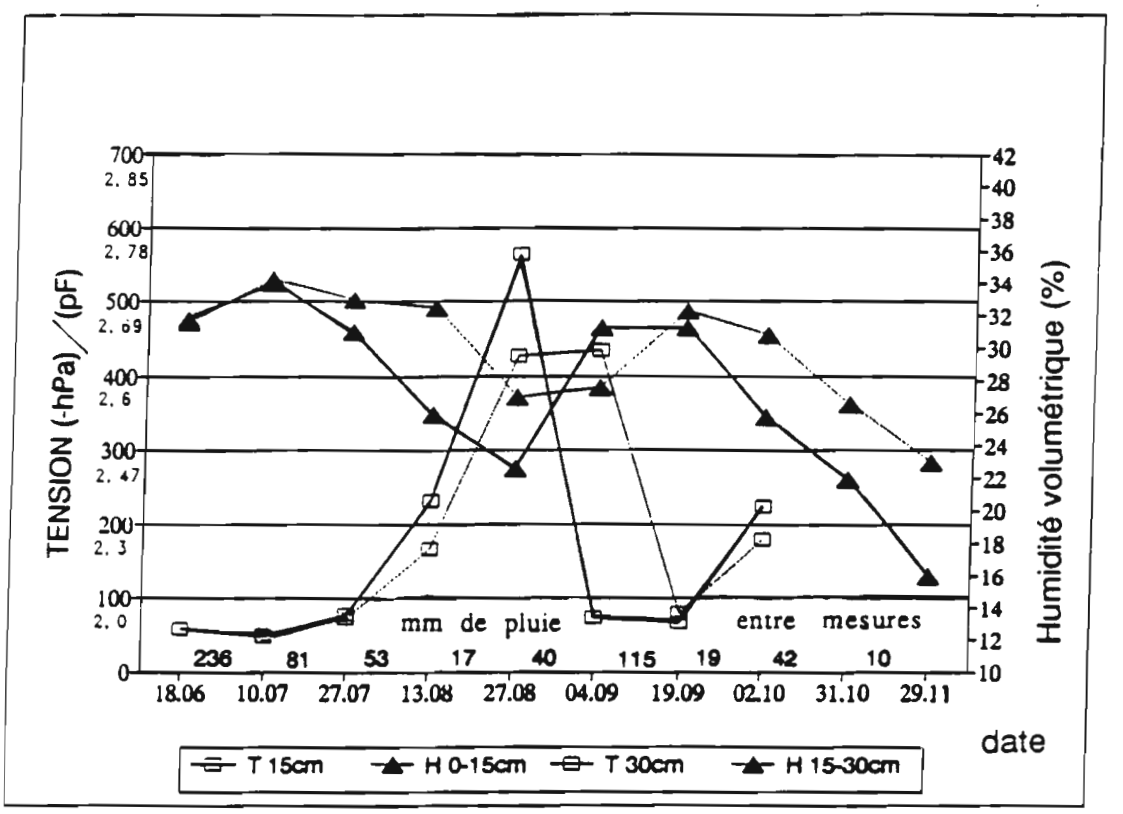


Fig.18. Evolution de l'humidité (%vol.) et de la tension du teptate t2 cultivé en maïs, en 1991; El Carmen.

1. Erosivité des pluies.

La pluviosité a été supérieure de 100 mm sur le versant de Tlaxcala par rapport à Texcoco. L'érosivité globale des pluies en E.I30 (u. amér.) augmente de 200 à San Miguel Tlaixpan (Texcoco) à 234, 357 et 429, successivement à El Carmen, Tlalpan et Matlalohcan. En région "tropicale sèche", le rang de variation est de 200 à 600 (Roose, 1981). L'érosivité moyenne observée en 1991 varie donc de faible à moyenne. En fait le nombre de pluies effectivement érosives est très réduit; c'est le nombre et l'intensité de ces pluies qui fait la différence d'une station à l'autre: 1 à 2 pluies moyennement érosives à El Carmen, 2 pluies fortement érosives et 3 pluies moyennement érosives à Tlalpan; 1 pluie fortement érosive et 3 pluies moyennement érosives à Matlalohcan. Ces pluies causent à elles seules 60 à 80% de l'érosion totale. Les pluies fortement érosives peuvent être classées d'après les paramètres I30 > 50 mm et E.I30 ~ 20-50. Une seule pluie fortement érosive provoque une forte érosion. 2 à 3

2. Ruissellement, pertes en terre, effet des traitements sur l'érodibilité.

Les tepetates t2 et t3 à nu ont un comportement peu différent. Le taux de ruissellement moyen annuel est de 70%; il atteint 80 à 90% lors des fortes pluies; l'érosion est de 5 T/ha/an sur la station la moins érosive (Texcoco) et de près de 10 T/ha/an sur la plus érosive (Matlalohcan).

Le sous-solage d'un tepetate réduit de près de moitié (40%) le taux de ruissellement en provoquant l'infiltration.

L'effet du sous-solage et du labour est variable selon l'érosivité des pluies: Sur la station la moins érosive le taux de ruissellement est de 10-20% et l'érosion de 21 T/ha. Dans la région de Tlaxcala, pour des pluies plus intenses le ruissellement atteint 30-40%; et surtout l'érosion augmente rapidement de 72-78 T/ha pour des pluies moyennement érosives à 128 T/ha pour des pluies fortement érosives. Sans ouvrage anti-érosif, le tepetate labouré est donc fortement érodible.

L'effet du billonnage sur sol non couvert ou planté en maïs, est spectaculaire sur la station la moins érosive: Le ruissellement est réduit à 5% et l'érosion à 1 T/ha. Mais le ruissellement augmente avec l'intensité des pluies: à 10% sur la station modérément érosive, à 20% sur la station la plus érosive; et surtout l'érosion s'accroît sensiblement, à 23 T/ha sur tepetate t2 à El Carmen et à 26 T/ha sur t3 à Tlalpan. A partir d'un certain seuil, le ruissellement n'est plus contenu et il y a risque de rupture de billons et d'érosion forte. L'effet du couvert de maïs, trop tardif, n'est pas évident.

Le sol sous savane arbustive naturelle a un faible taux de ruissellement:10%, et pratiquement pas d'érosion. Sur le même sol privé de son manteau végétal, en station la plus érosive, le taux de ruissellement monte à 34% et la perte en terre à 47 T/ha. Le sol labouré et billonné, à nu, sur la station la moins érosive, a un taux de ruissellement de 12% et une érosion de 1 T/ha seulement; le résultat est identique sur sol planté en maïs. En cas de pluie faiblement érosive, le billonnage suffit à contrôler ruissellement et érosion.

Les résultats sont comparables à ceux mesurés en région "tropicale sèche" sur sols "ferrugineux tropicaux", pour une pluviosité annuelle moyenne de 850 mm (Roose, 1981), en ce qui concerne le taux de ruissellement sur sol sous savane: 10-15%, sur sol nu: 35-43% et sur sol cultivé: 10-40%. Mais les taux d'érosion sont là moins élevés que sur sols et tepetates du Mexique; sol sous savane: 0,2-0,7 T/ha; sol nu: 10-35 T/ha; sol cultivé: 1-14 T/ha.

Les mêmes résultats sont encore comparables à ceux obtenus en Equateur sur Cangahua, matériau semblable aux tepetates (Custode, de Noni et al., 1992), sur une période de 5 années (1987-1991). Dans ce cas la cangahua nue est sarclée en surface, donc comparable au tepetate cultivé, nu.

Pluviosité (moyenne 660 mm, varie de à 490-750 mm)	taux r, % moyen	maxi	érosion T/ha
Cangahua nue	20-34	60-90	96,6
culture traditionnelle	7-14	30-55	18,9
culture améliorée	2-9	9-55	4,5

3. Evolution des états de surface.

L'observation de l'évolution des états de surface, ainsi que de la porosité, de la perméabilité et de l'humidité dans la partie supérieure du tepetate cultivé et du sol, ont permis de suivre le processus qui conditionne le comportement au ruissellement et à l'érosion. Le comportement se modifie rapidement par suite de formation de croûtes superficielles, structurales sur les reliefs ou de dépôt dans les dépressions. L'évolution est plus rapide sur sol que sur tepetate fragmenté; sur ce dernier, le processus s'accélère à la suite du travail répété du sol (sarclages). Une fragmentation excessive du tepetate, inférieure à 2 mm, favorise la fonte des agrégats et l'encroûtement; l'infiltration diminue, ruissellement et érosion augmentent. Contrairement à ce que l'on pensait, le tepetate labouré n'est pas parfaitement stable; il se fragmente, se tasse et s'encroûte. Sans façon culturale anti-érosive (billon), il est très érodible par de fortes pluies; même le billonnage peut devenir insuffisant. La méthode mexicaine de billonnage du maïs, en multipliant les opérations de fragmentation, est dangereuse. Il conviendrait de faire le billon en une seule fois et de planter directement le maïs sur le billon. En outre, les billons devraient être cloisonnés, pour réduire les risques de rupture brutale en cas de forte pluies.

IV REHABILITATION DE LA FERTILITE DES TEPETATES

Dans le chapitre II "Caractérisation des sols et tepetates", nous avons évoqué les propriétés physiques et chimiques des tepetates, qui limitent leur fertilité potentielle, à savoir: 1° Leur compacité et leur macroporosité accessible à l'air trop restreinte; en conséquence une faible perméabilité et une restriction au développement des racines des plantes - 2° Leur déficience en azote et en phosphore assimilable.

