

UNIVERSITE DE TOULOUSE LE MIRAIL
DEA TERRITOIRES/ENVIRONNEMENT/AMENAGEMENT (OPTION PAYSAGES)

LES PAYSAGES DE *TEPETATES* DU MEXIQUE CENTRAL VOLCANIQUE :

IDENTIFICATION ET CARACTERISATION SPATIALE, PAR TELEDETECTION ET SIG,
DES ZONES AGRICOLES A REHABILITER

Alice SERVENAY



Juin 1997

GEODE
UMR 5602 CNRS

 
Maison de la Télédétection
LCSC - Montpellier

Mots clefs : érosion; *tepetates*; Mexique; spatialisation; Landsat TM; SIG.

Palabras claves : erosión, *tepetates*; Mexico; espacialización; Landsat TM; SIG.

Key words : erosion; *tepetates* ; Mexico; spatialisation; Landsat TM; GIS.

RESUME :

Les *tepetates*, matériaux d'origine volcanique indurés et stériles, localisés le long de l'axe néo-volcanique mexicain, sont une contrainte pour l'agriculture. Leur présence est liée à un contexte à la fois environnemental et socio-économique. Dans un but d'aider à la mise en place future d'un programme de réhabilitation de ces sols et de protection des zones sensibles, nous les avons cartographiés à l'aide d'images Landsat TM par classification supervisée. En complément, un SIG (Système d'Information Géographique) a été développé à partir de cartes thématiques afin de localiser les risques potentiels d'apparition des *tepetates* non détectables par télédétection. Nos premiers résultats indiquent des taux de *tepetates* affleurants et discontinus touchant 15 à 20% des secteurs d'études préliminaires. Ces chiffres confirment les travaux antérieurs sur les sites de Sierra Nevada occidentale et Tlaxcala. En outre, 40 à 70% des zones de piémonts sont potentiellement atteintes par l'érosion et la mise à l'affleurement. Enfin, des données socio-économiques issues du dernier recensement (rendements céréaliers, charge en pâturage, niveau de vie des populations, ...) ont été introduites afin de déterminer les secteurs qui nécessiteraient une réhabilitation prioritaire. L'approche socio-économique se heurte néanmoins à une inadéquation d'échelle entre celle du découpage administratif trop large et les unités paysagères visées.

RESUMEN :

Los *tepetates*, materiales volcanicos endurecidos y estériles del eje neovolcánico mexicano, son limitantes para la agricultura. Su presencia se debe a un contexto a la vez de medio ambiente y socio-económico. Con el fin de colaborar a la elaboración de un programa de rehabilitación de estos suelos y de protección de áreas frágiles, se hizo una cartografía con imágenes del satélite Landsat TM por clasificación supervisada. En complemento, un S.I.G (Sistema de información geográfica) fue desarrollado con mapas temáticos (geología, edafología, clima, ...) para localizar los riesgos potenciales de aparición de tepetates que no pueden ser detectados por teledetección. Los primeros resultados indican que los *tepetates* aflorantes y discontinuos afectan 15 a 20% de los sectores de estudio preliminares. Estas cifras confirman los trabajos anteriores en los sitios de la Sierra Nevada Occidental y Tlaxcala. Además de 40 a 70% de las zonas de piedemonte son potencialmente erosionables. Finalmente, datos socioeconómicos del último censo (rendimiento cerealista, carga animal, nivel de vida de la población, ...) se introdujeron para intentar determinar las áreas que necesitan rehabilitación prioritariamente. Este último enfoque se dificulta debido a la inadecuación entre la escala de los municipios (demasiado general) y la escala de las unidades de paisaje analizadas.

ABSTRACT :

"*Tepetates*", hardened and eroded volcanic soils, located along the Mexican neo-volcanism axis, are a constraint to agriculture. Their presence is linked with both an environmental and socio-economical context. In order to developping a protection and rehabilitation program for these sensitive areas, we have mapped them with a supervised classification of Landsat TM images. Besides, a G.I.S. (Geographic Information System) has been elaborated from thematic maps in order to locating remote sensed undetectable possible *tepetates* appearing risks. Our first results indicate that 15 to 20 % of the preliminary studies sites are affected by superficial *tepetates*. Those figures confirm the former works on Western Sierra Nevada and Tlaxcala. Moreover 40 to 70% of piedmont areas are potentially eroded or cleared. Then social and economic up to date data (cereal output, animal/grass ratio, standard of living) have also been included in the study to determine witch places need the most important help. That way of investigation is blocked by a conflict between too large administrative wardings and landscape units.

AVANT PROPOS ET REMERCIEMENTS

Lorsqu'en 1995 je terminais mon premier travail de recherche en maîtrise sur la *spatialisation des états de dégradation de la cangahua dans le bassin de Quito* en Equateur, j'étais loin d'imaginer que je serais amenée à travailler à nouveau sur des formations similaires dans un autre pays d'Amérique latine. C'est pourtant ce travail préalable sur l'Equateur qui m'a donné l'opportunité de rencontrer Christian Prat, et m'a permis d'envisager de poursuivre dans la voie de la recherche que nous menons aujourd'hui dans le cadre du DEA. Une année s'est écoulée avant que je n'entreprenne de faire ce DEA, car je voulais m'assurer de faire oeuvre utile. Je fus donc obligée de partir au Mexique voir de plus près le problème posé par les *tepetates*. Une fois sur place, accueillie conjointement par l'Institut de géographie de la UNAM, le Colegio de Postgraduados de Montecillo et l'ORSTOM Mexico, j'ai mis au point la base de donnée SIG qui sera utilisée dans cette recherche. Qu'il me soit permis de remercier mes partenaires mexicains : Eduardo Gonzalez, Valentino Sorani, Roman Alvarez, et David Hernandez pour leur accueil chaleureux et leur aide quotidienne dans mon apprentissage du logiciel Arc info.

Revenue en France ma formation de géographe en gestion de l'environnement, m'a orientée vers la formation doctorale en géographie de l'Université de Toulouse le Mirail. Cette formation proposait l'enseignement des différents aspects de la géographie, de l'aménagement et de l'environnement en passant par le concept du paysage et l'utilisation des outils de spatialisation que sont la télédétection et les SIG. C'est à l'ensemble de l'équipe doctorale que je dois ma formation. Je saisis cette occasion pour remercier tout particulièrement Jacques Hubschman pour m'avoir suivie et encadrée tout au long de cette année. A travers lui j'adresse mes remerciements à l'ensemble du corps enseignant.

Nous n'aurions pas pu effectuer l'exploitation des données recueillies au Mexique si nous n'avions pas bénéficié des moyens de travail qui sont regroupés à la Maison de la Télédétection. Je remercie Georges De Noni de m'avoir permis, par l'intermédiaire du laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés, de bénéficier de ce cadre de travail privilégié. Je remercie également Marc Lointier pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire de l'ORSTOM dont il est le responsable.

Je remercie Régine Chaume pour avoir toujours soutenu mon travail et m'avoir conseillée tout au long de celui-ci. Un grand merci à Nadine Dessay pour son appui technique, ses conseils et son amitié. Je remercie également Jean-Marie Fotsing, mon "père spirituel", d'avoir continué d'aider, de soutenir et d'encourager la "petite dictature ambulante" que je suis. 1000 merci à Michel Petit, pour sa confiance, ses encouragements, et le temps qu'il a passé à corriger mes fautes de frappe.

J'en profite également pour remercier toutes celles et ceux qui m'ont toujours montré leur soutien et fait bénéficier de leurs conseils et expérience, qu'ils ne soient pas vexés de ne pas être individuellement cités, je crains trop d'en oublier un ou une par inadvertance, et je sais bien que les intéressés se reconnaîtront.

Enfin, un très grand merci pour son soutien scientifique et matériel à Christian Prat, sans qui je n'aurais jamais entrepris de m'aventurer à nouveau dans le milieu difficile de la recherche à l'ORSTOM.

INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS GENERAUX

L'une des caractéristiques les plus marquantes des hautes terres du Mexique central, réside dans l'extension remarquable des surfaces couvertes par les *tepetates*. Ce terme désigne, de façon générique, des formations indurées d'origine volcanique. Les horizons meubles -donc cultivables- qui, au départ, recouvrent presque toujours ces niveaux cimentés, sont peu à peu déblayés par l'érosion hydrique naturelle et/ou anthropique. Le processus conduit ainsi, à des rythmes extrêmement variables dans le temps et dans l'espace, à l'affleurement des matériaux indurés.

Les paysages associés à ces sols très particuliers présentent un aspect désolé, corollaire de milieux extrêmement dégradés et peu propices à la mise en valeur. Aujourd'hui, ces *tepetates* représentent une limite importante pour les activités agricoles. Le problème est d'autant plus aigu qu'ils sont localisés le long de l'axe néo-volcanique mexicain, dans une région pauvre et densément peuplée.

Placer les *tepetates* au centre d'un projet de recherche, c'est mettre à jour un ensemble de problèmes dont les enjeux concernent à la fois des milieux très spécifiques, des populations avec leur rapport à la ressource sol, ainsi que des perspectives de restauration/réhabilitation potentiellement envisageables de ces milieux.

Les objectifs généraux de notre travail s'inscrivent dans une double perspective, à la fois méthodologique et appliquée :

- Appliquée, puisque notre travail a pour ambition de contribuer à répondre à une demande sociale forte, celle d'une réhabilitation raisonnée de ces zones à *tepetates*.
- Méthodologique, car il s'agit tout d'abord d'identifier, de qualifier et de cartographier les différentes catégories de "paysages à *tepetates*", à partir de données télédétectées.

D'autre part, dans la mesure où la réhabilitation des *tepetates* implique un certain nombre de choix et une hiérarchie d'urgence dans la programmation des opérations, la mise en oeuvre d'une approche Système d'information géographique (SIG) s'imposerait naturellement. En effet, identifier, caractériser et cartographier les territoires prioritaires à partir de paramètres environnementaux, socio-économiques et de propositions émanant des acteurs institutionnels, conduit logiquement à la construction d'une base de données géolocalisées et à son exploitation par l'entreprise d'un jeu de requêtes ajustées aux objectifs.

Ce travail d'inscrit dans le prolongement d'un programme soutenu initialement par l'union européenne (UE) et conduit en collaboration par l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), le *Colegio de Postgraduados de Montecillo* (CP - Mexique), l'Université autonome de Tlaxcala (UAT) et l'Université de Giessen (Allemagne).

S'agissant d'une recherche pré-doctorale, notre travail a ainsi pour ambition de jeter les fondements, conceptuels et méthodologiques, d'un programme plus large, qui devrait pouvoir être mené en partenariat entre équipes mexicaines et françaises sur l'ensemble de la problématique *tepetates*.

1^{ÈRE} PARTIE : CARACTERISATION D'ENSEMBLE DES *TEPETATES* ET PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DE LA RECHERCHE

1. - Les tepetates : sols indurés impropres à l'agriculture

1.1. - Les *tepetates* sur l'axe néo-volcanique mexicain

Le Mexique, pays de hauts plateaux, est traversé par l'axe néo-volcanique le long des 19^e et 20^e degrés de latitude nord. Les volcans y sont souvent encore en activité. Cette région centrale correspond à la zone de plus haute densité de population du pays. Elle a été mise en culture bien avant l'arrivée des Espagnols, et les principales grandes civilisations de Mésio-Amérique s'y sont développées. Liés au volcanisme, les *tepetates* sont concentrés sur cet axe qui traverse le pays en son centre, d'Est en Ouest (Figure 1). On les trouve localisés en bas de versants, en position de piedmont par rapport aux édifices volcaniques qui dominent le paysage. D'après León (1992) la région centrale du Mexique est une zone où 50% des terres sont plus ou moins dégradées par l'érosion.

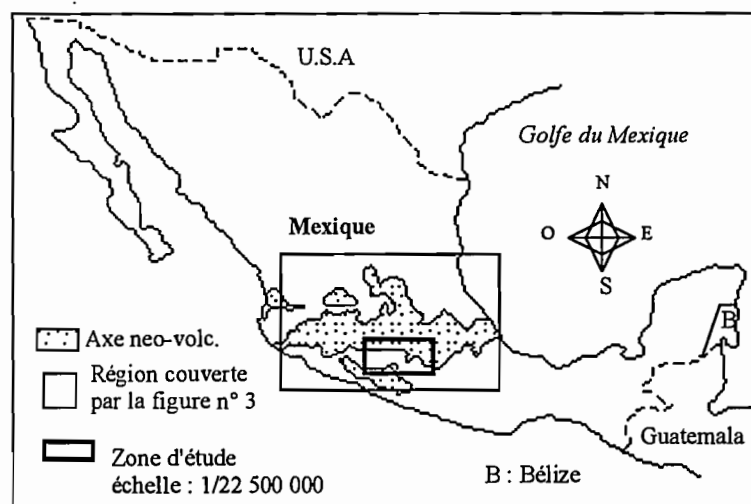


Figure 1 : L'axe néo-volcanique trans-mexicain.

Suivant les auteurs, la superficie couverte par les *tepetates* varie de 31 000 (Peña *et al.*, 1992) à 140 000 km² (Guerrero *et al.* 1992). La différence énorme qui existe entre ces deux sources tient à la définition même des *tepetates* (cf.§1.2.), ainsi qu'aux méthodes d'estimation utilisées. Guerrero *et al.* (*op. cit.*) se sont fondés sur la cartographie des sols existante de l'*Instituto nacional de estadística geografía y informática* (INEGI) au 1/250 000 et au 1/50 000 pour délimiter et sélectionner tout ce qui correspond à des couches indurées présentes à une profondeur inférieure à un mètre. Ils ont transposé cette information sur une carte au 1/4 000 000 avant de calculer les surfaces atteintes. En réalité, parmi les trois types de *tepetates* identifiés, la catégorie des duripans correspondrait

principalement aux *tepetates* caractérisés par Dubroeuq *et al.* (1989) de par leur nature et leur répartition spécifique le long de l'axe néo-volcanique. Cependant, une partie des sols identifiés en "fragipans" en fait également partie. Il devient alors difficile de quantifier et de localiser avec précision les *tepetates* tels qu'ils sont considérés dans les études géo-pédologiques déjà menées. Quant à Peña et Zebrowski (1992), ils ont repris les mêmes documents, avec une appréciation plus stricte des critères retenus. Toutefois, dans les deux cas, ces études exploitent des documents (cartes des sols de l'INEGI en particulier) dont la qualité et la précision sont très inégales. D'où l'urgence d'une nouvelle cartographie en combinant la télédétection et la meilleure connaissance de ces matériaux et du terrain, acquise au cours de ces dernières années.