Dans le chapitre III "Erosion et conservation des sols et tepetates", nous avons vu comment une fragmentation appropriée du tepetate améliore l'infiltration et le stockage des eaux de pluie, ainsi que la macroporosité, développant ainsi les propriétés physiques d'un sol agricole.

Ce quatrième chapitre traite: 1° de la détermination au laboratoire de la fertilité chimique potentielle des tepetates et de la dynamique des éléments P et K; 2° des études agronomiques au champ, en milieu paysan, concernant l'évaluation des rendements des cultures et les conditions d'acquisition de ces productions.

1. Détermination de la fertilité chimique, au laboratoire.

Les résultats ont été présentés par J. Etchevers (1992). Les analyses ont été faites en majeure partie au Laboratoire de Fertilité des Sols du CPM et en moindre part au Laboratoire de chimie de l'ORSTOM (Bondy).

1.1. Essais en vases de végétation, détermination des éléments limitants.

a. Méthode: Il s'agit de la méthode de Chaminade (1964) appliquée à cinq échantillons de tepetate fragmenté (t2 et t3, avec ou sans $CaCO_3$) de la vallée de Mexico. La fertilité est appréciée par le développement de Lolium perenne, en poids sec de 4 coupes successives.

Tous les échantillons, y compris le Témoin, ont reçu un apport d'azote, considérant qu'il y toujours carence en cet élément. On a comparé à un essai avec fertilisation minérale complète (N, P, K, Ca, Mg, micro-éléments), le témoin (+ N), et 6 traitements avec l'un des éléments manquant (P ou K, Ca, Mg, S, micro-éléments). L'efficacité de chaque traitement a été calculée en pourcentage de la matière sèche cumulée par rapport au rendement du traitement optimum avec fertilisation complète; on a calculé aussi le taux moyen de matière sèche produite par jour pour chaque traitement.

b. Tableau des résultats:

Traitement	T	P	K	Ca	S	Micro*	Tot	Mg
R % Tot.	26	28	106	107	108	108	100	-
TMS/J	70	79	295	312	305	307	289	297

T: témoin - Tot: fertilisation complète - R %Tot.: % de matière/Traitement Total - TMS/J: taux de matière sèche par jour.

Il y a donc carence en phosphore. Sans cet élément, comme dans le cas du témoin, la plante se développe mal, même en présence d'azote et de tous les autres éléments utiles à la plante. Ces autres éléments (K, Ca, Mg, S, microéléments*) sont fournis en quantité suffisante par tous les tepetates testés (la déficience en Cu et Zn suggérée par l'analyse chimique n'est pas détectée par cette méthode). N et P sont donc les deux éléments limitants majeurs de la fertilité potentielle des tepetates.

1.2. Analyse chimique de la dynamique du Phophore et du Potassium.

a. Méthode et échantillons.

a1. Méthodes: Il s'agit de doser différentes formes des éléments P et K: "soluble" et directement assimilable pour la plante; "labile" ou "échangeable", adsorbée sur les argiles et facilement convertible en formes solubles; "non-labile", incluse dans la fraction minérale, insoluble ou lentement convertible en forme labile, puis soluble (réserve minérale).

On a fait les analyses suivantes: P et K "total" obtenu par fusion complète; P et K "extractible", dissous dans les acides forts(HNO_3 - $HClO_4$); P "labile", dissous par bicarbonate de Na (pH: 8,5 Olsen); K "échangeable" extrait par Acétate d'ammonium (Ph: 7); K "soluble" dans le $CaCl_2$ (0,01M); P "soluble" est trop infime pour être dosé. P et K extractibles sont les réserves susceptibles de se tranformer en P labile ou en K échangeable, puis en formes solubles.

L'analyse de la dynamique des éléments P et K consiste en une "incubation" de l'échantillon de sol dans une solution* de phosphate monopotassique, contenant 80 ppm de P et 100 ppm de K, pendant 2 mois. (* sous forme de poudre, humidifiée à la capacité au champ, ou sous forme liquide; mis à l'étuve à 30°C).

L'extraction de P labile après 1 jour, donne la valeur bP (teneur de P Olsen extrait/P ajouté : 80 ppm). Ce coefficient correspond au phosphore rapidement fixé, mais encore labile. Les valeurs suivantes obtenues à divers intervalles de temps, pendant 2 mois, voire 3 mois pour quelques échantillons, permettent d'observer s'il y a ou non variation de bP, c'est à dire en cas de diminution s'il y a fixation énergique de P sous une forme "non labile". L'équation de la courbe obtenue permet de calculer la valeur kP, limite probable au bout d'un an d'incubation, c'est à dire l'équilibre sol/solution. Les mesures de K soluble et de K échangeable permettent d'évaluer la relation d'équilibre entre les deux formes et de suivre cette évolution au cours du temps.

a2. Echantillons: Il s'agit du tepetate cultivé ou du sol, de 0-20 cm de profondeur. Ces échantillons (25 au total) ont été choisis en fonction du type de tepetate t2 ou t3, et de sa durée de mise en culture, sur 2 stations: Hueyotlipan (vallée de Tlaxcala) et San Pablo (vallée de Mexico). Pour simplifier, les résultats sont regroupés en périodes de 0 an (1ère année de culture), 1 à 3, 4 à 5 et 9 à 15 ans. Les sols de référence sont cultivés depuis plus de 15 ans.

b. Résultats.

Pour information préalable, nous rappelons quelques valeurs de P et K déterminées dans 3 horizons de tepetate (profil P 30), en $^0/_{00}$.

	P tot	P ext	P rés	K tot	K ext	K rés
t2a	0,43	0,29	O,14	14,5	2,6	11,9
t2b	0,32	0,25	0,07	8,3	3,3	5
t3	0,48	0,36	0,12	7	2,4	4,6

P, K, tot: total - P, K, ext: extrait triacide (argiles, oxides) - P, K, rés: résidu insoluble (minéraux primaires).

Ces premiers résultats rappellent qu'il y a peu de phosphore minéral susceptible d'être solubilisé et disponible. Mais il y a beaucoup de potassium, dont une part "extractible" importante susceptible de se transformer en forme échangeable soluble.

Les résultats de cette étude de la dynamique de P et K sont rassemblés dans le tableau suivant.

Tepetate Station	années culture	Nb éch.	pH (eau)	Phosphore				Potassium		
				Pext ppm	Plab ppm	bP	kP	Kext ‰	K sol me/100g	Kech me/100g
t3-H	0	6	7,1	190	3	0,58	0,71	2,1	0,44	1,52
	1-2-3	3	6,9	210	3,5	0,58	0,7	2	0,32	1,11
	4-5	2	6,6	220	4,8	0,61	0,71	2	0,33	1,12
	10-15	2	6,5	230	12,2	0,59	0,84	2	0,49	1,46
t3-SP	0	2	7,1	170	2,4	0,64	0,56	1,9	0,37	1,38
	4	1	7,5	370	51,5	0,55	0,78	2,9	1,85	4,5
	9	1	7,4	200	4,3	0,63	0,55	1,5	0,27	1,08
t2-H	0	2	7,7	100	2,7	0,72	0,73	2,3	0,53	1,96
	1	1	8	110	3,2	0,72	0,79	2	0,52	1,5
	4	1	7,3	120	5,2	0,61	0,64	2	0,57	2,01
Sol H	30	2	6,4	330	37,1	0,58	0,76	1,6	0,47	1,07
SP	16-60	2	6,4	260	11	0,56	0,58	1,8	0,14	0,53

H: Hueyotlipan - SP: San Pablo - Pext, K ext: P ou K extractibles - Plab: P labile (Olsen) - Ksol: K soluble - Kéch: K échangeable - bP: Plab 1 jour/P ajouté (80 ppm) - kP: limite Plab/Pajouté en 1 an.

b1. Phosphore: La valeur bP montre que le phosphore ajouté est rapidement adsorbé, mais surtout sous une forme labile: près de 60% par le tepetate t3 et de 70% par le tepetate t2. Ce taux est spécifique du matériau; il ne varie pas après 5, 10 ou 15 ans de culture. La valeur kP indique que la relation d'équilibre entre formes labile et non labile de P est peu variable au cours de l'incubation; donc il n'y a pas transformation progressive du phosphore fixé sous une forme non labile. On peut affirmer qu'une fertilisation phosphatée du tepetate sera en majeure partie disponible pour les plantes.

Les teneurs en P extractible et en P labile ont augmenté un peu en fonction du nombre d'années de culture, se rapprochant peu à peu des niveaux mesurés dans les sols cultivés depuis 30 ans et plus. Le phosphore adsorbé étant peu mobile, il conviendrait d'augmenter les doses de fertilisation au cours des trois premières années de culture, puis de les limiter ensuite aux besoins de la plante cultivée.

b2. Potassium. Les teneurs en K extractible, environ 2‰, et en K échangeable, 1 à 2 me/100g, sont toujours un peu plus élevées dans les tepetates t2 et t3 que dans les sols cultivés. Ces valeurs se maintiennent ou diminuent faiblement après 5, 10, ou 15 années de culture des tepetates, sans aucun apport de cet élément. En proportion la forme soluble représente 30% de la forme échangeable. Il n'y a donc pas de problème de nutrition des plantes en potassium.

La réserve en potassium extractible est suffisante pour maintenir le renouvellement du stock de potassium échangeable pendant de nombreuses années (au moins 30 ans), comme on l'observe dans les sols cultivés. Il y a très probablement une adsorption sélective* de K par rapport à Ca sur les argiles des tepetates, permettant ainsi de maintenir des teneurs élevées en potassium échangeable; (* au cours de l'altération du matériau volcanique, le rapport K/Ca augmente dans le produit argileux).

2. Etude de la productivité agricole des tepetates.

Cette étude a d'abord consisté en une enquête sur la productivité agricole en milieu paysan, pour déterminer certains facteurs du rendement; puis une expérimentation agronomique en station, pour évaluer la productivité potentielle; enfin une enquête sur les systèmes économiques familiaux (SEF), pour analyser les facteurs économiques et la rentabilité de la production agricole sur des tepetates réhabilités en sols agricoles. Une synthèse des premiers résultats concernant les deux premiers thèmes a été faite par H. Navarro et C. Zebrowski (1992); P. Zahonero (1992) a rendu compte de la troisième étude.

2.1. Productivité agricole en milieu paysan.

a. Une première enquête a été faite en 1989 (Peña, Ortiz et al., 1990), sur quatorze parcelles cultivées en maïs: 4 sur tepetate t2, 5 sur t3, 4 sur "brèche volcanique altérée", et 1 sur sol.

Le rendement du maïs en vert et en grain a été comparé avec plusieurs facteurs de production: type du tepetate, âge de mise en culture, fertilisation (N,P), propriétés chimiques du sol (pH, C, N, P et K), effet du climat (zone plus sèche, zone plus humide) ou de l'irrigation en zone sèche, et façons culturales. Il n'y a pas eu de "suivi agronomique" systématique. Les rendements en grain du maïs sont les suivants.

- en "zone sèche": sur t2 et t3, 0 sans irrigation; 1,2 à 2,4 T/ha avec irrigation (et fertilisation).

- en "zone humide": sur t2 et t3, 2,2 à 3,8 T/ha après 5 ans de culture; sur brèche, 0,5 à 1 T/ha, mais en début de culture.

Les premières conclusions sont les suivantes: Les tepetates t2 et t3, après 5 années de culture peuvent fournir de bonnes productions en climat assez humide, ou avec irrigation d'appoint en zone plus sèche. Mais au cours des premières années sur brèche les rendements sont très faibles. La fertilisation pratiquée par les paysans est très variable; elle n'est efficace que si l'approvisionnement en eau est suffisant, et les façons culturales bien conduites.Il n'y a pas de différence significative de productivité entre tepetates t2 et t3.

b. Un suivi agronomique systématique a été fait en 1990 (Gasnier, 1991; Navarro et Zebrowski, 1991) sur 8 parcelles en maïs (5 sur tepetates t3 et 3 sur sol); 4 parcelles en blé (3 sur t3 et 1 sur sol). Le suivi a comporté une analyse des composantes du rendement, ainsi que de l'humidité et de la fertilité chimique du sol.

Le facteur principal affectant le rendement des cultures de maïs, l'humidité du sol étant toujours suffisante en 1990, a été l'âge de la mise en culture du tepetate: en 1ère année 0,4 T/ha; en 3ème année 2,2 à 2,5 T/ha; en 5ème année 2,5 à 3,1 T/ha; et sur sol cultivé depuis longtemps, 1,4 à 3,3 T/ha. Donc la production de maïs est normale dès la troisième année de culture.

En ce qui concerne le blé, la production est déjà presque normale dès la 1ère année. On a obtenu sur tepetate: en 1ère année, 1,5 T/ha; en 3ème année 1,4 à 1,5 T/ha; et sur sol 2,3 T/ha.

Le suivi agronomique a été renouvelé en 1991 par P. Zahonero et H. Navarro; mais leurs résultats ne sont pas encore publiés.

2.2. Expérimentation en station.

a. Essais sur tepetate t3 à Tlalpan, réalisés par A. Marquez, C. Zebrowski et H. Navarro, en 1991.

Deux problèmes ont été abordés: 1° comment augmenter la production en première année de culture d'un tepetate, par le choix de la culture et des façons culturales adéquates; 2° comment améliorer les propriétés des tepetates, par des apports de matière organique (et implicitement d'azote et phosphore), en développant une macrostructure stable (meilleure porosité à l'air et bon stockage de l'eau), dans des conditions compatibles avec l'agriculture paysanne.

Les plantes cultivées sont: blé, maïs, fève, haricot, vesce (fourrage et engrais-vert). L'apport de matière organique, en fumier, a été de 40 T/ha. La fertilisation minérale a toujours comporté P 60 unités, et testé 3 doses de N: 0, 60 et 120 unités; jamais de K.

Sur les parcelles en tepetate roturé, on a observé un gradient d'accroissement des particules fines et de la profondeur de sol meuble vers l'aval. Deux cas ont été distingués suivant la texture: à texture fine (< 2 mm), à texture grossière (> 2 mm).

La pluviosité a été suffisante pendant l'ensemble de la saison des pluies; bien qu'une période moins pluvieuse ait eu lieu en août (100 mm) et en octobre (70 mm). Le suivi d'humidité du sol (entre 15 et 30 cm) montre que le point de flétrissement n'a pas été atteint sur le bas des parcelles à texture fine, mais qu'il l'a été sur le haut des parcelles à texture grossière vers la fin d'août (après 2 semaines sans pluies).

Deux facteurs du sol de tepetate roturé, en 1ère année de culture, ont influencé très fortement le rendement des cultures, surtout celles de maïs et de haricot: la texture grossière et l'absence d'apport de matière organique. Dans ces deux cas, les rendements sont très faibles. Alors que la conjonction des deux facteurs, texture fine + fumier (40 T/ha), permet de meilleurs rendements (fig. 19). Seule la vesce peut assurer une production importante en l'absence d'apport organique sur sol à texture fine.

Sans apport de fumier, maïs et haricot ne peuvent produire ou n'ont que des rendements très faibles, quelle que soit la fertilisation minérale, même sur des sols à texture fine. Tandis que pour le blé et la fève les rendements sur sol de tepetate roturé à texture fine augmentent en fonction de la dose de fertilisant azoté (P étant toujours fourni à 60 unités). Pour le blé (fig. 20) les rendements croissent de 2 à 3,5 T/ha sans apport de fumier; (ils atteignent près de 6 T/ha avec apport de fumier).

Avec apport de fumier, sur sol de tepetate roturé à texture fine, il y a toujours de bons rendements pour les cultures de blé, de vesce et de fève, quelle que soit la dose d'azote ajoutée (P étant toujours fourni à 60 unités). On observe même sur le blé un effet dépressif de l'azote, puisque les rendements diminuent avec les doses croissante de N. Dans le cas du maïs et du haricot, la production est améliorée, mais demeure en dessous d'une production normale: maïs 0,2-0,3 T/ha au lieu de 1,8 T/ha; haricot: 0,2-0,3 T/ha au lieu de 0,75 T/ha. Pour ces deux plantes, l'apport d'azote n'améliore pas les rendements.

Il n'est pas possible d'expliquer pourquoi le maïs et le haricot ont une faible production en première année sur un sol de tepetate roturé à texture fine, suffisamment fertilisé; puisque d'autres plantes (blé, vesce, fève, Lolium pérenne) y ont une production normale. Il faut orienter la recherche vers une cause biologique (absence d'un microorganisme végétal symbiote de ces plantes); car le développement et le rendement deviennent normaux après 3 à 5 années de culture.

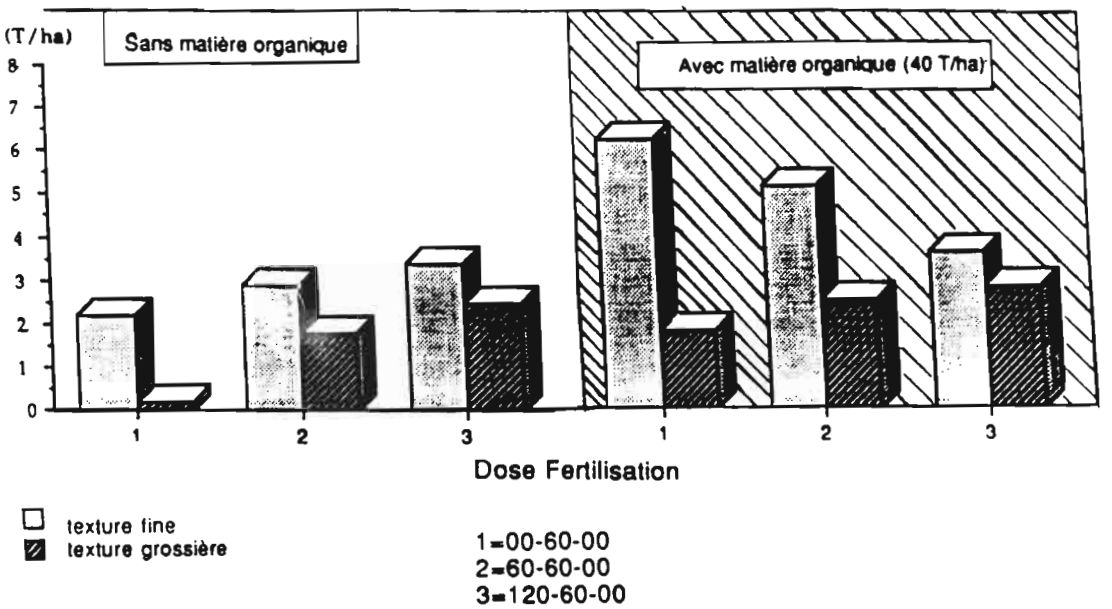


Fig.19. Effet des traitements sur le rendement du blé en grain (T/ha) en 1ère année de culture du tepetate.