Peña et Zebrowski (*op. cit.*) ont travaillé par photo-interprétation et études de terrain afin de réaliser une carte morpho-pédologique au 1/50 000 du versant occidental de la Sierra Nevada, situé à l'Est de la ville de Mexico, localisant les différents types de *tepetates*. L'Université de Giessen associée à l'UAT a effectué une étude similaire pour l'état de Tlaxcala, malheureusement il n'existe pas de légende commune à ces deux travaux, dont une partie a pourtant été réalisée dans le cadre d'un même programme de recherche de l'UE (Contrat N° ERB-TS3 CT 930252).

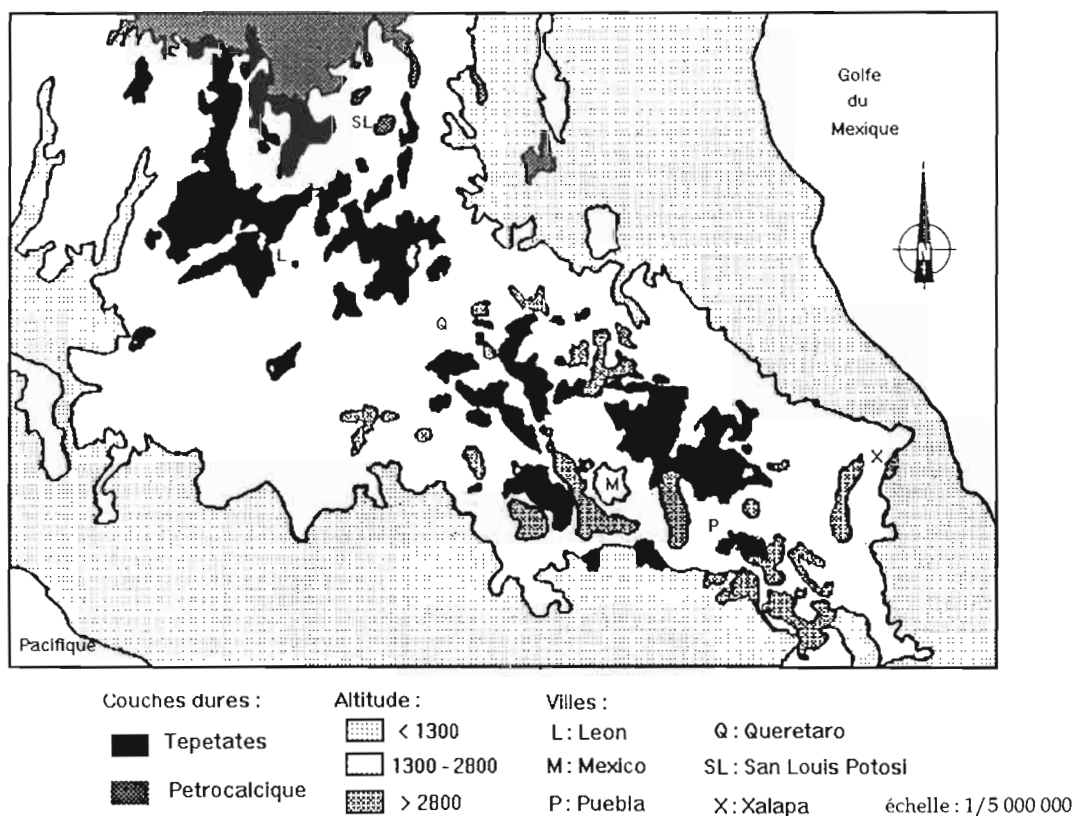


Figure 2 : Localisation des *tepetates* au Mexique (Peña y Zebrowski 1992)

Pour des raisons historiques, de densité de population et de contexte économique que nous développerons plus tard, notre secteur d'étude a été choisi dans l'axe néo-volcanique. La majorité des travaux antérieurs ayant été réalisés au niveau de la Sierra Nevada, c'est principalement à cette sous région de l'axe néo-volcanique mexicain, que se rattachent la plupart des données actuellement connues.

1.2. - Caractéristiques générales de ces sols

Les *tepetates* sont regroupés sous un même terme générique en raison de leur induration et de leurs propriétés *a priori* hostiles à l'agriculture. Cependant, il existe en réalité un large éventail de *tepetates*, avec non seulement des origines différentes, mais des composantes qui varient beaucoup d'un type à l'autre. Cela se traduit parfois par la couleur (beige très claire, jaune et toute la gamme des ocres), parfois par le degré de dureté, ou encore par la nature et le pourcentage des éléments d'induration présents.

Au Mexique, Quantin *et al.* (1992) ont identifié trois groupes de *tepetates* différents correspondant respectivement à des formations pétrocalciques, des sols à duripan et des formations pétrogypsiques.

- Les formations pétrocalciques sont constituées d'une croûte fortement cimentée, le plus souvent par des carbonates de calcium (CaCO_3), mais parfois par des carbonates de magnésium (MgCO_3), ou de petites proportions de silice. Il s'agit généralement d'une couche continue et très dure, pouvant avoir 10 cm ou plus d'épaisseur. Sur le terrain, cet horizon cimenté est caractérisé par sa couleur blanc-cassé ou jaune clair.
- Les sols à duripan font référence à des couches fortement cimentées par de la silice (SiO_2), de couleur café clair à jaune. Cette formation qui ne se désagrège pas dans l'eau, se localise dans le premier mètre du sol.
- Les formations pétrogypsiques sont des couches d'un blanc laiteux, cimentées par des sulfates de calcium (CaSO_4), mais il est possible de rencontrer d'autres agents de cimentation comme le carbonate de calcium (CaCO_3).

Parmi ces trois grands groupes, les sols à duripan et une partie des sols à fragipan correspondent aux *tepetates* concernés par notre étude. Les autres formations citées, bien que présentant des caractères d'induration, n'ont pas une origine volcanique, et ne posent pas les mêmes problèmes. Selon l'origine du matériau qui constitue le *tepetate*, on rencontre en effet :

- des dépôts pyroclastiques grossiers : brèches,
- des dépôts pyroclastiques fins : flux de cendres et lapilis (Peña et Zebrowski, 1992).

Les **dépôts grossiers** de type brèches sont des matériaux pyroclastiques indurés, ils se distinguent par un mélange de matériaux tufiers (fins) et des blocs de cailloux de différentes tailles.

Les **dépôts fins** sont classés en séries distinguées comme Ti, T2 et T3, en fonction de leur âge. Les *tepetates* Ti sont indifférenciés, les T2 sont ceux correspondant aux dépôts les plus récents, les T3 plus anciens, plus massifs et plus durs sont également plus clairs. A l'intérieur de ces trois niveaux de *tepetates* d'origine volcanique, des différences de composition, notamment concernant les éléments de cimentation, ont été mises en évidence par Peña et Zebrowski (1992). Il est impossible de déterminer la texture des *tepetates* avec carbonates car ils se désagrègent en morceaux très compacts, difficiles à casser. Pour les *tepetates* d'une même série (T2 ou T3), ceux qui contiennent du carbonate de calcium ont une texture plus sableuse. Les *tepetates* non calcaires sont d'autant moins résistants qu'ils sont riches en eau. De même, les *tepetates* riches en calcaire sont plus résistants que les non carbonatés.

En reprenant la classification des sols américaine (SMSS, 1975), les *tepetates* peuvent être classés pour certains comme **duripans** et pour les autres comme **fragipans** :

- Les *tepetates* riches en CaCO_3 ne se désagrègent qu'en solution acide et sont définis comme étant des duripans.
- Au contraire, les *tepetates* non calcaires se désagrègent dans l'eau et s'apparentent aux fragipans. La couleur du T3 est intense et varie du jaune au brun en passant parfois par la teinte rougeâtre lorsque le revêtement d'argile de cette couche est suffisamment important. Les T2 sont plutôt de couleur claire, variant du gris clair au blanc.

La photo 1 montre un profil de tepetates. La succession typique et la description complète des horizons dans un sol de cette nature est disponible en annexe 2 (Peña y Zebrowski, 1992)

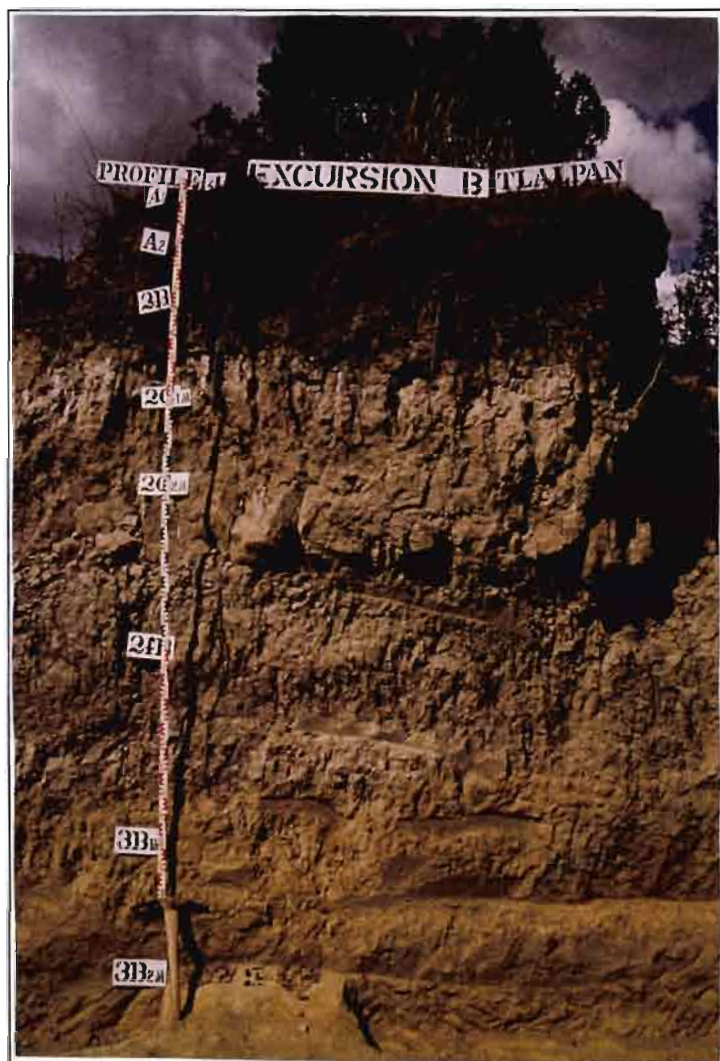


Photo 1 : Profil de *tepetates* (C. Prat)

- Ap 0-25 cm; couche coluvio-aluviale.
- 2B 25-70 cm; couche à caractère vertique.
- 3BC 70-90 cm; couche compacte massive.
- 3BC2 90-125 cm; sol plus structuré et friable.
- 4C 125-150 cm; *tepetate* massif.
- 5B 150-200 cm; argile gris.
- 6C 200-220 cm; *tepetate* T2.
- 7CB 220-235 cm; cape compacte rougeâtre (T2 ou T3).
- 8Bt 235-260 cm; sol rougeâtre avec nombreuses traces de manganèse.
- 9Bt2 260-420 cm; sol jaune avec traces de manganèse.
- 9Bt3 420-460 cm; sol jaune plus massif.

2. - Les grands traits du cadre physico-géographique des *tepetates*

2.1. - Les hautes terres volcaniques tropicales

Long de 850 par 200 km, l'axe néo-volcanique est avant tout une région de montagnes. Les hommes s'y sont installés en priorité dans les secteurs les plus hospitaliers et les plus propices à la sédentarisation et à l'agriculture.

Situé au centre du pays, région de hauts plateaux et de montagnes, l'axe néo-volcanique est également parsemé de nombreux lacs. La ville de Mexico est d'ailleurs construite sur l'ancien lac asséché de Texcoco. A travers la vue reconstituée en trois dimensions de la capitale et de sa situation (figure 3) nous comprenons comment tout cela s'agence et s'organise dans l'espace. La dimension de ce paysage *in situ* ainsi que la pollution atmosphérique de la conurbation ne permettent pas toujours d'appréhender cette réalité topographique dans son ensemble. Sur cette

vue depuis l'ouest de la ville en direction du sud-est on distingue la ville, et aux alentours les nombreux volcans qui la dominent. Les deux sommets enneigés sont, du sud au nord (de droite à gauche), les volcans Popocatepetl (5465 m) et Iztaccihuatl (5230 m). C'est aux pieds de ces nombreuses montagnes, en bas de versants que se localisent les sous-unités paysagères aux *tepetates*.

Le climat de la vallée de Mexico est un climat intertropical différencié en raison de l'altitude (2 200 à 5 465 m) et des effets de versants. Les températures moyennes mensuelles varient peu : seulement 6°C au cours de l'année (Quantin, 1992). La région appartient à la zone intertropicale nord définie par des pluies estivales de six mois (mai à novembre) dont deux à un mois subhumides et quatre à cinq mois subarides (décembre à mars). Il s'agit donc d'un climat tempéré à pluies d'été et six mois de saison sèche hivernale à peine plus froide. Il s'avère que les *tepetates* sont présents partout entre 2 200 et 4 000 m mais n'affleurent que dans la zone climatique allant de 2 200 à 2 800 m, lorsque les précipitations, durant la saison des pluies estivale, ne dépassent pas les 900 mm. Au delà il est possible de rencontrer des formations comparables aux *tepetates* d'un point de vue composition et formation, cependant elles ne sont pas indurées en raison des précipitations plus abondantes, de la profondeur où se trouve le *tepetate*, de l'usage des sols (forêt), et du taux d'humidité toute l'année.

L'influence des reliefs volcaniques n'est pas négligeable sur la présence et la mise à l'affleurement des *tepetates*. La dénivellation relative qui existe entre le pied des versants et le sommet des édifices volcaniques, varie aux alentours de 3000 m. Les horizons indurés se trouvent en situation de piémont, dans des secteurs où se concentre et agit efficacement le ruissellement après avoir pris naissance à l'amont, sur des versants réguliers allant de 10 à 20% de pente. Aux problèmes liés à la plus grande pente s'ajoute celui du sens transversal qui donne des pentes courtes mais fortes (10 à 70%).