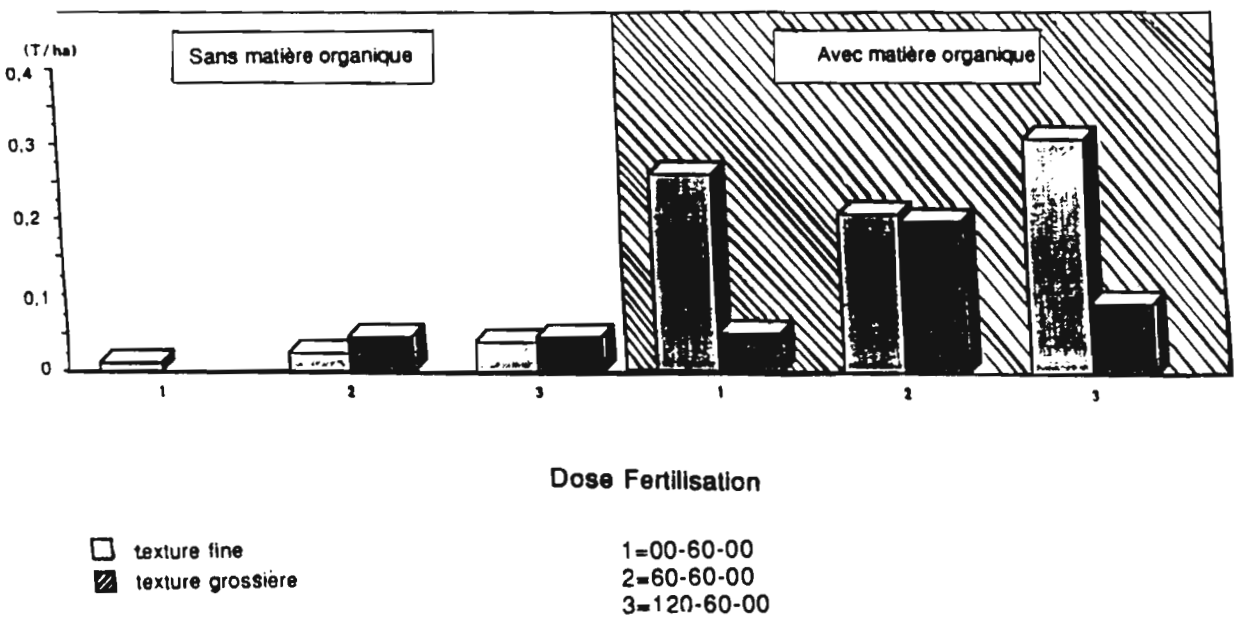


Fig.20. Effet des traitements sur le rendement du maïs en grain (T/ha) en 1ère année de culture du tepetate.

En conclusion: les tepetates "roturés" peuvent produire en première année de culture pour le blé, la vesce et la fève; mais pas pour le maïs et le haricot.

Il est nécessaire de préparer une texture suffisamment fine (<2 mm). Sans apport de fumier, avec une fertilisation minérale de N 120 u et P 60 u, le blé peut produire 4 T/ha, la vesce 4 T/ha et la fève 0,4 T/ha. Avec apport de fumier (40 T/ha) et 60 unités de P,mais sans complément d'azote, le blé peut produire 6 T/ha, la vesce 6 T/ha et la fève 0,8 T/ha. Dans ce cas une fertilisation azotée est inutile, voire dépressive pour le blé.

Une recherche doit être entreprise pour déterminer la cause du mauvais rendement du maïs et du haricot en première année.

En vue de résoudre le problème de la fertilisation organique des sols de tepetate roturé, en l'absence de fumier ou de compost, la vesce ou une graminée fourragère pourraient être utilisées comme engrais vert.

b. Essais du CIFAP, sur tepetate t2 à El Carmen, en 1991.

Les résultats de ces essais n'ont pas été publiés. On a noté cependant l'intérêt d'une autre espèce de haricot (Ayocote: Phaseolus coccineus) en première année de culture.

2.3. Analyse des composantes du rendement et des facteurs de production.

Ceci est une première synthèse du suivi agronomique en parcelles paysannes (Navarro et Zebrowski, 1992).

a. Evolution des propriétés du tepetate en fonction du temps de culture.

a.1. Propriétés chimiques: on observe une faible diminution du pH, une certaine stabilité de K échangeable et un accroissement sensible des teneurs en matière organique, azote et P assimilable, (Fig. 21). Il y a donc amélioration de la fertilité chimique.

a.2. Propriétés physiques:

La profondeur de sol meuble obtenue après "roturation" diminue après 5 ans de mise en culture. C'est l'effet du tassement et peut-être de l'érosion. Il faut refaire un sous-solage et un labour profond tous les 5 ans.

La texture des tepetate bien "roturés" comporte au moins 50% de fraction < 2 mm. La structure reste stable après 5 ans de culture. Mais on n'a pas montré l'intérêt d'une fumure organique sur l'amélioration de la structure.

b. Analyse des composantes du rendement et des facteurs de production.

b.1. Suivi du maïs: En première année de culture, le mauvais rendement du maïs s'explique par un nombre réduit de plants. Il y a donc un facteur limitant au développement des jeunes plants. En l'absence de cause physique ou chimique, pour le cas des tepetates bien préparés (voir précédemment), il faut rechercher une cause biologique. En effet, avec le temps, le nombre de plants et le rendement augmentent, pour atteindre des valeurs normales après 3 à 5 ans de culture.

L'approvisionnement en eau du maïs peut être un facteur limitant, soit en début de culture, soit au moment de la floraison (petite sécheresse d'août). Certaines façons culturales paysannes: "contreo" (billonnage cloisonné), mulching, cultures associées (maïs-haricot ou maïs-fève), devraient être généralisées.

La fertilisation chimique avec 60 unités de phosphore semble suffisante. Le diagnostic foliaire ne décèle pas de déficience en P, mais en N. L'azote est le principal facteur du rendement; il conditionne le nombre d'épis et de grains et le poids de grain (poids de 100 grains). Une dose de 60 unités pourrait être suffisante pour un rendement normal; mais 120 unités (en deux apports suc-/-

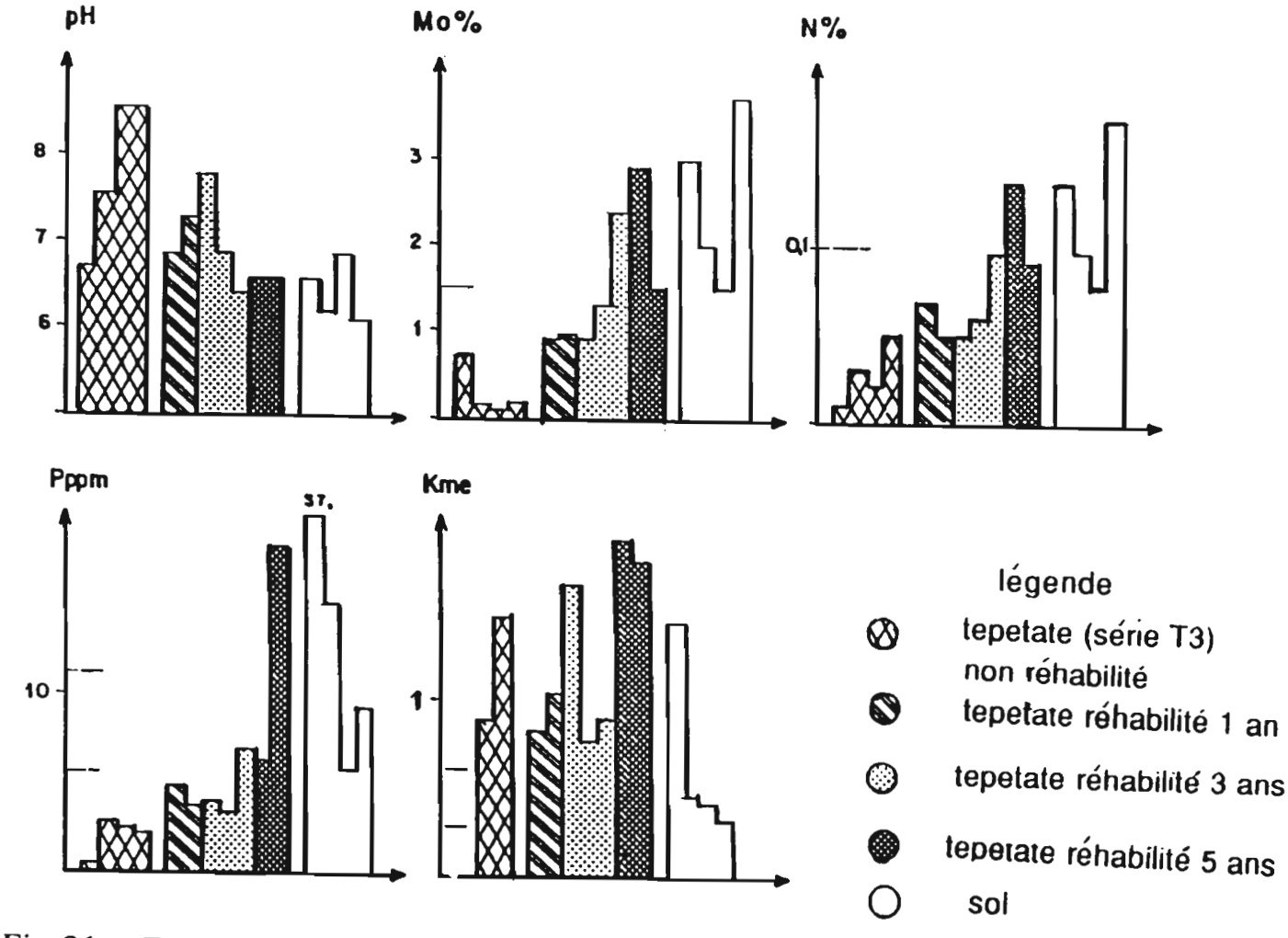


Fig.21. Evolution des propriétés chimiques des tepetates en fonction de l'âge de leur mise en culture (parcelles de 1990).

-cessifs) sont nécessaires pour un rendement optimum, en l'absence de fertilisation organique.

b.2. Suivi du blé: le rendement sur tepetate semble indépendant de l'âge de la mise en culture. Nous avons vu que son rendement est fonction de la fertilisation minérale azotée en l'absence de fumure organique; mais non après apport de fumier.

2.4. Suivi socio-économique des systèmes économiques familiaux et rentabilité.

L'étude de P. Zahonero (1992) montre une certaine spécifité de l'agriculture sur tepetate roturé.

a. Le tepetate est une ressource en terre agricole, pour les petites exploitations. Il représente en % de Surface Agricole Utile, 100% pour les exploitations de moins de 5 ha, 32% de 5 à 10 ha, 15% de 10 à 20 ha, moins de 5% pour plus de 20 ha.

Les tepetates roturés sont cultivés en terrasse, suivant le système du "metepantle", déjà pratiqué à l'époque préhispanique. Ceci est une mesure efficace contre l'érosion. Les travaux de sous-solage profond et de terrassement bénéficient de l'aide des services gouvernementaux de chaque Etat; mais les paysans en paient 80 à 90% du coût.

b. Il y a une rotation culturale et des cultures spécifiques sur tepetate.

- En 1ère année: 80% céréales (blé-orge), 20% maïs-haricot
- En 2ème et 3ème années: 33% céréales, 32% maïs, 35% maïs-haricot-fève
- En 4ème et 5ème années: 50% blé, 50% maïs (seul ou associé).

Sur tepetate les cultures traditionnelles pour la consommation familiale prédominent; alors que sur sol les cultures de rente (blé et orge) représentent 82% de la surface agricole. L'importance des surfaces destinées à la nourriture du bétail, est nulle ou très limitée.

c. Il y a des façons culturales et une fertilisation spécifiques.

Pour la culture du maïs, le paysan fait en mai-juin un sarclage supplémentaire pour économiser un traitement herbicide. Il ne renouvelle pas l'apport d'azote en juin, mais il apporte plus de phosphore que sur sol normal. Finalement il apporte 40 unités de N au lieu de 60-70, 50 unités de P au lieu de 25-30 sur sol.

d. Les coûts de la réhabilitation, en travail du sol, sont rentabilisés en 8 ans.

La "roturation" et le terrassement (sans apport de fertilisants) coûtent au paysan (après déduction de la participation de l'Etat), environ 3.500.000 pesos, plus 500.000 pesos pour un nouveau sous-solage après 5 ans; soit 4 millions de pesos* (8000 FF ou 1200 Ecus) à amortir sur 8 années. *(Zebrowski estime ces coûts en 1991 entre 5 et 8 millions de pesos). Les coûts de production cumulés sur 8 ans se montent à environ 7 millions de pesos. Il faut donc investir 11 millions de pesos. La valeur cumulée des récoltes sur 8 ans serait de 11,5 millions de pesos. Donc l'ensemble de l'investissement peut, selon P. Zahonero, être amorti en 8 ans. Ensuite la production sera bénéficiaire pour le paysan.

e. Il y a une plus-value des tepetates réhabilités en sols agricoles.

La valeur initiale du tepetate stérile est de 2 millions de pesos. Elle devient 7 millions en terre agricole fertile. En six ans de culture, la plus-value nette serait de 3,5 millions de pesos.

f. Bilan de rentabilité des investissements.

Il s'agit de la rentabilité de l'investissement financier, pour payer les frais initiaux de la roturation et du terrassement des tepetates.

Les petites exploitations de moins de 10 ha, vivent en auto-subsistance et ne dégagent pas suffisamment de capital pour investir. Elles ne peuvent emprunter. Elles nécessitent soit une aide de l'Etat, soit un apport de salaires extérieurs des membres de la communauté agricole (6 mois de salaire minimum/ha).

Les exploitations de 15 ha et plus, avec des cultures de rente, et éventuellement un complément de salaires extérieurs, peuvent dégager assez de ressources financières propres pour payer l'investissement.

En conclusion, la mise en valeur agricole des tepetates a un caractère spécifique. Les cultures vivrières prédominent; les façons culturales sont appropriées. La réhabilitation des tepetates crée une ressource en terre nécessaire pour les petites exploitations agricoles. Elle peut être rentable, à moindre coût, si l'exploitation dégage assez de ressources financières propres pour investir, soit en culture de rente sur les unités de production supérieures à 15 ha de SAU, soit par un apport de salaires extérieurs des membres de la communauté agricole. Une aide de l'Etat demeure utile, voire nécessaire, pour financer à coût minimum les travaux de sous-solage et de terrassement.

CONCLUSIONS

Les principaux résultats de l'étude des tepetates de Mexico et de Tlaxcala concernent successivement: la cartographie des sols et tepetates, puis la caractérisation des tepetates, l'impact des travaux de réhabilitation agricole sur la susceptibilité des tepetates à l'érosion, l'évolution de leurs propriétés physiques et chimiques, les facteurs physiques majeurs de leur fertilité potentielle, leur productivité agricole en milieu paysan, l'analyse des composantes du rendement des cultures et des facteurs physiques de leur production, enfin les facteurs socio-économiques de leur mise en valeur et la rentabilité de leur exploitation.

1. Cartographie des sols et tepetates.

Deux cartes ont été dressées à l'échelle du 1/50.000ème: La feuille de Texcoco sur le versant Nord-Ouest de la Sierra Nevada, sur environ 1023 km^2; la feuille d'Apan au Nord-Est de la Sierra, sur environ 700 km^2. De ces cartes et des études pédologiques ressortent les faits suivants:

Les sols sont distribués en climotoposéquences sur les versants et piémonts de la sierra. La nature des sols dépend d'une certaine zonalité climatique, d'un régime humide au sommet à subaride en plaine. D'amont en aval on observe successivement: andosols, sols bruns eutrophes, sols bruns vertiques, sols bruns subarides à croûte calcaire. Les sols sont formés sur une succession de dépôts volcaniques pyroclastiques (cendres et tufs), d'âge quaternaire récent. Ce sont des sols jeunes et complexes.

Sur les piémonts et glacis, en climat à saison sèche marquée, les sols comportent deux ou plusieurs horizons indurés, appelés tepetates. Certains des tepetates, sur la partie supérieure et moyenne des piémonts, sont friables à l'état humide et ont un comportement de "fragipan". D'autres, en bas de piémont et sur les glacis, sont encroûtés de calcaire et demeurent durs (horizons pétrocalciques).

Dans la région de Texcoco, les sols à tepetate couvrent 420 km^2, soit 41% de la superficie totale, (mais près de la totalité des piémonts, plateaux et glacis, où se situe principalement l'agriculture vivrière traditionnelle). Près du tiers de ces sols sont érodés et le tepetate affleure. La surface ainsi stérilisée est d'environ 14.200 ha. Ceci est grave, car elle concerne les terres vouées à l'agriculture vivrière, et occupées par la majorité de la population agricole. De cette surface stérile, depuis une vingtaine d'années près de 5000 ha ont été restaurés; mais 4100 ha en reboisement pour contrôler l'érosion, et seulement 800 ha aménagés en terrasses agricoles. Il reste donc 9000 ha à remettre en valeur, si l'érosion ne progresse pas davantage.

2. Caractérisation des tepetates.

La nature et l'origine des dépôts pyroclastiques ont été précisées. Ce sont des cendres fines, rhyolitiques ou dacitiques, très siliceuses et alcalines (riches en Na et K).

On observe une succession stratigraphique de dépôts holocènes H et T_1, puis du Pléistocène supérieur T_2, T_3, T_4 etc... Ces dépôts ont été datés T_1 moins de 10.000 ans BP, T_2 entre 10.000 et 20.000 BP, T_3 plus de 20.000 BP.

Les cendres volcaniques ont été altérées en sol. Chacun des dépôts T2 et T3 comporte des horizons meubles apparentés à des horizons "B", et un ou deux horizons indurés, à comportement de tuf, apparentés à des horizons "C"; ceux-ci sont appelés "tepetates"; mais rarement il peut présenter un tuf quasi inaltéré.

L'analogie de ces dépôts avec des formations de loess est remise en question. Ils ont les caractères de dépôts de cendres volcaniques, de nuées ardentes, qui ont subi une altération météorique des verres en minéraux argileux; mais ils n'ont pas une texture spécifique de loess; bien que des remaniements éoliens ou colluviaux superficiels soient localement observés.