Les *tepetates* font partie des unités paysagères que l'on rencontre approximativement à mi-chemin entre les sommets et les lacs. Selon les endroits ils sont accompagnés d'eucalyptus lorsque des reboisements ont été entrepris, ou bien d'une végétation rase constituée principalement de graminées dans les zones d'accumulation au milieu des *tepetates* affleurants. On y rencontre également de nombreux cactées. C'est une fois les plaines agricoles et les cultures irriguées dépassées que l'on commence à atteindre des altitudes supérieures à 2300 m, le paysage devient moins régulier, moins homogène, les villes font place aux villages et aux hameaux de plus en plus petits. L'habitat est toujours groupé, mais les routes font place aux chemins et aux nuages de poussière. Les champs et les parcelles cultivées se font plus rare. Une fois dépassé cet étage très moyennement productif où sont concentrés les *tepetates*, on arrive vers 2800-3000 m à un étage

Nord-Est

Sud-Est



Figure 3: Vue reconstituée en trois dimensions de la vallée de Mexico : composition colorée 453 d'une image Landsat TM sur modèle numérique de terrain (MNT) -la ville de Mexico ressort en bleu-.

plus vert, plus boisé, plus humide. Plus haut encore, les forêts laissent place aux savanes d'altitude et aux pelouses andines jusqu'à atteindre les sommets dénudés, occupés par la neige et les glaces à partir de 4600-4800 m.

2.2. - Les *tepetates* dans l'organisation géosystémique régionale

Les *tepetates* sont des formations présentes et bien visibles dans les paysages de l'axe néo-volcanique mexicain. Elles font partie du quotidien des ruraux et des agriculteurs. Tel un cliché, l'existence de *tepetates* à l'affleurement est associée à différents grands traits de l'organisation et de la structure paysagère. Au sein même de cette région géographique qu'est l'axe néo-volcanique, nous avons tenté de situer et de définir les unités paysagères dans lesquelles se rencontrent ces différents *tepetates*.

2.2.1. - L'échelle des massifs

Les *tepetates* ont été étudiés sur les versants occidental et oriental de la Sierra Nevada qui séparent les bassins de Mexico (Texcoco) et de Tlaxcala. Les sols y sont dérivés de dépôts volcaniques pyroclastiques, cendres rhyolitiques ou dacitiques très siliceuses et alcalines (Quantin, 1992). Ils sont distribués en climotoposéquences, entre 2200-2400 m et 4000 m d'altitude. On observe successivement d'amont en aval (figure 4) :

- andosols,
- sols bruns eutrophes,
- sols bruns vertiques,
- sols bruns subarides à croûte calcaire (Peña et Zebrowski, 1992, et Werner *et al.*, 1988).

Sur les piedmonts et glacis, en climat à saison sèche marquée, les sols comportent plusieurs horizons indurés. Sur la partie supérieure et moyenne des piémonts, les *tepetates* sont friables à l'état humide et ont un comportement de "fragipan". Au bas des piémonts et sur les glacis, une induration secondaire calcaire, rend les sols particulièrement durs (figure 4).

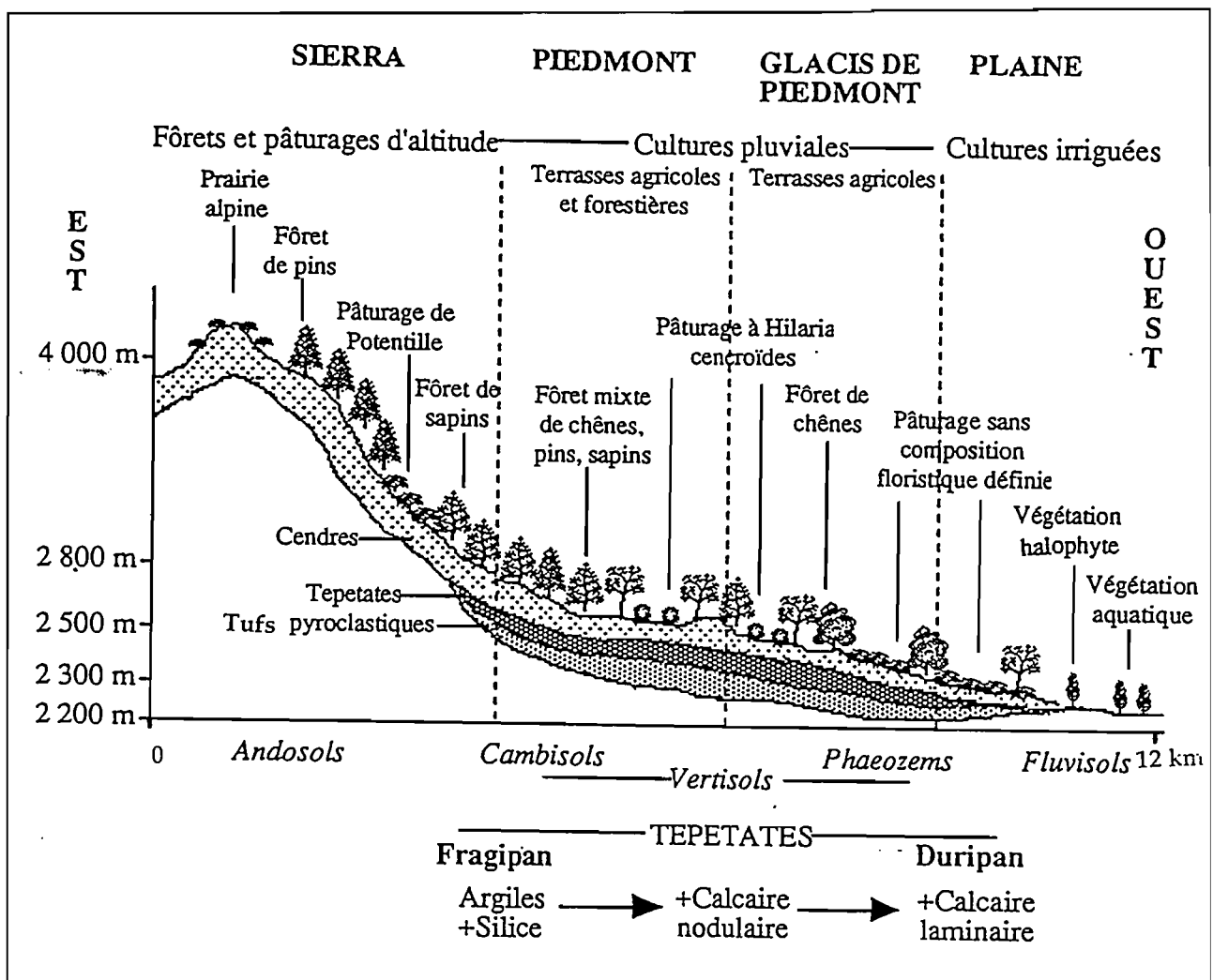


Figure 4 : Climatoposéquence de sols et tepetates du versant occidental de la Sierra Nevada (Navarro y Prat, 1996 d'après Quantin 1992 et Gonzalez, 1993)

2.2.2. - L'échelle des versants

De nombreux et profonds ravins viennent entailler les versants (photo 2 et 3). Ceux-ci sont associés à des zones "perturbées" ou d'équilibre instable et corrélatifs de la mise à l'affleurement des *tepetates*. Les dépôts des cendres très fines à l'origine de la fertilité spontanée des sols, qui constituent le substrat, ne permettent aucune résistance au décapage et au creusement profond par les fortes précipitations de la saison des pluies. Profonds de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres, ces ravins sont relativement étroits. En raison de leur humidité relative plus grande, ils bénéficient souvent d'une végétation arbustive plus dense que les surfaces planes qui les entourent.

Sud-Est

Nord-Est



Figure 5 : Vue en trois dimensions du mont Tlaloc Telapón (El Mirador) versant occidental : composition colorée 453 d'une image Landsat TM sur le MNT.

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



Photo 2: Grand ravin taillé dans un replat de piémont.

Cette photographie distingue bien les couches successives de *tepetates* formées par les différents dépôts de cendres volcaniques.



Photo 3: Ravines sillonnant le piémont, Santa Catarina del Monte.

Malgré une végétation rase et très peu dense, quelques arbres et arbustes trouvent un milieu hospitalier dans le fond des ravines.

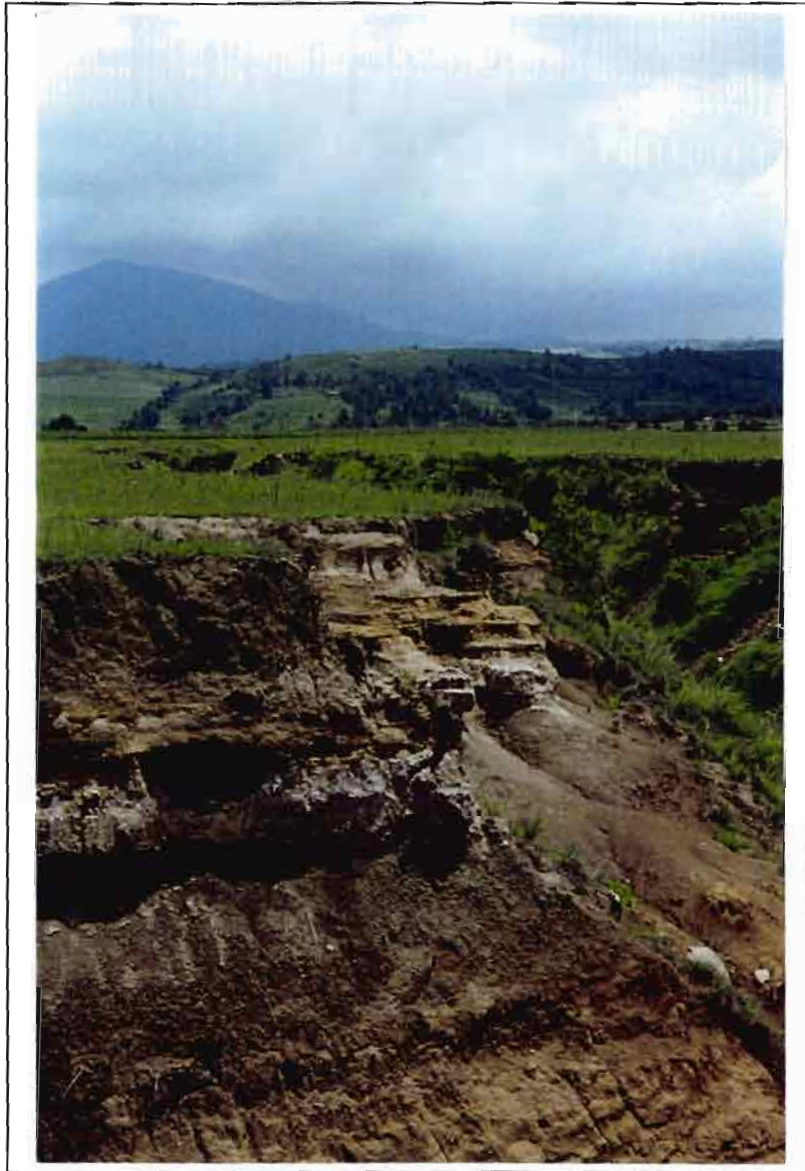


Photo 4: Ravin au milieu d'un champ.

A quelques mètres de là on ne réalise pas la présence de ce profond ravin qui sillonne une plaine céréalière du Michoacan.

Les *tepetates* sont localisés dans cette section des versants, sur des pentes supérieures à 10% et inférieures à 40%. Séparés par les nombreux ravins, ils constituent des bandes parallèles aux versants (photos 2 et 3).



Photo 5: *tepetates* discontinus et érosion régressive.

Sur cette photo apparaît l'agencement des différentes unités paysagères autour des *tepetates*. Malgré la présence d'un couvert végétal ligneux, l'érosion régressive arrive à se frayer un chemin en partant des ravines jusqu'à laisser de grandes surfaces discontinues de *tepetates* affleurants.



Photo 6: Unité paysagère aux *tepetates*.

On distingue bien ici les traces d'un ancien parcellaire qui a été abandonné suite à l'érosion du sol et à la mise à l'affleurement de grandes plaques de *tepetates*. Une reconquête semble donc s'amorcer par les herbacées et quelques ligneux dans les endroits où le sol n'a pas encore totalement disparu.

Ces coupes naturelles formées par les ravins révèlent la succession des dépôts d'origine volcanique. Les *tepetates* sont une partie de ces dépôts. Ainsi sont-ils également disposés en couches successives plus ou moins épaisses. Lors de leur mise à l'affleurement par l'érosion ces successions de couches sont alors mises en évidence. Comparable à la structure en pelure d'oignon, les couches les plus tendres laissent place aux couches sous-jacentes, cela tout en gardant quelques micro-reliefs témoins de leur présence passée (photos 7 et 8).

Caractérisés par une alternance de petites surfaces de *tepetates* affleurants et de *tepetates* recouverts d'une végétation basse et peu dense, les *tepetates* discontinus forment une sous-unité paysagère qui ne prend pas en compte uniquement la formation géo-pédologique, mais son association avec un certain couvert végétal.

Les unités aux *tepetates* affleurants sont quasiment dépourvus de toute végétation. Leur surface lisse est imperméable et induit un fort ruissellement.

Bien que présents sans distinction particulière en zone rurale comme en banlieue de la mégapole de Mexico, les *tepetates* constituent d'abord une contrainte forte pour l'activité agricole. En ville comme en périphérie de la conurbation, la pression foncière est telle que peu importe le substrat géologique ou pédologique pour l'habitat urbain. Ce sont dans les campagnes reculées, loin de la capitale ou d'une autre des grandes villes de cette région centrale, que les *tepetates* sont vécus au quotidien par les paysans. Regroupant leurs cultures dans les zones sans *tepetates*, les paysans laissent le bétail divaguer dans ces étendues très dégradées, au milieu desquelles survivent quelques herbes ou arbustes sur les reliquats de sols. Ces terres, parce qu'elles sont dégradées, sont l'objet d'un usage communautaire qui contribue à aggraver la pression. Presque toujours, les familles paysannes doivent se contenter du minimum vital (Ly, 1993).