La clé de classification des tepetates ne doit plus être la couleur. Tous les tepetates ne sont pas des "duripans". Un tepetate sera classé par son appartenance à une série stratigraphique: T_2, T_3, etc., et par son comportement de fragipan ou d'horizon pétrocalcique. D'autres caractères peuvent être ajoutés. La minéralogie: en T_2 abondance d'hypersthène et de smectites, en T_3 prédominance de hornblende et d'halloysite. La couleur: blanchâtre ou grise en T_2, brune ou brun-rouge en T_3. L'abondance d'halloysite en T_3 signifie une altération météorique en climat humide, celle de smectite en T_2 en climat plus aride; il y a eu changement climatique.

La formation des horizons indurés a été précisée par l'analyse micromorphologique. Les tepetates ont des traits hérités d'un tuf volcanique fin et des traits propres à la pédogenèse (tubes biologiques, redistribution d'argile, accumulation d'oxyde de fer, de silice, ou de calcaire). Leur cimentation est controversée. Elle est probablement due à un dépôt de silice dans les fragipans et de calcaire dans les pétrocalciques. L'origine de la silice ou du calcaire est certainement pédologique. Mais une partie de la silice dans la matrice peut être apparue par une première altération hydromagmatique lors de la constitution du tuf. Un tepetate serait un tuf modifié par la pédogenèse; celle-ci développant ensuite l'altération des verres en argile et l'accumulation de silice ou de calcaire.

Les propriétés physiques majeures des tepetates-fragipans sont: comportement dur à l'état sec, friable et plastique à l'état humide; structure massive et fragmentée par des fissures de retrait; fort gonflement ou retrait; texture de sable argilo-limoneux ou d'argile sableuse, avec au moins 25% d'argile; porosité globale supérieure à 40%; mais faible macroporosité (< 10%) et conductivité hydraulique très lente; grande microporosité (> 30%) et réserve d'eau utile pour la plante d'au moins 10% en volume. Le tepetate pétrocalcique est beaucoup plus dur et rigide et contient moins d'argile.

Les propriétés chimiques majeures des tepetates-fragipans sont: pH 7 à 8,5; pas ou peu de calcaire; capacité d'échange cationique effective d'au moins 15 me/100g, toujours saturée; abondance de Ca, Mg et K échangeables; mais déficience en P total et en P assimilable (<3 ppm), et carence en matière organique et en N. Les tepetates-pétrocalciques sont calcaires (> 5% de Ca CO_3) et plus alcalins.

Les tepetates-fragipans ont des propriétés favorables pour constituer un sol agricole; mais aussi des caractères limitants majeurs: compacité, faibles macroporosité et conductivité hydraulique, carence en matière organique, azote et phosphore, qui sont la cause de leur stérilité.

3. Susceptibilité à l'érosion des tepetates* cultivés

* Notre étude ne concerne que les tepetates-fragipans (t2 et t3, non ou peu calcaires). Les observations ont été faites sur quatre stations, en conditions semblables d'altitude (2500-2600 m), de pente (8-9%) et de climat (pluies de 700 à 800 mm/an), 6 mois de saison sèche de novembre à avril).

3.1. <u>L'agrégat optimum pour un sol agricole stable.</u>

Les fragments de tepetate supérieurs à 2 mm sont stables; mais ceux inférieurs à 0,5 mm très instables. L'agrégat optimum a un diamètre de 3,4 à 2,4 mm. C'est celui qui assure au mieux stabilité structurale, drainage, porosité à l'air et réserve utile à la plante.

Mais sur le terrain, par sous-solage, labour profond et pulvérisage, il est difficile d'obtenir un agrégat homogène proche de l'optimum. On obtient une prédominance d'agrégat optimum, mais aussi des fragments grossiers et une fraction trop fine et instable.

3.2. Erosivité des pluies.

C'est l'érosivité de quelques pluies, plus que la hauteur annuelle qui va déterminer l'érosion. En 1991, il y a eu une différence notable de la hauteur des pluies: de 669 mm sur la station San Miguel Tlaïxpan (SM) à l'Ouest de la Sierra Nevada, à 775-803 mm sur les trois stations à l'Est de la Sierra, à savoir El Carmen (EC), Tlalpan (TL) et Matlalohcan (MA).

Mais l'érosivité des pluies exprimée en E.I30 (en unités américaines, cumulées pendant la saison des pluies) a varié très fortement d'une station à l'autre: près de 200 en SM à l'Ouest de la Sierra; 230 en EC, 360 en TL et 430 en MA à l'Est de la Sierra. Parallèlement le nombre de pluies érosives a augmenté de 2 à 6, 8 et 13. Et surtout le nombre de pluies moyennement (I30 > 30 mm/h) et fortement (I30 > 50 mm/h) érosives a augmenté respectivement de 1 à 3, 4 et 5.

Ceci est important pour comprendre la variation de l'érosion d'une station à l'autre. Il était donc utile d'avoir quatre stations de mesure.

3.3. Taux de ruissellement et de perte en terre*.

* Il s'agit essentiellement des résultats obtenus en 2ème année de culture d'un tepetate t3 sur la station SM; en 1ère et 2ème années de culture sur tepetate t2 en station EC, ou t3 en station TL; sur tepetate t3 et sur sol en station MA. De ces divers résultats ressortent les conclusions suivantes.

Il n'y a pas de différence significative du comportement des tepetates t2 ou t3. Les facteurs érosivité des pluies et traitement cultural sont déterminants.

- Sur tepetate à nu, le taux de ruissellement moyen est de 70%; il atteint 80 à 90% lors des fortes pluies. La perte en terre annuelle varie de 5 à 10 T/ha selon l'érosivité des pluies.

- Le sous-solage provoque l'infiltration, réduit de moitié le ruissellement et freine l'érosion. Sur tepetate cultivé (sous-solage, labour et pulvérisation) et à nu, le taux de ruissellement est réduit sensiblement; mais varie de 10-20% à 30-40% selon l'érosivité des pluies. Cependant la fragmentation du tepetate favorise l'érosion; la perte en terre est importante; elle augmente de la station la moins érosive à la plus érosive: de 21 T/ha (SM), à 72-78 T/ha (EC) et 128 T/ha (TL). Un tepetate labouré est donc instable et facilement érodible.

- L'effet du billonnage, avec ou sans couvert de maïs, est très efficace en cas de pluies faiblement érosives (station SM): le taux de ruissellement est de 5% et l'érosion de 1 T/ha seulement. Mais il l'est moins quand l'érosivité des pluies augmente; ruissellement et érosion s'accroissent à 10% et 23 T/ha en station moyennement érosive (EC); à 20% et 26 T/ha sur la plus érosive (TL). Il y a donc rupture de billons et érosion à partir d'un certain seuil d'érosivité des pluies (I30 > 30 mm/h).

- L'effet protecteur du couvert de maïs n'est pas significatif en présence du billonnage. Ce couvert est peut-être trop tardif pour être efficace.

- Sur un sol naturel, le couvert de savane restreint à 10% le taux de ruissellement et à zéro l'érosion. Mais sur le même sol mis à nu, sans travail du sol, en station la plus érosive (MA), le ruissellement monte à 34% et l'érosion à 47 T/ha. Un sol sablo-argileux à nu est donc plus instable et érodible qu'un tepetate non fragmenté.

- L'effet du billonnage sur un sol labouré avec ou sans culture de maïs est très efficace sur la station faiblement érosive (SM); il restreint le ruisselle-

ment à 12% et l'érosion à 1 T/ha. Mais en raison de l'instabilité du sol, les billons ne résistent pas à des pluies fortement érosives.

Ces résultats sont comparables à ceux mesurés dans la Cangahua (tuf comparable au tepetate) en Equateur. Mais ils ont été obtenus sur des petites parcelles et ils demandent à être vérifiés sur des champs de dimension plus réaliste (0,5 à 1 ha). En outre, ces valeurs peuvent évoluer en fonction du temps de mise en culture et de la variabilité de l'érosivité des pluies d'une année à l'autre.

3.4. Evolution de l'état de surface d'un tepetate cultivé.

Sur une parcelle billonnée à la façon mexicaine* de culture de maïs, l'état de surface évolue après chacune des trois façons culturales successives. L'observation a donc été faite en trois périodes successives. (* semis dans le sillon, puis inversion du billon pour le buttage du maïs en deux sarclages successifs). Les résultats sont les suivants:

- Il y a toujours formation d'une croûte, d'abord structurale sur le billon (effet splash de la pluie), puis de dépôt dans le sillon inter-billons, quand l'infiltration est assez réduite pour entraîner une érosion superficielle du billon.

- Cette évolution est progressive au cours de la première période, du semis au premier sarclage. Elle s'accélère au cours des deuxième et troisième périodes du fait de la réduction de taille des agrégats et de l'accroissement de l'érosivité des pluies.

- C'est la fonte des petits agrégats, inférieurs à 2 mm, qui est responsable de l'encroûtement. Plus cette fraction augmente plus le processus est rapide.

- La façon mexicaine de culture du maïs est finalement dangereuse; en fragmentant trop le tepetate, elle le rend instable. Il faudrait une seule opération de billonnage et un cloisonnement des espaces inter-billons pour réduire le ruissellement et les risques d'érosion en cas de fortes pluies.

- Alors que sur tepetate cultivé la fonte des agrégats est partielle et progressive, sur sol labouré le processus est rapide et la fonte des agrégats presque totale, entraînant la formation d'une croûte de dépôt plus épaisse et plus compacte.