Photo 7: *tepetates* discontinus.

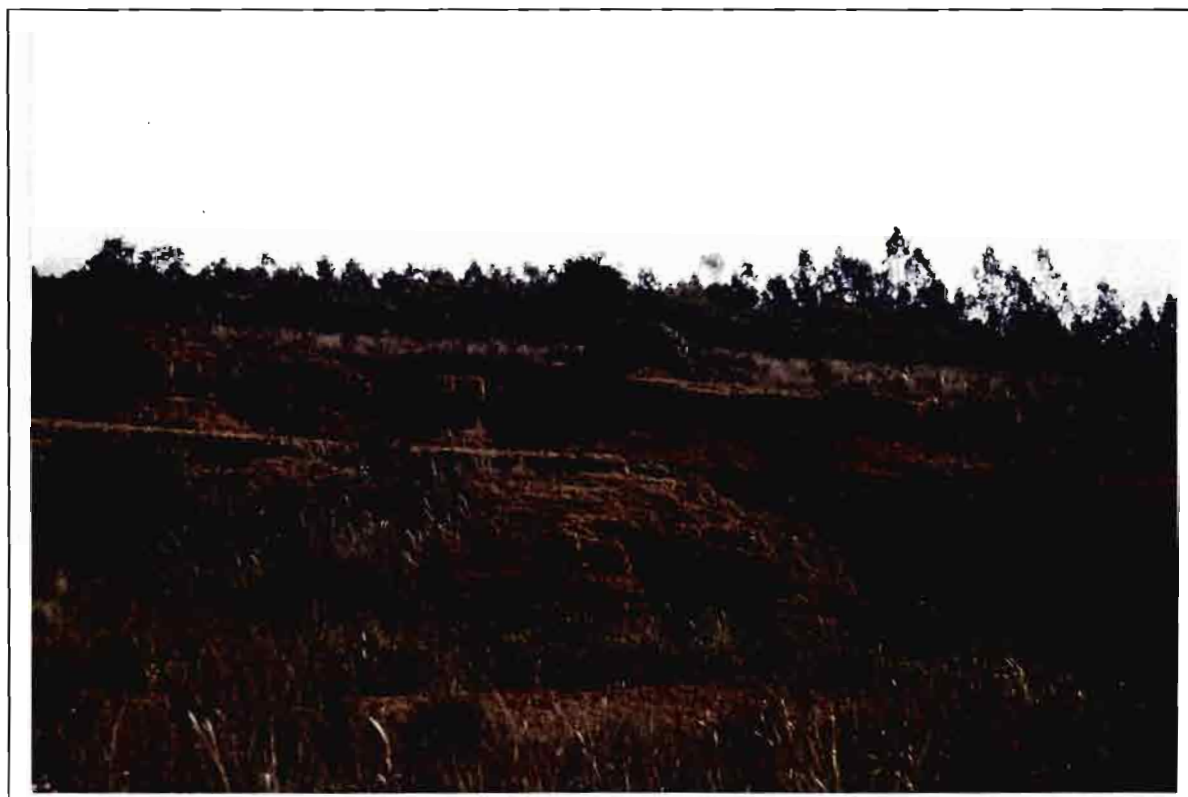


Photo 8: Comme des pelures d'oignon.

La succession des dépôts de cendres, à l'origine de la mise en place des *tepetates*, peut leur conférer l'aspect structurel d'une peau d'oignon.

2.3. - L'origine des *tepetates*

L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques peut être due à des processus géologique, pédologique, ou une combinaison des deux (Quantin, 1992). Nous allons présenter par thèmes les différents mécanismes qui sont intervenus dans la formation puis l'induration des *tepetates*.

2.3.1. - Substrat géologique favorable à la genèse des *tepetates*

La formation volcanique de la Sierra Nevada est apparue il y a environ 1,7 million d'années, à la fin du Pliocène, et de nombreux volcans sont encore très actifs aujourd'hui. Cette formation semble arrêtée depuis un million d'années sur le sommet du massif Tlaloc Telapón (partie nord de la Sierra Nevada). Les laves et les ponces calco-alcalines, généralement riches en silice et en alcalins, surtout en sodium, correspondent le plus fréquemment à des andésites "acides" et des dacites, alors que les basaltes et les rhyolites sont plus rares (Quantin, *op. cit.*). 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 et de retombées de cendres et de ponces. Ces formations pyroclastiques, surtout sous forme de nuées ardentes, ont recouvert d'immenses surfaces sur la Sierra, les piémonts et les plaines alentour, et cela sur de grandes épaisseurs. Ces formations superficielles ont pu être remaniées par le vent ou l'érosion hydrique au cours des dernières glaciations (40 000 à 10 000 B.P., selon White, 1962 et Heine, 1973, cités par Quantin, *Ibidem*), sous forme d'arènes, de coulées boueuses et de tills.

Les tufs pyroclastiques, semblables à un grand nombre d'horizons indurés des sols volcaniques, ont des caractéristiques particulières. Un tuf pyroclastique est une cendre consolidée, dont le diamètre des clastes¹ est inférieur à 2 mm. Il peut contenir des éléments grossiers (Fisher et Schmincke, 1984). La matrice est formée de clastes très fins de verres de microlites, cimentés entre eux et des sables de lapilli vitreux et de phénocristaux. Le ciment des tufs peut être dû à une fusion superficielle des verres au moment du dépôt, ou à leur altération pelliculaire en des produits amorphes isotropes, d'opale ou de palagonite, voire des minéraux argileux ou des zéolites.

¹ Clastes : fragments de lave, de verres ou de phénocristaux volcaniques.

2.3.2. - La dynamique pédogénétique propre aux *tepetates*

La pédogenèse peut intervenir de deux manières distinctes dans l'induration de certains horizons (Quantin, 1992). Il arrive qu'elle se surimpose à la volcanogenèse et consolide un sédiment pyroclastique partiellement altéré. Cependant, un sol peut également se transformer et produire seul son ciment, qu'il soit siliceux, calcaire, ou ferrugineux. Les pédologues distinguent selon le degré et la nature de l'induration les "fragipan" matériaux durs à l'état sec mais friable à l'état humide, des "duripans" qui demeurent toujours durs, et dont le ciment est de la silice.

Certains horizons près de la surface présentent les caractéristiques de tuf fin (Hidalgo, 1995), avec une matrice dense, des clastes volcaniques abondants et peu altérés, un arrangement porphyrique du squelette, auxquels se surajoutent quelques traits de pédogenèse : fissuration, tubes biologiques, revêtements argileux, remplissage des fissures par des carbonates. Dans d'autres horizons, plus en profondeur, les traits pédologiques sont plus marqués : réorganisation plasmique de la matrice, revêtements de ferri-argilanes dans les vides, formation de nodules de carbonates. Des silifications apparaissent plus fréquemment à la surface des revêtements argileux, vers la base du profil mais en pourcentage infime. Dans la matrice argilo-limoneuse est présente de la silice "libre" cependant elle ne joue pas le rôle de ciment.

Dans la vallée de Mexico (Quantin, *op. cit.*) on rencontre un *tepetate* à encroûtement calcaire laminaire. Il s'agit d'une formation de tuf induré qui affleure sur le glacis bordant le lac de Texcoco. A la surface du tuf, des lamelles entrecroisées de calcaire, englobent des lentilles de tuf encore peu altérées. En profondeur le calcaire pénètre seulement les fissures et les tubes biologiques. La calcite recouvre des revêtements siliceux. La carbonatation est un processus pédologique récent, tandis que la consolidation de la matrice du tuf serait due à la volcanogenèse. Les *tepetates* sont interstratifiés dans une succession de dépôts volcano-sédimentaires. Ils sont recouverts en surface par un dépôt sablo-limoneux et en profondeur par plusieurs paléosols superposés (Quantin, *Ibidem*). La volcanogenèse associée à certains facteurs de pédogenèse, principalement carbonatation et remplissage de la porosité par les argiles, expliquent la consolidation des *tepetates*.

2.3.3. - La mise à l'affleurement des *tepetates*

Les *tepetates* sont donc des formations d'origine à la fois géologique (volcanologique) et pédologique. Ils sont normalement recouverts par un sol plus ou moins épais, constitué également à partir de cendres volcaniques. Ces sols fertiles sont également fragiles. Lorsqu'ils ne sont pas protégés par une végétation suffisamment dense, ils subissent les caprices de la pluie.

Ainsi, l'érosion hydrique peut laisser très rapidement des traces importantes de son passage dans le paysage, provoquant l'affleurement des *tepetates* après décapage du sol meuble qui les recouvre. L'induration des *tepetates* modifiant les conditions d'infiltration et de régime hydrique, il en résulte une faible perméabilité, de l'ordre de 1 mm/h en laboratoire (Nimlos, 1990). Les coefficients de ruissellement sont donc élevés, ils provoquent une érosion en nappe sur l'horizon induré et une reprise d'érosion sur les sols proches non indurés. La circulation superficielle de l'eau est d'autant plus importante que la couverture végétale est discontinue voire absente sur les *tepetates*.

Dans la vallée de Mexico, les caractéristiques des pluies font que seule une quinzaine de pluies génèrent près de 80% de l'érosion. Les mesures de ruissellement et d'érosion effectuées sur *tepetate* nu (Prat *et al.*, 1996-b; Oropeza, 1995), font ressortir des très fortes valeurs du coefficient de ruissellement, de 83 à 92%, et des pertes en terre de 20 t/ha/an en moyenne.

L'induration des formations en premier lieu, puis l'environnement naturel ensuite (montagnes volcaniques, climat-végétation) font que les *tepetates* constituent un milieu propice à l'érosion hydrique. La présence humaine, très ancienne dans cette région, s'est toujours associée aux phénomènes naturels pour accentuer l'érosion. Ainsi, l'érosion des sols et la mise à l'affleurement des *tepetates* se sont effectués au rythme de l'histoire, en fonction de la succession des sociétés et de leurs modes d'organisation.

3. - Place des *tepetates* dans l'histoire et la société mexicaine

Il n'existe pas d'étude à grande échelle concernant l'impact direct des *tepetates* sur les populations rurales. Cependant, grâce à quelques études sociologiques très ciblées sur certaines communautés paysannes d'origine indienne (Navarro, 1992; Linck, 1992; Ly, 1993; Lepigeon, 1994; Faugère, 1995; Alexandre, 1996), il est possible de se faire une idée de la situation plus générale qui touche tous les petits paysans de cette région centrale du pays. Les *tepetates* tels que nous les avons décrits précédemment sont le résultat de l'érosion des sols, qui est elle même liée de manière très directe à l'histoire des hommes dans ces régions. Bien que certains événements aient eu une influence plus directe que d'autres sur l'état de l'érosion et de l'affleurement des *tepetates* d'aujourd'hui, nous avons essayé de retracer un tableau historique du pays et de la région qui tienne compte de ces aspects du paysage agricole mexicain.

3.1. - L'époque précolombienne

Les sociétés précolombiennes avaient une agriculture fondée sur la complémentarité culture/élevage, avec un système de production suffisamment souple, induisant une régénération des sols en continu. Leur système d'exploitation agricole était équilibré et sophistiqué. Ils cultivaient des plantes autochtones très bien adaptées au contexte de ce milieu montagnard particulier. Les associations de culture avec le maïs (fèves, pois-chiches, courgettes, ...) étaient pratique courante. Non seulement elles rentabilisaient l'espace cultivé avec des plantes qui ne puisaient pas les mêmes ressources au même moment, mais également elles limitaient la perte en sol par l'érosion hydrique, grâce à un couvert végétal plus dense.

Au fur et à mesure de la sédentarisation et de l'accroissement de la population au sein de ces communautés primitives, les cultures se sont étendues depuis les plaines vers les versants, au détriment des zones boisées. Suite à une sécheresse dans la vallée de Mexico, Netzahualpilli (1460-1515) fit construire des canaux d'irrigation et des terrasses. Les *tepetates* étaient alors identifiés : les Nahuatl définissaient le *tepetate* comme un matériau dont la consistance est à mi-chemin entre la terre et la roche, en la considérant plus comme une roche qu'un sol. Ils avaient cependant même défini plusieurs niveaux de "tepetates agricoles", plus ou moins sableux ou argileux (Navarro y Prat, 1996). Williams (1972, 1992) a repéré parmi les glyphes définissant la nature des sols dans les documents correspondant aux recensements de population du XVI^e siècle, celles se rapportant aux *tepetates*. Les caractéristiques des sols et des parcelles du cadastre précolombien sont particulièrement détaillées, cependant, l'absence de toute référence géographique quant à la localisation des terrains a empêché jusqu'à présent toute comparaison avec l'état des sols actuels (Ortiz *et al.*, 1990).

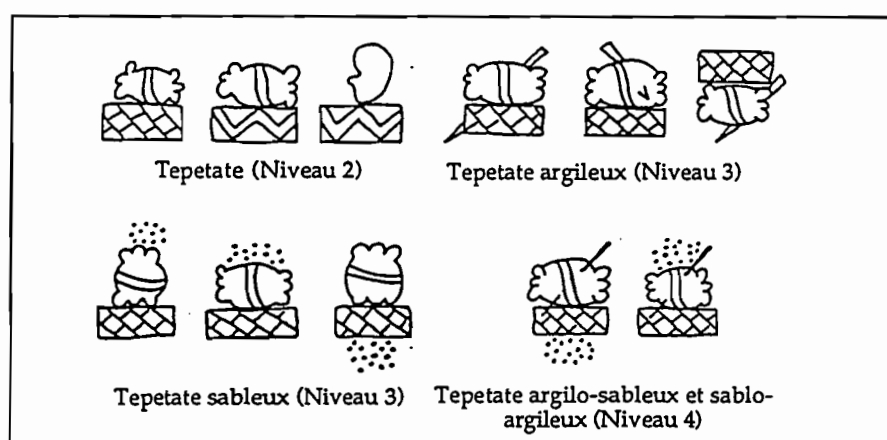


Figure 6 : Principaux glyphes correspondants aux tepetates selon le Milcocoli et le Tlahuelmantli (Williams 1972, 1992)

3.2. - La conquête espagnole

De 1519 à 1521, Hernan Cortes détruisit l'empire aztèque et établit la ville de Mexico sur le site de la capitale aztèque, Tenochtitlan. A force de massacres, de mauvais traitements, de maladies nouvelles, et de famines, c'est près de 90% des populations indigènes qui disparaissent, en même temps que s'effectue le remplacement forcé des cultures par les pouvoirs politiques et religieux espagnols (Chevalier, 1953). L'apparition des grandes propriétés, les haciendas, corrélative aux changements brutaux des structures agraires et foncières, ainsi que l'introduction du cheptel sous forme d'élevage extensif, fut radicale. Le dépeuplement eut un effet direct sur l'abandon et la destruction des ouvrages anti-érosifs. Ces infrastructures, ainsi que les systèmes d'irrigation, qui demandaient un entretien constant et une main d'oeuvre importante furent bien négligées par les espagnols. L'érosion reprit ses droits et une grande quantité de sols disparût.