- Sur tepetate labouré et non billonné, la croûte se généralise, le ruissellement n'est pas freiné et il se développe une érosion linéaire en griffes.

3.5. Evolution des propriétés physiques de surface d'un tepetate cultivé.

Il y a une régression progressive de la porosité, surtout la macroporosité, et de la conductivité hydraulique du tepetate labouré, au cours de la saison des pluies. La porosité globale a augmenté de 45% à 58% par suite du labour; puis elle se réduit progressivement à près de 50%, par effet de la fonte des agrégats et du tassement. De même la vitesse d'infiltration de 1mm/h s'est élevée à 100 mm/h sur le billon et 50 mm/h dans le sillon, puis a régressé progressivement à 10 mm/h sur le billon et seulement 2 mm/h dans l'espace inter-billons.

Le régime d'humidité d'un tepetate cultivé est comparable à celui d'un sol argilo-sableux normal. Il suit avec un faible temps de latence le régime des pluies. Il y a donc une bonne infiltration de l'eau. Au contraire dans un tepetate naturel à nu, l'humidité demeure à 60% du temps (de la saison des pluies) en dessous du point de flétrissement; d'où sa stérilité. Dans un tepetate fragmenté grossièrement l'humidité atteint le point de flétrissement pendant la petite saison sèche. Tandis que celui à texture fine (50% des agrégats de taille < 2 mm) amortit cet effet de drainage excessif, maintenant une réserve en eau utile pour la plante pendant la diminution des pluies. Cet amortissement est plus sensible après 5 ans de mise en culture. Donc les propriétés hydriques du tepetate cultivé s'améliorent avec le temps.

4. Facteurs chimiques et physiques de fertilité du tepetate.

Il s'agit de contraintes au développement des cultures et de l' amélioration de celles-ci.

4.1. Fertilité chimique potentielle.

Les tepetates sont neutres ou légèrement alcalins, bien pourvus en éléments Ca, Mg et K échangeables. Mais ils sont carencés en azote et déficients en phosphore.

Les essais en vase de végétation ont confirmé que la déficience en phosphore est, après celle en azote, le facteur limitant du développement végétal. Cependant, lors d'un apport de phosphore, cet élément est rapidement absorbé par les argiles sous une forme "labile", susceptible d'être extraite par la plante. Donc la fertilisation peut être limitée aux besoins de la plante cultivée à une dose économique.

Le potassium n'est pas susceptible de "rétrogradation". Il y a une transformation suffisamment rapide des formes minérales en formes échangeables et solubles pour maintenir longtemps une bonne nutrition des plantes. Un apport d'engrais potassique est inutile.

4.2. Evolution des propriétés chimiques et physiques d'un sol cultivé.

Il y a accroissement du carbone organique, légère baisse du pH et augmentation des teneurs en azote et phosphore assimilable; le potassium reste stable ou diminue peu.

La texture évolue peu et conserve au moins 50% de fraction fine (< 2 mm), en dépit de la fonte partielle des agrégats et de l'érosion des fines. La réserve en eau utile s'améliore un peu ou reste stable. Mais la porosité, surtout la macroporosité, diminue. Le sol se tasse et la profondeur utile se restreint. On considère qu'il faut refaire un sous-solage et un labour profond après cinq ans de culture.

L'efficacité d'une fumure organique sur l'amélioration de stabilité des agrégats, de la macroporosité et de la réserve en eau utile n'a pas été étudiée.

5. Productivité agricole du tepetate cultivé.

La productivité du maïs est bonne (de 2,2 à 3,8 T/ha) sur tepetate-fragipan après cinq années de culture, si le climat est suffisamment humide. L'alimentation en eau est le premier facteur important.

Mais en première année le rendement du maïs est toujours très faible (< 0,4 T/ha); il augmente en fonction du temps: 1 à 1,5 T/ha en deuxième année, 2 à 2,5 T/ha en troisième année (valeur proche de la normale); près de 3 T/ha en cinquième année.

Au contraire la productivité du blé est déjà estimable (1,5 T/ha) dès la première année (valeur normale 2 à 2,5 T/ha).

L'analyse des composantes du rendement permet d'aborder le problème de productivité du maïs. En première année, c'est le nombre très réduit de plants qui restreint la production. Cette mauvaise levée du maïs, alors que d'autres graminées ont un développement normal, fait penser à un facteur limitant biologique. A partir de la 3ème et de la 5ème années de culture, le développement du maïs est normal. Avec une fertilisation phosphatée de 60 unités P, il y a une bonne corrélation entre les composantes d'élaboration du rendement (N épis, N grains, Poids de 100 grains) et des doses croissantes d'apport d'azote. 60 unités N suffisent pour une production normale, et 120 unités pour un optimum. Il y a aussi une bonne corrélation avec l'alimentation en eau.

Pour évaluer la productivité en première année de culture d'un tepetate, une expérimentation en station a été faite pour tester l'impact de plusieurs

facteurs (texture, fertilisation minérale, fumure organique) sur cinq plantes: maïs, blé, haricot, fève et vesce.

Sans apport de fumier, la productivité du maïs et du haricot* est nulle ou très faible, quelle que soit la fertilisation minérale (toujours P 60; N: 0, 60 ou 120 unités). Mais la productivité du blé et de la vesce est normale; avec une base de 60 unités P, elle augmente avec des doses croissantes de N, vers des valeurs comparables à celles des sols cultivés (de 2 à 3,5 T/ha pour le blé). La fève a un comportement intermédiaire; son rendement est 2 à 3 fois inférieur à la normale.* Les essais du CIFAP ont montré qu'une espèce indigène de haricot (ayocote) a un développement presque normal.

Avec un apport de fumier (40 T/ha + 60 unités P), la productivité du maïs et du haricot est un peu améliorée, mais demeure faible (0,2-0,3 T/ha), quelle que soit la dose d'azote ajoutée; l'hypothèse d'un facteur limitant biologique est renforcée. Au contraire les rendements de la vesce et surtout du blé augmentent à près de 6 T/ha, même sans apport d'azote; celui-ci a même un effet dépressif sur le blé. Le rendement de la fève (0,8 T/ha) approche une valeur normale (1 T/ha).

En conclusion, en première année le tepetate bien cultivé (texture fine, fumure organique ou minérale de N 60 à 120 et P 60) a une bonne fertilité potentielle, mais pas pour toutes les plantes. La productivité est effective pour le blé, d'autres graminées (orge, avoine, ray grass) et la vesce, et dans une moindre mesure l'ayocote et la fève. Mais le maïs et le haricot ne peuvent se développer. La culture de maïs, haricot et fève n'est possible qu'à partir de la 2ème, voire la 3ème année. La fumure organique est un facteur important de productivité; en l'absence de fumier disponible, il serait intéressant d'expérimenter une culture d'engrais-vert en première année, par exemple de vesce ou de graminée fourragère. Enfin une étude de microorganismes symbiotiques utiles à la plante cultivée serait intéressante pour résoudre le problème du maïs et du haricot en première année de culture et pour accroître à moindre coût leur productivité.

6. Facteurs socio-économiques de réhabilitation agricole des tepetates.

L'enquête sur les "systèmes économiques familiaux" a révélé que les tepetates réhabilités en sol sont une ressource en terre agricole pour les petites exploitations familiales, quasi nécessaire au dessous de 10 ha, importante jusqu'à 20 ha/famille. Cette réhabilitation est la seule chance de survie pour ces petites exploitations. En outre, l'aménagement en terrasse est une bonne protection contre l'érosion.

L'agriculture sur les tepetates présente une certaine spécificité: une rotation culturale adaptée suivant l'âge de remise en culture (blé en 1ère année, puis maïs-fève-haricot), qui privilégie les cultures de subsistance (maïs, fève, haricot) par rapport aux cultures de rente (blé, orge); des façons culturales adaptées (2ème sarclage du maïs, fertilisation accrue en phosphore, moindre en azote).

Le coût du travail de réhabilitation du tepetate assumé par le paysan (compte tenu de l'aide de l'Etat) peut être amorti par le produit des cultures de 8 années (normales). Il y a même une plus-value foncière du sol ainsi amélioré en seulement 6 années.

Mais la rentabilité des investissements financiers sans l'aide de l'Etat est discutable pour les exploitations de moins de 15 ha, qui vivent en autosubsistance et ne peuvent dégager le capital nécessaire. Ce n'est possible qu'avec l'apport de salaire extérieur (6 mois de travail d'ouvrier/ha) par les membres de la collectivité familiale. Dans le cas d'exploitations de plus de 15 ha, le développement de cultures de rente pourrait dégager le capital nécessaire. De toute manière il faudrait poursuivre l'aide de l'Etat pour fournir ces prestations de travaux à moindre coût.

En conclusion, les tepetates-fragipans, après aménagement adapté, peuvent être une ressource agricole durable et de bonne productivité. Leur mise en valeur est une nécessité socio-économique. Mais la rentabilité de cet investissement nécessite au départ une aide de l'Etat. Des études en vraie grandeur sont nécessaires pour mesurer les risques d'érosion, mettre au point des techniques culturales mieux adaptées et plus économiques, notamment une agriculture plus "biologique" et une rotation incluant des engrais-verts, ainsi qu'une diversification et amélioration des cultures, afin d'obtenir une production plus économique ou plus rentable .

REFERENCES

AFES/INRA, 1990. Présentation du Référentiel Pédologique au Congrès International de Science du Sol, Kyoto-août 1990; 203p.