Rapidement les espagnols s'approprièrent les terres des vallées et les sources d'eau. La majorité de la population indienne survivante dû se replier sur les zones les plus en pente des collines et des montagnes. Ces zones en marge étaient souvent encore boisées ou déjà couvertes de *tepetates* plus ou moins mis à nu. Les anciennes cultures irriguées de maïs furent remplacées par la culture du blé et l'élevage. Elevage qui dans certaines régions, notamment Tlaxcala, prit une telle ampleur dans ce milieu naturel déjà fragile, qu'il y eût rapidement surpâturage des versants, avec destruction des versants et accélération de l'érosion par le sur-piétinement.

La construction des villes coloniales et l'augmentation de la croissance urbaine demanda de plus en plus de bois d'oeuvre et de chauffage, ce qui entraîna une déforestation progressive des reliefs.

3.3. - De l'indépendance à la révolution

En 1810 la guérilla éclate, le soulèvement populaire contre la domination espagnole est mené par Hidalgo puis par Morelos et Guerrero. En 1824, le Mexique devient une république fédérale. Après de nombreuses luttes internes, de coups d'état, d'invasions nord-américaine et française, Porfirio Díaz prend le pouvoir en 1882, et crée une dictature moderniste.

Porfirio Díaz est renversé par Madero en 1910, marquant ainsi le début de ce qui va devenir la Révolution mexicaine. Pancho Villa et Emiliano Zapata sont les plus connus de cette guerre des pauvres et des indiens contre l'oligarchie.

De 1910 à 1920, suite aux années de la révolution, de nombreuses parcelles de terre furent abandonnées suite à la baisse de la population et aux pillages, et à l'insécurité des campagnes.

3.4. - De la révolution institutionnalisée à aujourd'hui

La loi du 6 janvier 1915 proposa la restitution des terres aux communautés paysannes qui en avaient été dépossédées. En 1917, une nouvelle constitution officialise la **réforme agraire** et établit l'*ejido* et les *bienes comunales* comme deux nouvelles formes de propriété agricole. L'*ejido* qui correspondait initialement à l'ensemble des terres d'usage collectif devient alors des terres bien délimitées dont on peut tirer l'usufruit, mais dont la vente est interdite. Les dotations agraires des communautés furent timides au début des réformes. Il fallut en fait attendre le gouvernement de P. Elias et surtout de L. Cardenas, pour qu'ait enfin lieu une distribution massive de terres aux petits paysans mexicains. Du jour au lendemain le parcellaire fut divisé, et les cultures modifiées en fonction des besoins. Dans la région de Texcoco qui était autrefois plantée d'agaves pour la fabrication et l'exportation du "pulque²", la diminution du nombre de pieds, liée à la redistribution, entraîna la disparition des systèmes anti-érosifs naturels qui accompagnaient sa présence (Navarro y Prat, 1996). En raison des besoins vitaux de chaque paysan, la production sur ces petites parcelles est intense, et les sols sont sollicités à outrance. A partir de 1927, pour permettre à un plus grand nombre de paysans de vivre de l'agriculture, les terres couvrant les flancs des montagnes sont attribuées...

Après la réforme agraire, l'introduction de la charrue et l'augmentation du bétail vont favoriser les défrichements des versants et leur mise en culture.

Les cultures alimentaires furent déplacées ces dernières années vers les cultures fourragères afin de satisfaire aux besoins du bétail. Le complexe bétail/fourrage est devenu une industrie hautement industrialisée qui favorise la production agricole à grande échelle. Intensive et orientée vers l'exportation, elle met en marge des millions de paysans (Otero *et al.*, 1993). La monoculture, en relation avec la production spécialisée de fourrages, elle même combinée avec de hauts besoins en fertilisants et pesticides, a provoqué de graves déséquilibres écologiques, en vidant en même temps les sols de leur fertilité naturelle.

Suite a la révolution verte qui se déroula dans les années 60 les agriculteurs sont poussés dans un mouvement de spécialisation de manière à diminuer les charges dans d'autres domaines et à investir dans du matériel plus lourd (tracteurs). D'une révolution génétique, on est arrivé à une révolution technique puis à une révolution commerciale que tous les exploitants n'étaient pas à même de pouvoir assumer. Les petits paysans sont exclus et la révolution verte se transforme en révolution sociale. En 1970, on distingue le bloc des 15% de la population la plus riche, et de l'autre côté 80% des exploitations qui se situent à peine au seuil de stricte reproduction et de

² boisson alcoolisée faite à partir de la sève d'agave fermentée

subsistance (Linck, 1994). Le processus de décapitalisation de leur patrimoine est entamé, on a épuisé les réserves de fertilité des sols.

L'agriculture ne parvenant plus à elle seule à assurer la survie des familles en milieu rural, celles-ci se tournent vers l'extérieur : les villes et les Etats Unis.

3.5. - La politique agricole actuelle

Le traité de libre commerce de l'Amérique du Nord est le point culminant d'une série de réformes économiques introduites au Mexique pendant la dernière décennie, et plus particulièrement depuis que Carlos Salinas occupe la présidence de 1988 à 1994 (Otero *et al.*, 1993). En ce qui concerne l'agriculture, les réformes du président Salinas ont été effectuées pour que le Mexique soit le plus attractif possible vis-à-vis des investisseurs étrangers, et ainsi préparer le pays à l'intégration économique aux côtés des Etats Unis et du Canada.

La suppression de l'article 27 entraînant l'abandon du système des "ejidal" peut se comprendre dans le contexte de la crise de l'agriculture mondiale, caractérisée par les grands excédents en grains des pays en voie de développement, car ils devenaient très coûteux à entretenir (Otero *et al.*, *op.cit.*). Ainsi, la libéralisation de l'agriculture dans l'économie mondiale se reflète dans la grave crise de l'agriculture mexicaine.

La décapitalisation des campagnes mexicaines a été le produit d'une réduction de l'investissement public dans le développement rural. La détérioration du pouvoir d'achat et du niveau de vie dans les campagnes est corrélatif de l'ouverture des frontières du pays à l'importation libre de produits agricoles.

De plus en plus le contexte économique mondial prend le dessus sur le fonctionnement de l'agriculture mexicaine. Tous les événements historiques ou contemporains évoqués précédemment ont eu un impact direct sur les problèmes de perte en sols cultivables des petits paysans de la Sierra mexicaine, et donc sur l'extension des *tepetates*. On se rend compte que l'érosion des sols n'est pas le seul facteur à traiter pour envisager de rendre au Mexique et à ses paysans les moyens d'une survie moins dépendante de l'extérieur. Cependant, malgré la complexité de la situation, autour d'un problème qui pourrait facilement se trouver oublié, les *tepetates* sont une réalité à prendre en considération parmi les paysages ruraux du Mexique central.

4 - Réhabilitation des *tepetates* : une nécessité environnementale et sociale.

Dans le paysage mexicain de l'axe néo-volcanique, l'environnement, et l'esthétique sont considérés comme des préoccupations superflues de pays nantis. Le stade de développement du pays est à la fois très avancé sous certains aspects, et à la fois en complet déséquilibre par rapport à la majorité de la population. Cependant, on ne peut envisager de changement qui soit bénéfique sans agir sur les causes plutôt que sur les conséquences. Quelle est la situation concrète des zones concernées par les problèmes d'érosion des sols et de mise à l'affleurement des *tepetates* ?

Chacun des événements historiques cités précédemment a eu sa part d'influence sur l'état actuel du paysage de la Sierra mexicaine, que ce soit sur les sociétés ou sur le milieu. Les modifications successives du foncier, les changements dans les pratiques agricoles, la croissance démographique à la fois humaine et animale, n'ont jamais réellement laissé le temps au milieu de retrouver un équilibre. Avec la surexploitation agricole, l'érosion ne fit qu'augmenter.

4.1. - Restauration des milieux "naturels" et des paysages

L'usage des sols volcaniques indurés pour l'agriculture est une tradition ancienne au Mexique. Garcia (1986) et Williams (1972) signalent que les sociétés précolombiennes cultivaient déjà, dès 1600 ans BC, les *tepetates* après les avoir rompus et aménagés en terrasses. Traditionnellement, les *tepetates* étaient récupérés en deux ans dans l'état de Tlaxcala, en cultivant de la fève et du haricot la première année, et du maïs la deuxième.

La réhabilitation implique une correction des niveaux d'azote et de phosphore, par une fumure adéquate. Les défauts de dureté et de compacité des *tepetates* sont corrigés par le défoncement des matériaux jusqu'à obtention d'agrégats suffisamment petits. La réhabilitation des *tepetates* est à l'heure actuelle presque toujours mécanisée. Le défonçage est réalisé au moyen de puissants tracteurs qui effectuent un sous-solage à 80 cm de profondeur, suivi de passages de pulvérisateurs à disques. Le billonnage après roturation réduit le ruissellement et freine l'érosion pour les pluies de faible intensité. L'édification de terrasses n'est réalisée que dans le cadre de projets financés par les états. D'une manière générale, les paysans se contentent, après défonçage du sol, de faire réaliser des bordures de terre limitant l'érosion. Les carences originelles en azote et en phosphore peuvent être corrigées par une fertilisation, minérale ou organique, adaptée à la plante. Ainsi on obtient des rendements satisfaisants, presque normaux la première année pour le blé, l'orge, plus tardifs (à partir de la deuxième, voir de la troisième année) pour le maïs, le haricot ou la fève (Quantin, 1992; Marquez *et al.*, 1992; Baez *et al.*, 1996).

D'un paysage désolé de *tepetates* affleurants et discontinus, on peut donc recréer un paysage agricole dynamique. Cela n'est bien sûr pas gratuit, mais peut être économiquement rentable (Navarro y Prat, 1996). Par contre, la restauration d'un milieu naturel et productif a des conséquences sociales et environnementales extrêmement positives : arrêt de l'érosion et d'extension des zones dégradées, une réduction des inondations en plaine, recharge des nappes phréatiques, repopulation humaine, végétale et animale, *etc.*

4.2. - Caractérisation de l'agriculture sur les zones de *tepetates*

A partir d'une préparation soignée du défonçage du "tepetate", d'une fertilisation raisonnée et d'une rotation adéquate (pas de maïs en première année de culture, mais une légumineuse ou céréale de petits grains type blé, orge, avoine...), on obtient dès la première année des résultats dépassant les rendements sur les sols traditionnellement cultivés (mais trop argileux) et les moyennes régionales et nationales (Navarro y Prat, 1996; Baez *et al.* 1996).

Tableau 1 : Rendements obtenus sur des *tepetates* cultivés comparés aux moyennes régionales (Navarro et Prat, 1996)

	-----Essais (1000 m ²)-----			Moyenne régionale
	1ère année	2ème année	3ème année	
Blé ou Orge en association avec vesce ou <i>Medicago</i>	3.0	3.0	3.0	2.0
Maïs local monoculture (85 000 plants)	<0.25	2.0	3.0	3.0
Maïs local association (50 000 plants)	<0.25	2.5	3.5	
Fève monoculture (85 000 plants)	1.2	1.5	1.5	1.2
Fève association (50 000 plants)	1.0	1.0	1.0	

4.3. - Dépendance des communautés paysannes face au milieu

Les habitants de l'axe néo-volcanique sont de tradition rurale. Si de nos jours une grande partie de la population se retrouve concentrée dans les centres urbains qui ne cessent de s'accroître, c'est que l'agriculture n'arrive souvent plus à faire vivre les paysans.

Toutes ces régions de montagnes ont été des zones de stabilité, dans lesquelles les communautés indiennes vivaient modestement. Aujourd'hui, suite à l'érosion des sols et à la dégradation du milieu, ces mêmes communautés n'arrivent plus à vivre de leur production agricole. Elles sont devenues dépendantes de ressources extérieures. Cela se traduit par une

émigration partielle des hommes, les chefs de famille puis les fils, vers la ville la plus proche, la capitale, ou les Etats Unis. Ils espèrent y trouver un emploi pour survivre et faire vivre leur famille, les possibilités d'exploitation des terres familiales étant de plus en plus limitées.

Les secteurs touchés par l'affleurement et l'extension des *tepetates* correspondent à des sites où sont installées des populations marginalisées, souvent d'anciennes communautés indiennes, et essentiellement de très petits paysans. Ces régions plus ou moins reculées sont enclavées au pied des massifs montagneux de la Sierra. Leur accès par les chemins n'est pas toujours facile et les communications avec l'extérieur sont réduites. Les sources de revenus en dehors de l'agriculture sont quasi inexistantes.

Dans cette région, qui comprend la plus forte densité de population du pays, et plus encore à proximité de la ville de Mexico, la pression périurbaine et foncière est très marquée. Or bien souvent seules les zones marginales, abandonnées car érodées, couvertes par les *tepetates*, constituent les seules réserves foncières disponibles pour une distribution des terres.

4.4. - Les programmes de mise en valeur

Les *tepetates* commencèrent à être réhabilités, dans certaines zones en périphérie de Mexico, à partir des années 40. Ce travail d'ameublissement et de terrassement ne pouvant se faire que sur de petites surfaces (4 à 6 m² pour 50 cm de profondeur par homme et par jour), il ne concerna que des zones à l'intérieur ou à proximité des villages, pouvant être irriguées (Ly, 1993).