ARIAS H. et MIRANDA M.E., 1992. Rapport annexe au rapport final du contrat CEE-ORSTOM; n° TS2-0212-C.

ARIAS H., 1992. Reporte final. Proyecto "Incorporación de tepetates a la producción agricola"; subcontrato Colegio de Postgraduados-ORSTOM del contrato CEE-ORSTOM TS2-0212-C. Montecillo, Mexico, junio 1992; 68 p. + Fig. Annexes.

BAUMANN J., 1992. Investigaciones sobre la erodibilidad y el regimen hidrico de los duripanes (tepetates) rehabilitados para los cultivos, en el bloque de Tlaxcala. Rapport final pour le contrat CEE TS2-0212-C; 26p. + annexes.

BOIFFIN J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur-Ing. INAPG, Paris, 320 p.

BOUDAL C. et ROBIN C., 1988. Relations entre dynamismes éruptifs et réalimentations magmatiques d'origine profonde au Popocatépetl. Can. J. Earth Sci., 25: 955-971.

CANTAGREL J.M., 1991. Datations K/Ar de roches volcaniques de la Sierra Nevada et du Cofre de Perote; Labor. Géochronologie K/Ar du CNRS, Univ. Clermont-Ferrand; résultats inédits.

CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne; influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM, coll. Didactiques, 229 p.

CHAMINADE R., 1964. Diagnostic des carences minérales du sol par l' expérimentation en petits vases de végétation. Science du Sol, 2ème semestre 1964.

CPCS, 1967. Classification des sols. Note ENSA Grignon, 67 p.

CPCS, groupe de travail Andosols, 1972. Proposition de classification des Andosols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. vol. X, 3: 302-303.

CUSTODE E., de NONI G., TRUJILLO G. et VIENNOT M.,1992. La cangahua en el Ecuador: caracterisación morphoedafológica y comportamiento frente a la erosión. Memoria 1er Simposio Internaciónal Suelos volcánicos endurecidos, Mexico, en impressión.

DUBROEUCQ D., QUANTIN P. et ZEBROWSKI C., 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. Rev. Terra, 7, 1: 3-12.

ETCHEVERS J., 1992. Informe del estudio de la dinámica del fósforo y del potasio en los tepetates de México y Tlaxcala, (México). Anexo del reporte final, Contrat CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.

FAO-Unesco, 1975. Carte mondiale des sols. vol. 1 légende; 62p.

FAO-Unesco, 1985. Soil map of the World 1/5.000.000, revised legend; 115 p.

FISHER R. V. et SCHMINCKE H. V., 1984. Pyroclastic Rocks. Springer Verlag, Heidelberg, 472 p.

FLACH K. W., NETTLETON W. D. et CHADWICK O. A., 1991. La micromorfologia como herramienta, para caracterizar los materiales endurecidos por silice. 1er Simposio Internacional Suelos volcánicos endurecidos, México, oct. 1991, Resumenes ampliados p. 10-11.

GASNIER I., 1991. Suivi agronomique du maïs et du blé sur des sols indurés d'origine volcanique. Mémoire de fin d'Etudes, ISTOM, 76 p. et annexes.

HEINE K.,1973. Die jungpleistozaenen und holozaenen Gletscher-voerstosse am Malinche-Vulkan, Mexico. Eiszeitalter und Gegenwart, 23/24: 46-62.

HEINE K. et HEIDE-WEISE H.,1973. Jungquartäre Forderfolgen des Malinche Vulkan und des Popocatepétl. (Sierra Nevada, Mexiko), und ihre Bedeutung für Glazial Geologie, Paläoklimatologie und Archäologie.Münsterisch Forschungen der Geologie und Paläontologie, 31/32: 303-322.

HEINE K. et SCHÖNHALS E. , 1973. Enstehung und Alter der "toba" Sedimente in Mexiko: Eiszeitalter und Gegenwart, 23/24 : 201-215.

HESSMANN R., 1991. Estudios micromorfologicos de la formación de "tepetate" en sedimentos de "toba", Estado de Tlaxcala (México). 1er Simposio Internacional Suelos Volcánicos endurecidos, México, oct. 1991. Resumenes ampliados, p. 14-18.

HESSMANN R., 1992. Mikromorphologische Untersuchungen zur Genese der Tepetatehorizonte in der Tobasedimenten des Staates Tlaxcala. Endbericht zum EG-Projekt Mexiko.

HIDALGO C., 1991. Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés ("tepetates") de la région de Mexico, cimentation et induration. DEA de Pédologie Univ. Nancy, 57 p.

HIDALGO C., QUANTIN P. et ZEBROWSKI C., 1991. La cimentation des tepetates t2 et t3 de San Miguel Tlaixpan (P 30, Texcoco, México); étude de la silicification. 1er Simposio Int. Suelos Volcánicos endurecidos, México, oct. 1991. Resumenes ampliados, p. 54-55.

JEROME 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.

LAL R., 1976. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria. 3: Effects of rainfall characteristics. Geoderma 16: 389-401.

MARQUEZ A., ZEBROWSKI C. et NAVARRO H., 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. Memoria del 1er Simposio Internacional Suelos Volcánicos endurecidos, México, en impressión.

MARTINEZ M., OLESCHKO K. et ARIAS H. 1991. Estimación del estado óptimo del tepetate en el proceso de su recuperación. Resum. ampl. 1er Simposio Internacional Suelos volcánicos endurecidos. Montecillo, Mexico, p. 56.

MIEHLICH G., 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veranderungen andesitischer Vulkanaschböden in drei Klimatstufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de México). Habil. Schrift, 402 p., Fachber. Geowiss. Univ. Hamburg.

MIEHLICH G., 1991. Chronosequences of Volcanic Ash Soils. Hamburger Bodenkündliche Arbeiten n° 15, 207p.

NAVARRO H. et ZEBROWSKI C., 1991. Analisis agronómico comparativo en tepetate. Resumenes ampliados del 1er Simp. Int. Suelos Volcánicos endurecidos, México, p. 86-88.

NAVARRO H. et ZEBROWSKI C. ,1992. Etude des sols volcaniques indurés (tepetates) des Bassins de México et de Tlaxcala (Mexique). Leur production agricole. Annexe au rapport final contrat CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.

NIXON G.T., 1989. The geology of Iztaccihuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico. Special paper n° 219, Geol. Soc. America; 58 p.

OLESCHKO K., 1992. Informe final del Proyecto Reincorporación de los tepetates para la producción agricola. Estudio micromorfologico. Rapport annexe.

PEÑA D., ORTIZ S. M., ZEBROWSKI C. et ETCHEVERS J., 1990. Incorporación de los tepetates a la producción agrícola: rendimientos y effectos de la roturación sobre características físico-químicas de tepetates. Memoria XXIII Congr. Nac. Ciencia Suelo, México.

PEÑA D. et ZEBROWSKI C., 1991. Incorporación de los tepetates a la producción agricola. II Caracterización física. 1er Simposio Int. Suelos Volcanicos endurecidos, México, oct 1991. Resumenes ampliados, p. 43-44.

PEÑA D. et ZEBROWSKI C., 1992. Informe del mapa morfoedafológico 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.

PYE K., 1987. Aeolian dusts and dust deposits. Academic Press, London.

QUANTIN P., ZEBROWSKI C., DELAUNE M. et HIDALGO C., 1992. Le matériau originel des tepetates t2 et t3 de la région de Texcoco (Mexique): loess ou cinérites. Memoria 1er Simposio Int. Suelos volcánicos endurecidos, México, oct. 1991, en impression.

ROBIN C., 1984. Le Volcan Popocatépetl (Mexique): structure, évolution pétrologique et risques. Bull. Volcanologique, 47: 1-23.

ROOSE E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Trav. Doc. ORSTOM n° 130, 569p.

SMSS, 1990. Keys to Soil Taxonomy. A.I.D. Soil Survey Staff. SMSS, Tech. Monogr. n° 19, 4th Ed. 423p.

WERNER G., 1988. Los suelos en el Estado de Tlaxcala, Altiplano central mexicano. Notice explicative, avec collaboration de G. MIEHLICH, de 198 p.; 4 feuilles de la carte des sols de Tlaxcala à 1/100.000 ème; édité conjointement par l' Université J. Liebig Giessen, Gouvernement de l' Etat de Tlaxcala, Université Autonome de Tlaxcala, copyright Ed. Steiner Verlag Wiesbaden.

WERNER G.,1992. Die Böden der Region Apan (Hidalgo) und Calpulalpan (Tlaxcala)). Erläuterungen zu einer vorlaüfigen Bodenkarte. Annexe au rapport final du programme CCE/ORSTOM n° TS2-0212-C.

WHITE S.E., 1962. Late Pleistocene glacial sequence for the West side of Iztaccihuatl, Mexico: Geol. Soc. Amer. Bull., 73: 935-958.

WISCHMEIER W.H., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loess. Trans. Am. Geoph. Union, 39: 285-292.

WISCHMEIER W.H. and SMITH D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agr. Handbook n° 537.

ZAHONERO P., 1992. Des lits de pierre sur l'Altiplano. Contribution à l'analyse de la mise en valeur des "tepetates", sols indurés d' origine volcanique, dans la région de Tlaxcala (Mexique). Rapport de fin d' études CPSL-ISTOM. 120 p. + annexes.

ZEBROWSKI, C., 1991. Los suelos volcánicos endurecidos en America Latina. Resumenes ampliados, 1er Simposio Internacional Suelos Volcánicos endurecidos, p. 1-4.