Les premiers essais de reboisement datent de 1968 avec la création d'un programme de récupération de zones érodées par la direction de la *ordenación forestal*. Mais ce n'est qu'aux environs des années 1972 et 1973 que se sont multipliés, pendant près de dix ans les programmes de réhabilitation des zones érodées. Ceux-ci ont été réalisés pas des institutions officielles parapubliques telles que CODAGEM (*coordinación para el desarrollo de la agricultura y el ganado en el estado de Mexico*), C.L.T (*comision del lago de Texcoco*), D.G.C.S.A (*dirección general de conservación de suelos y agua*), etc., essentiellement dans les états de Puebla, Tlaxcala et Mexico. Les énormes travaux de terrassement et de sous-solage entrepris au sein de ces programmes étaient essentiellement orientés vers le reboisement afin de limiter l'érosion et l'apport de sédiments dans les zones à forte densité de population, ceci afin de palier en partie au problème de la saturation foncière. La politique publique des années 60/70 utilisa la construction de routes et l'aménagement d'ouvrages anti-érosifs, comme moyen de fournir des emplois dans le milieu rural. De plus, dans la région de Tlaxcala et la vallée de Mexico, un financement fédéral permit l'aménagement d'ouvrages tels que : sous-solage, défonçage, terrasses parallèles aux courbes de

niveau avec plantation d'agaves sur les bordures, reboisement, construction de petits barrages collinaires de retenue d'eau, mise en culture des *tepetates*, etc.

La réalisation de terrasses par les institutions officielles parapubliques pour la mise en culture des *tepetates* est plus tardive. Elle s'est faite dans les années 80 sous la pression des paysans désireux de profiter de ces puissants moyens pour mettre en valeur leurs terres érodées. Ainsi, en 1983, dans l'état de Tlaxcala fut créée l'institution MATET (*maquinaria para las tierras del estado de Tlaxcala*), qui effectue des travaux de défonçage et de terrassement avec une participation minimum de la part des paysans. Cependant, cette participation financière a peu à peu augmenté et représente actuellement de 50 à 90% des coûts de revient des travaux (Zebrowski, 1993).

Les premières recherches scientifiques concernant l'utilisation agricole des *tepetates* remontent à 1961 ; le *tepetate*, défoncé au moyen d'explosifs est façonné en terrasses au bulldozer (Garcia, 1961). Depuis, l'intérêt des chercheurs s'est manifesté et les résultats tant en laboratoire qu'au champ montrent que les *tepetates* peuvent être reboisés ou mis en culture après sous-solage et apport de phosphore et d'azote.

Un certain nombre de programmes de recherche scientifique sur les propriétés des *tepetates*, avec mesures d'érosion sur *tepetate* affleurant et réhabilité, ont été effectués par l'ORSTOM, en collaboration avec les universités locales tel que le Colegio de Montecillo à côté de Texcoco.

5. - Conclusion

La mise en culture des *tepetates* peut assurer un complément alimentaire de l'ordre de 20 à 30% dans les communautés périurbaines (Ly, 1993), et jusqu'à 60% dans les communautés rurales (Lepigeon, 1994), ce qui est appréciable. Cependant ces réhabilitations ne concernent pour l'instant que des surfaces relativement faibles pour chaque producteur, et il est peu probable que cela garantisse aux paysans de rester sur leurs terres, ou qu'ils envisagent d'y retourner.

Les travaux de réhabilitation n'ont été effectués que sur certaines zones, déjà bien connues pour leurs problèmes de revenus agricoles liés à l'érosion et aux *tepetates*. Le principal obstacle aujourd'hui concerne la disproportion entre les surfaces dominantes en *tepetates* quand ils affleurent, et les moyens disponibles pour les réhabiliter. A raison de un à deux ha par semaine, il faudrait des centaines d'années pour tout faire. Il faut donc cibler des zones prioritaires. Il devient

nécessaire à présent de localiser, sur l'ensemble de la région géographique touchée par ce problème, les secteurs et les communautés paysannes directement concernés. Ce n'est qu'une fois qu'un état des lieux précis et fiable aura été fait sur l'ensemble de l'axe néo-volcanique mexicain, que des programmes de réhabilitation des *tepetates* pourront être entrepris au niveau national.

Concernant la connaissance des *tepetates* en tant que formation, les méthodes de réhabilitation, les coûts³ et les besoins potentiels des populations rurales, le travail n'est plus à faire. Suffisamment de recherches ont déjà été effectuées sur tous ces aspects pour qu'il ne reste plus qu'à mettre en oeuvre ces acquis. Concernant la cartographie des *tepetates* il n'existe aujourd'hui que quelques résultats scientifiques ponctuels, et pas toujours exploitables.

Le besoin en terres cultivables pour les populations concernées n'est plus à prouver, et la mise en oeuvre d'un grand programme de réhabilitation des *tepetates* de l'axe néo-volcanique ne saurait que les soulager. En raison du contexte économique dans lequel se trouve le pays, ainsi que les problèmes de surpopulation urbaine dans la capitale, le gouvernement et les décideurs seraient prêt à mettre en oeuvre un programme de ce type. Cependant il faut avant tout relier les différentes études déjà effectuées sur le sujet, et trouver un moyen de les inclure dans une spatialisation systématique et à grande échelle.

Malgré le nombre d'études déjà réalisées pour tenter de cartographier et d'estimer les surfaces de *tepetates* le long de l'axe néo-volcanique trans-mexicain, aucune n'est satisfaisante à ce jour. Soit les échelles de travail sont bien trop petites pour être exploitées, soit la zone de travail est centrée sur une petite région dont on connaît déjà le moindre détail par des études fines de terrain. C'est la raison pour laquelle nous envisageons de mettre au point une méthode pour cartographier les *tepetates* sur l'ensemble de l'axe néo-volcanique, en utilisant d'une part des données indirectes existantes sur le milieu (climat, géologie, altitude, pentes, etc.), sachant que les cartes pédologiques existantes de l'INEGI ne sont pas satisfaisantes en ce qui concerne la classification et la spatialisation des formations indurées dont les *tepetates*, et en utilisant d'autre part des données satellitales récentes permettant une plus grande précision dans la localisation à grande échelle et dans l'estimation des surfaces atteintes.

Au travers de nombreux travaux de spécialistes déjà cités, nous avons non seulement compris comment a pu s'effectuer la mise en place de ces formations, mais nous en avons en plus retiré des éléments et critères de sélection fort utiles pour l'exploitation des données spatialisées que sont les images satellitales, ainsi que pour l'exploitation de la base de données du SIG.

³ environ 1 200 \$ US/ha (Navarro y Prat, 1996)

2^{ème} PARTIE : OBJECTIFS ET METHODES

1 - Les objectifs à atteindre

Dans le but d'une réhabilitation et de la quantification des surfaces concernées par les problèmes liés à la présence des *tepetates* trois types de résultats sont attendus :

- une cartographie faisant l'état des lieux en ce qui concerne les surfaces en *tepetates* affleurants et discontinus,
- une cartographie des zones sensibles face à l'érosion et à la mise à l'affleurement des *tepetates*,
- une cartographie des *tepetates* à réhabiliter *a priori* en fonction des données socio-économiques et de population disponibles.

A travers la confrontation de différentes méthodes destinées à atteindre ces objectifs, nous pourrons mesurer la qualité des informations obtenues et les limites et avantages de chacune d'entre elles.

1.1. - Faire l'état des lieux des surfaces en *tepetates*

Les travaux déjà effectués en matière de cartographie des *tepetates* ne permettent pas une extrapolation satisfaisante et efficace des résultats sur l'ensemble de l'axe néo-volcanique. Cependant ces travaux constituent une référence que l'on se doit de prendre en compte afin d'atteindre au mieux les objectifs concernant cette étude.

Faire un état des lieux concernant les *tepetates* affleurants et discontinus doit permettre d'estimer leur surface et de localiser les secteurs ayant le plus de problèmes liés à la présence de *tepetates*, que ce soit de manière qualitative (degré de dégradation des sols sur *tepetates*) ou quantitative (% de surfaces atteintes).

1.2. - Spatialiser les risques d'extension d'affleurement des *tepetates*

Limiter l'érosion des sols par la prévention évite de lourds travaux futurs de réhabilitation. Il ne peut être envisagé avec raison de réhabiliter des *tepetates* pour l'agriculture sans mettre en place parallèlement des systèmes anti-érosifs des secteurs les plus sensibles. La mise en évidence des zones à risques d'affleurement doit permettre de prévoir quels sont les secteurs sensibles à ménager et à protéger en priorité afin de ralentir, limiter et d'éviter une érosion de ces surfaces.

1.3. - Cartographie des *tepetates* à réhabiliter *a priori*

La cartographie des *tepetates* à réhabiliter est une priorité pour limiter lesdits travaux de réhabilitation. Pour des raisons de coût et de temps toujours trop élevés, malgré les aides nationales et internationales, il faut cibler les régions non seulement les plus touchées par l'érosion et la mise à l'affleurement des *tepetates*, mais également les régions les plus nécessiteuses face aux revenus de l'agriculture comme unique moyen de subsistance. Cette cartographie est une première sélection parmi les surfaces recensées en *tepetates*, entre les secteurs qui de toute façon n'ont pas de vocation agricole particulière et ceux qui ne vivent que de l'agriculture.

L'objectif à terme n'est pas de profiter aux grands exploitants agricoles, qui non seulement ont les moyens de réhabiliter eux même les *tepetates* qui sont situés sur leurs terres, mais sont déjà en possession d'une grande partie du patrimoine et du capital agricole national. Ce sont les petits paysans pauvres, généralement d'origine indienne, sans autres ressources que l'agriculture et/ou l'artisanat traditionnel, à qui l'on souhaite pouvoir rendre une part d'autonomie et de liberté. Ainsi la sélection des secteurs qui seront pris en compte dans la mise en place du programme de réhabilitation des *tepetates* sera strictement étudié afin de ne pas risquer de réhabiliter des zones qui ne seront pas utilisées pour la culture locale, par les paysans locaux dans le besoin.

2 - Les données et moyens

En raison du type de cartographie attendu, de la surface totale de la zone à traiter (environ 120 000 km² de tout l'axe néo-volcanique), et de travaux de spatialisation antérieurs (Servenay, 1995; Faure, 1996) effectués sur des formations de même nature que les *tepetates*, nous avons estimé que les moyens apportés par la télédétection spatiale étaient les mieux adaptés. Cependant, les données satellitales bien que riches d'informations sur la surface terrestre ne peuvent suffire à intégrer des données exogènes notamment d'ordre socio-économique. C'est la raison pour laquelle la mise au point d'une base de données pour un système d'information géographique prend une place complémentaire dans la réalisation du travail et les résultats escomptés.

Les données utilisées sont donc constituées d'images satellitales Landsat Thematic Mapper, un MNT⁴ avec un pixel de 90 m couvrant l'ensemble de la zone, ainsi que de nombreuses cartes thématiques et données d'ordre socio-économiques en provenance du dernier recensement national mexicain (1994). Toutes ces données ont été travaillées à partir de moyens informatiques sur différents logiciels spécialisés.

⁴ Modèle numérique de terrain

2. 1. - Landsat TM

Sept images couvrent l'ensemble de la zone d'étude envisagée initialement (figure 2 et 15). Elles ont été acquises par *el instituto de geografía* de la UNAM en 1993 pour la réalisation de l'inventaire national forestier. De ce fait, s'agissant d'un travail de recherche sans application commerciale en collaboration étroite avec ce laboratoire mexicain, il nous a été possible d'en disposer à titre gratuit. Leurs dates s'échelonnent entre mars 1990 et avril 1992, cinq d'entre elles ont été enregistrées en début de saison des pluies, alors que les deux autres datent de la fin de cette même saison (annexe 6). Ces scènes ont toutes été préalablement redressées géographiquement par l'intermédiaire d'un modèle numérique de terrain.

2. 2. - Documents cartographiques à la base du SIG

Nous avons utilisé les cartes thématiques existantes de l'INEGI au 1/250 000 pour constituer la base de données du SIG. Les thèmes retenus dans ces cartes sont les suivants :

- la géologie;
- la pédologie;
- les précipitations moyennes pendant la saison des pluies;
- les zones d'irrigation (extraites de l'utilisation du sol).

De plus, la cartographie du couvert forestier ainsi que le modèle numérique de terrain nous ont été fournis par l'institut de géographie de la UNAM.

Le découpage administratif au niveau des *municipes*⁵ ainsi que les données socio-économiques du recensement national de 1994 proviennent également de l'INEGI, extraites du CDROM CIMA publié par l'INEGI.

La zone couverte par le SIG est très largement plus grande que celle finalement préalablement couverte par les traitements télédétection. Celle-ci comprend (figure 7) deux cartes entières au 1/250 000 (E14-1 : Morelia et E14-2 : Ciudad de Mexico), plus le quart nord des deux cartes localisées au dessus (F14-10: Queretaro et F14-11 : Pachuca), dans le découpage cartographique du pays à cette échelle.

⁵ Le *municipio* correspond au découpage administratif de base à l'intérieur des états, il regroupe généralement plusieurs villages et hameaux autour d'une ville.

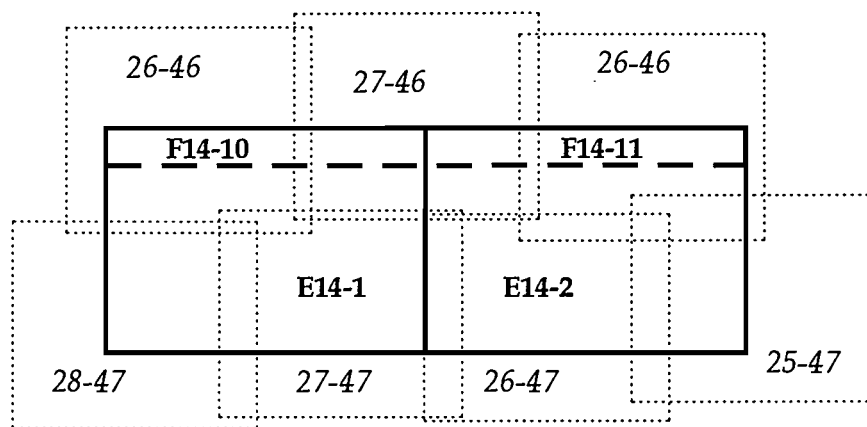


Figure 7: Zone d'étude avec découpage des cartes INEGI au 1/250 000 utilisées pour le SIG (en gras) et découpage des images Landsat (en pointillé et italique)

2. 3. - Systèmes et moyens de traitement des données

En fonction des lieux et des étapes de travail, nous avons eu la chance de bénéficier de l'appui technique et matériel de plusieurs laboratoires. Aussi, bien que certaines options de travail aient été retenues dans un premier temps, il nous a fallu réviser nos plans en fonction de la disponibilité en matériel et en appui technique, notamment en ce qui concerne l'emploi du logiciel de SIG Arc Info.

Pour cette pré-étude, plusieurs laboratoires et organismes ont successivement permis l'utilisation de matériel spécialisé et de logiciels de télédétection et de SIG :

- Le traitement des images a été effectué au laboratoire ORSTOM de la Maison de la télédétection à Montpellier, sur le logiciel GEOimage. Il s'agit d'un logiciel à but cartographique fonctionnant sur station de travail, sous environnement UNIX. Celui-ci est fractionné en modules indépendants les uns des autres chacun spécialisé dans une famille de traitements spécifiques.
- La mise en place de la base de données SIG a été effectuée à l'*instituto de geografía* de la UNAM à Mexico, avec le logiciel Arc Info. Ce logiciel puissant fonctionne également sur station de travail. Le croisement et les premiers essais d'exploitation de la base de données du SIG ont été effectués à la Maison de la Télédétection sur le logiciel Arc Info.

3 - Les secteurs d'étude préliminaire

Sur une zone sélectionnée de 60 000 km² (figures 1 et 7) correspondant à un très large secteur où de nombreuses études ont été menées, et où les résultats pourraient être utilisés, nous avons sélectionné trois aires représentatives de la diversité du milieu humain et physique, et beaucoup plus restreintes. En fonction des nombreux travaux existant sur les *tepetates*, nous avons choisi de cantonner notre étude préliminaire sur les secteurs bénéficiant du plus grand nombre de données. Cela doit nous aider, aux vues d'une cartographie sur une surface plus vaste ultérieure, à sélectionner au mieux les meilleurs critères. Les vallées de Mexico et de Tlaxcala sont les plus riches en informations et données de terrain sur les *tepetates*, c'est donc vers cette région, de l'axe néo-volcanique, que nous avons choisi de diriger nos premiers essais de cartographie. Ce grand secteur d'étude a l'avantage d'être contenu sur une seule scène Landsat⁶, ainsi nous n'avons pas à nous disperser dans des prétraitements comme l'assemblage et la correction radiométrique des images entre elles.

Entre 400 et 600 km² de surface, ces zones ont comme caractéristique commune de comprendre à la fois une partie de plaine et un morceau de montagne, de manière à regrouper les conditions topographiques spécifiques à l'existence et à l'affleurement des *tepetates*.

Ces zones d'étude préliminaire ont été prises toutes sur l'image 26-47 qui est centrée sur la ville de Mexico (figure 8). Seule la partie nord de cette scène concerne l'axe néo-volcanique et donc notre zone d'intérêt.

⁶ Une scène Landsat couvre 180 x 180 km au sol.

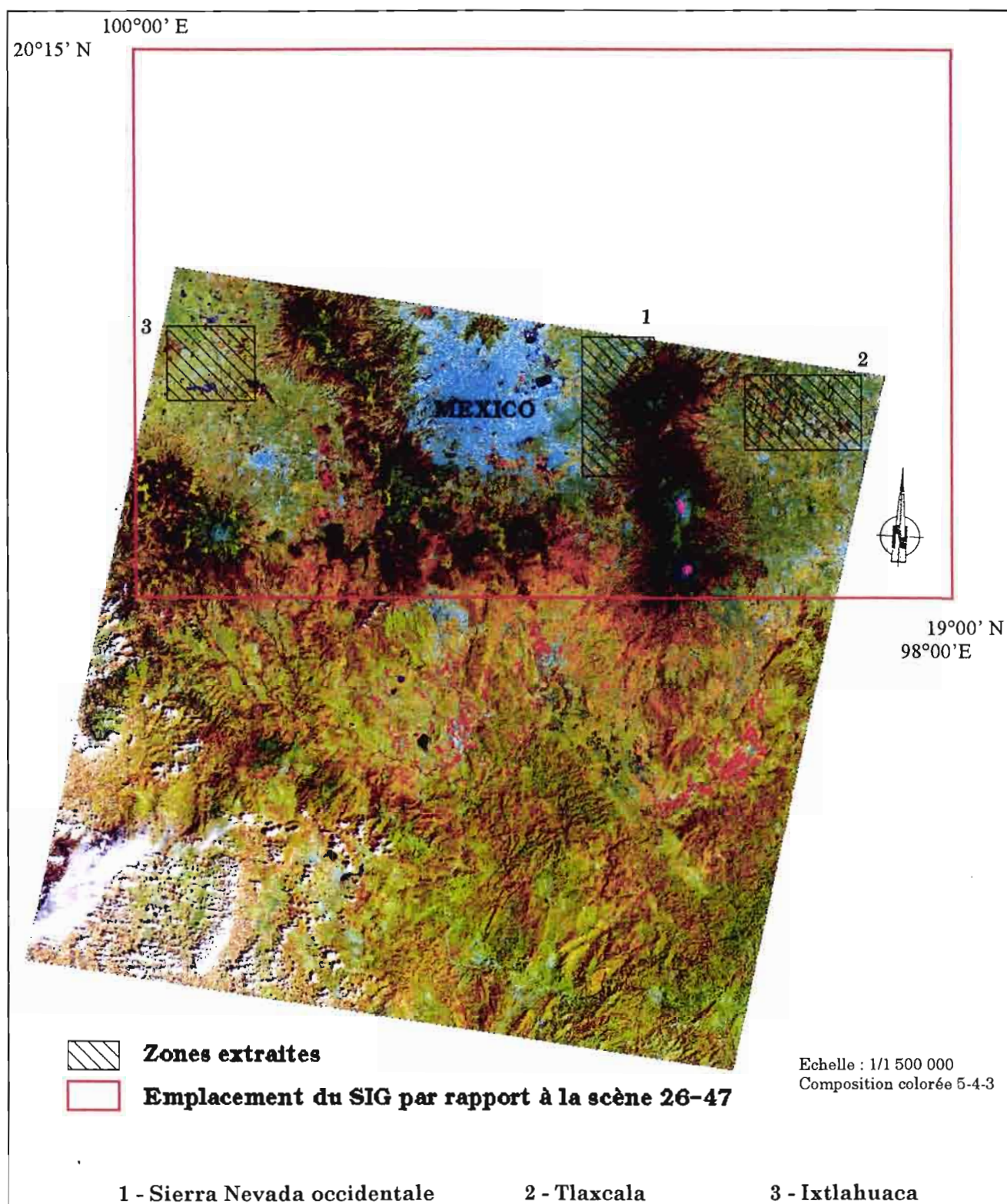
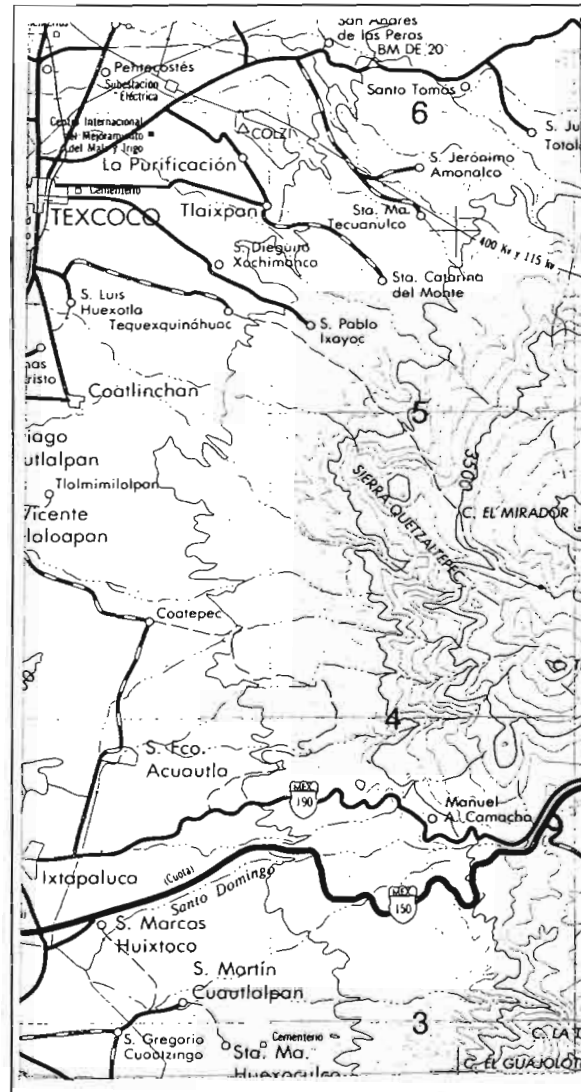


Figure 8: Scène 26-47 (Landsat TM) avec localisation des trois secteurs d'étude préliminaire

a - Composition colorée 4-3-2



b - Carte topographique de l'INEGI



c - Composition colorée 4-5-3

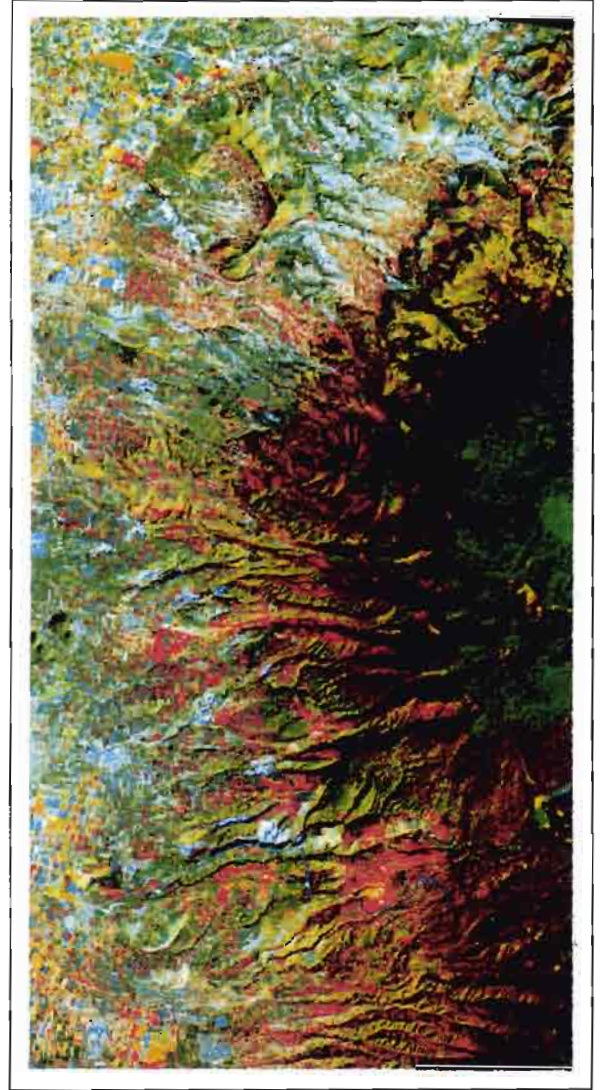


Figure 9: Extraction 1 : Sierra Nevada occidentale au 1/250 000.

3.1. - La Sierra Nevada occidentale

Très largement étudiée et déjà cartographiée (Peña y Zebrowski, 1992), la Sierra Nevada occidentale bénéficie d'un très grand nombre de données et de travaux portant directement sur les *tepetates*. Tous ces travaux vont nous permettre de valider au fur et à mesure les premières tentatives de cartographie automatiques des *tepetates* et de sélectionner des critères de classification fiables qui pourront par la suite être étendus au reste de la zone d'étude. A l'est de la capitale, la partie de la Sierra Nevada sur laquelle nous avons effectué nos premiers essais constitue une bande de 18 km de large par 34 km de long (figure 9). La zone englobe les villes de Texcoco au nord et Chalco au sud. La limite Est est constituée par le sommet du volcan El mirador appelé également Tlaloc (4120 m). C'est sur le piémont nord ouest de ce volcan, à l'est de Texcoco, sur la commune de Santa Catarina del Monte, que se trouve une grande partie des nombreuses parcelles d'érosion et d'expérimentation sur les *tepetates*. Les *tepetates* affleurants et discontinus sont connus et localisés avec une grande précision, cette zone est la meilleure référence dont nous disposons.

3.2. - Tlaxcala

Egalement très largement étudié par l'ORSTOM, ce secteur a fait l'objet d'études particulières de la part de chercheurs allemands de l'Université de Giessen (Hessman, 1992). Le secteur que nous avons choisi se situe sur la partie Nord-Est de la Sierra Nevada (figure 10). Il constitue une bande de 19 par 32 km au nord de Texmelucan et à l'ouest d'Apizaco, englobant la ville de Tlaxcala dans la partie Sud-Est. Ce secteur très accidenté est constitué d'une série de ravins incisés depuis la Sierra à l'ouest et depuis le plateau situé au nord, vers la vallée de Tlaxcala et Texmelucan. L'altitude moyenne de ce secteur est de 2500 m.

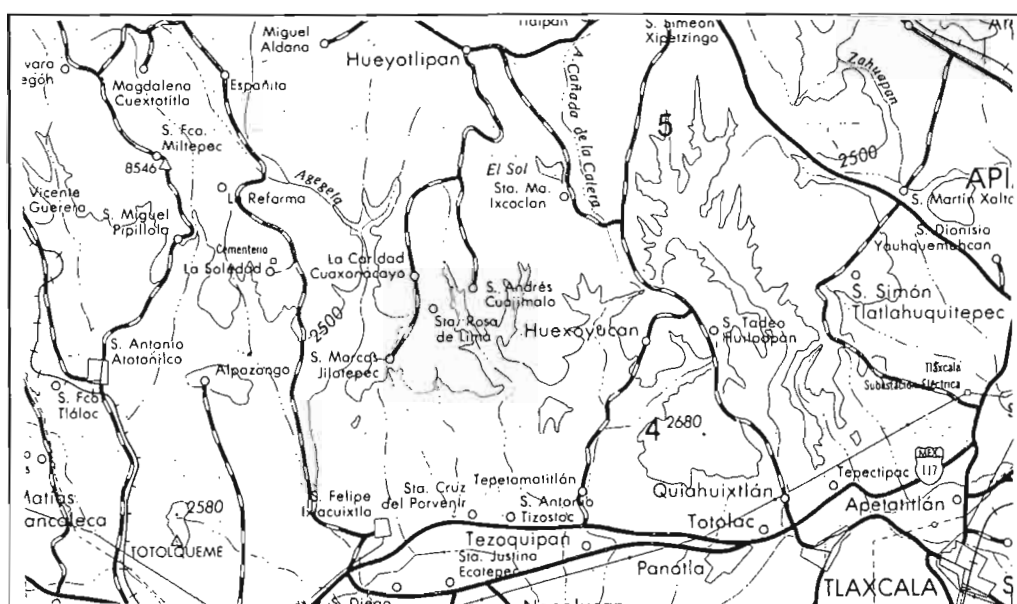
3.3. - Ixtlahuaca

Sur cette petite zone de 13 par 21 km (figure 11), nous ne disposons que d'une connaissance empirique du terrain, aucune étude y ayant été spécifiquement réalisée sur le thème des *tepetates*. Le point culminant est la montagne la Guadalupeana (3360 m). Cette zone est criblée de nombreux lacs plus ou moins grands, le plus important en taille est l'Ignacio Ramirez. Située au nord de Toluca, la principale ville englobée dans ce secteur d'étude est Ixtlahuaca del Rayón.

a - Composition
colorée 4-3-2



b - Carte
topographique de
l'INEGI au 1/250 000



c - Composition
colorée 4-5-3

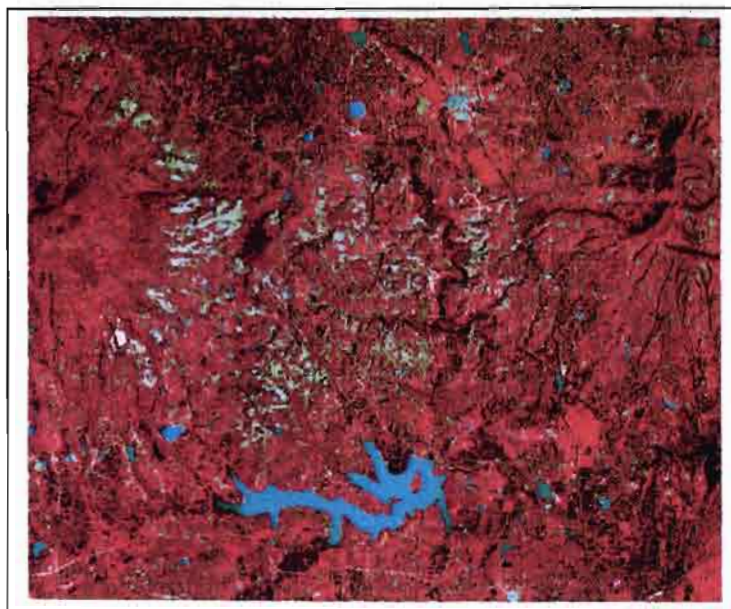


Figure 10 :
a - b - c :
Extraction
2
"Tlaxcala"

L'extraction des zones d'étude préliminaire sous forme d'images a été effectuée suite à une analyse générale des paysages appréhendés sur l'ensemble de la scène sélectionnée. Les extractions de la Sierra Nevada occidentale et de Tlaxcala ont été choisies en fonction d'une connaissance préalable de ces secteurs. Le choix de la zone d'Ixtlahuaca n'a pas été effectué de manière aléatoire. Cette zone réunit visuellement les conditions topographiques (figure 11) avec à la fois du relief sous forme d'un ou plusieurs sommets, de la plaine, ainsi qu'un bas de versant découpé par quelques ravines. A la différence des autres extractions, le paysage y est beaucoup plus homogène, parsemé de lacs et de petites retenues d'eau. Un cours d'eau sinueux dessine de nombreux méandres dans cette plaine. A la même distance du centre de la capitale que l'extraction de Tlaxcala, la zone choisie semble beaucoup moins anthropisée.

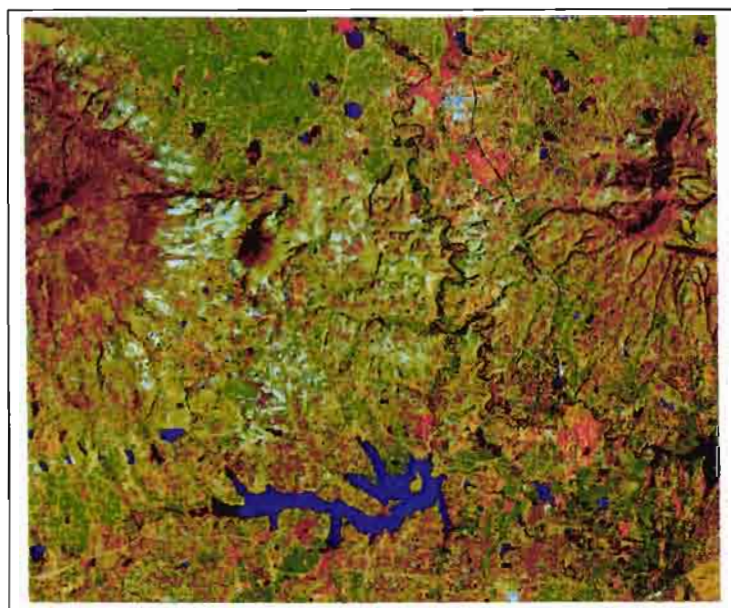
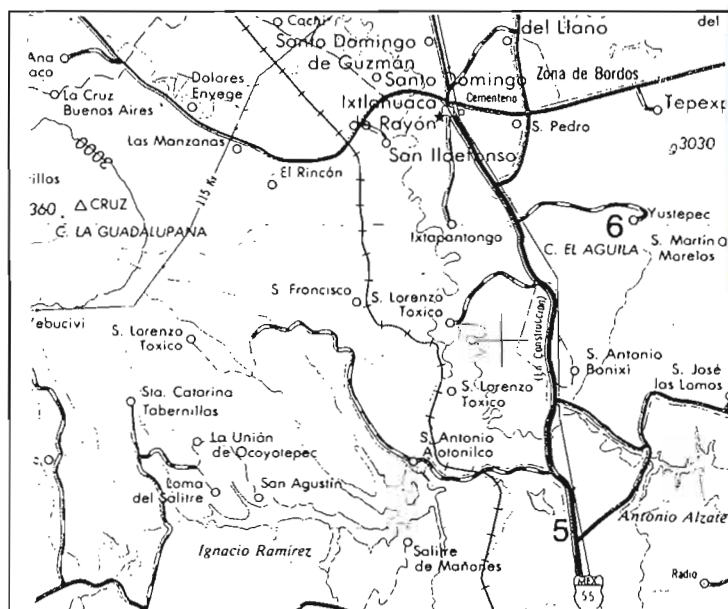
4. - Les échelles de travail

En raison de la grande surface à couvrir par l'étude que nous nous proposons de mener, ainsi que des résultats attendus pour évaluer les problèmes et les besoins sur l'ensemble de l'axe néo-volcanique, nous avons dans un premier temps envisagé de travailler au 1/250 000. Cette échelle est en fait l'échelle à laquelle se trouve la plus grande partie des données incluses dans le SIG (cartes thématiques de l'INEGI et de la UNAM). Aussi, quand bien même nous souhaiterions diminuer cette échelle, les résultats n'auraient pas gagné en précision. Néanmoins, le traitement des images satellitales est difficilement réalisable à cette échelle-ci. En effet, bien qu'il soit possible d'échantillonner les images pour limiter la quantité d'information à traiter, ou même de travailler sur une image complète en limitant la précision pour des résultats plus rapides et à petite échelle, notre thématique nous oblige à nous cantonner dans des échelles les plus grandes possibles en fonction de la taille des pixels. Les unités paysagères aux *tepetates* que nous cherchons à cartographier sont des unités mixtes et fines, où un certain nombre d'objets viennent modifier la réponse spectrale des *tepetates* purs. Afin de ne pas risquer de perdre une partie de l'information déjà trop moyennée par rapport aux surfaces spécifiques recherchées il faut travailler à la plus grande échelle possible. Pour les traitements en télédétection, les documents principaux servant de référence (Peña y Zebrowski, 1992; Werner *et al.*, 1988) sont au 1/50 000, c'est également la raison pour laquelle nous avons choisi de travailler sur les "petites" extractions décrites en paragraphe 3 de cette partie. Les résultats sont ici présentés au 1/150 000, cependant le travail à l'écran est essentiellement effectué sur des agrandissements au 1/50 000. Le seul apport de ces zooms est au niveau de la qualité visuelle et du repérage par rapport aux documents de références ainsi qu'aux cartes topographiques. Tout ceci n'empêchera pas d'homogénéiser ultérieurement l'ensemble des résultats finaux en élaborant les derniers résultats au 1/250 000. Seule une partie infime de l'information sur la localisation des *tepetates* pourra être perdue à l'impression, cependant la rigueur du travail effectué préalablement à plus grande échelle restera présente.



a - Composition colorée 4-3-2

b - Carte topographique de l'INEGI au 1/250 000.



c - Composition colorée 4-5-3

Figure 11: a - b - c : Extraction 3 :
"Ixtlahuaca"

3^{EME} PARTIE : CARTOGRAPHIE DES PAYSAGES DE *TEPETATES* PAR TELEDETECTION

La détection à distance par le biais de plates-formes aéroportées donne une information particulière de la surface terrestre. Répartie sur sept canaux pour Landsat TM elle permet d'obtenir la signature spectrale des objets qui la composent. Cependant, la résolution au sol n'autorise pas l'identification de chaque objet, elle les regroupe entre eux lorsque leur dimension est inférieure à la taille du pixel. Cela entraîne donc systématiquement des confusions entre certains thèmes proches géographiquement. Quand bien même leur signature spectrale serait très différente s'ils étaient bien distincts, leur zone frontière est composée d'une moyenne des signatures des différents objets. Lorsque l'on travaille sur des unités paysagères elles-mêmes composées de plusieurs objets de petite taille, comme les *tepetates* discontinus qui présentent un certain type de végétation rase, parfois quelques arbustes, et des petites surfaces de *tepetates* affleurants, la proportion surfacique ainsi que la proportion d'énergie réfléchie de chaque type d'objet présent a une influence sur la valeur du pixel en sortie.

1. - Prétraitements

Nous avons eu la chance d'avoir à notre disposition des images déjà corrigées géométriquement, ce qui nous a permis un gain de temps important. Effectivement, bien que faisant partie à part entière des traitements indispensables avant toute utilisation et intégration d'images satellitaires dans un système cartographique géoréférencé, ce travail de redressement, long et fastidieux, ne fait rentrer en ligne de compte que des aspects techniques sans qu'il y ait nécessairement d'intérêt direct pour la thématique recherchée autre qu'une projection et un ellipsoïde correct.

Les principaux prétraitements que nous ayons réalisés sont la création de compositions colorées afin d'avoir la meilleure lecture et analyse visuelle possible des unités paysagères perçues, ainsi que la création de quelques néo-canaux (indices et composantes principales) qui permettent de combiner l'information contenue dans certains canaux bruts et d'obtenir une information déjà rangée ou sélectionnée en fonction de leur combinaison et de leur contenu. Nous n'avons pas réalisé de correction radiométrique entre les différentes images, parce que nous n'avons travaillé pour l'instant que sur une seule image, ce qui évite les changements radiométriques liées à des dates de prise de vue différentes. Nous avons également rendu le MNT superposable à l'image Landsat. Grâce à cela nous avons pu réaliser quelques simulations de vue en perspectives (figures 3, 5 et 12). Les paysages télédétectés sont ainsi replacés dans un angle de vue plus traditionnel, et chaque unité se replace par rapport à sa situation topographique.

Nord

Ouest



Figure 12: Vue en trois dimensions de *cerro la Guadalupe* : composition colorée 453 d'une image Landsat TM sur le MNT

Sur cette vue en perspective reconstituée orientée nord-ouest on distingue au tout premier plan le lac Ignacio Ramirez et derrière la montagne *cerro de la Guadalupe*. Les *tepetates*, en bleu clair sur cette composition colorée sont localisés sur le piémont du versant.

1.1 - Réalisation de compositions colorées

Les compositions colorées sont considérées comme une première classification automatique de l'image brute. Elles sont bâties par synthèse additive de couleurs. En combinant trois canaux auxquels on associe à chacun une couleur (rouge, vert et bleu), on obtient une composition colorée dans laquelle il est relativement aisé de décomposer les différentes couleurs en proportion relative de couleurs élémentaires bleu, vert, rouge, et de remonter ainsi à une (GDTA, 1991). Ces compositions sont réalisées avec un rééclairement de la dynamique de chaque canal utilisé, de manière à obtenir un résultat exploitable visuellement. De manière classique, on combine les trois canaux d'une image SPOT en attribuant la couleur rouge au canal proche infra-rouge, le vert au rouge du visible et le bleu au vert du visible. Il s'agit des compositions les plus proches de la réalité spectrale, à savoir que l'ordre des couleurs et la succession des longueurs d'ondes sont respectés, ils sont simplement décalés vers l'infra-rouge sur le spectre. Ces compositions classiques dites "fausses couleurs" font ressortir tout ce qui est végétation et forte activité chlorophyllienne en rouge, et tout ce qui est minéral en bleu.

Nous avons effectué quelques essais de compositions colorées similaires avec les bandes 4, 3, et 2 de Landsat (figures n° 17-a, 18-a et 19-a). Bien que riche d'informations, ce type de combinaison reste peu discriminant par rapport à l'information spectrale disponible avec Landsat TM. Nous avons donc effectué d'autres tentatives de combinaison en utilisant les autres bandes. Il en ressort que la combinaison 4-5-3 (proche infra-rouge, moyen infra-rouge, rouge) donne une très grande diversité de nuances et de couleurs qui permet de mieux discriminer les unités paysagères entre elles, notamment en ce qui concerne la densité de couvert végétal (figures n° 17-c, 18-c et 19-c). Cela est dû à l'emploi privilégié des bandes spectrales dans l'infra-rouge qui sont particulièrement sensibles aux différents états de la végétation.

Avec cette composition colorée tout ce qui est en surfaces minérales et à forte réflectance ressort comme dans la composition colorée "fausses couleurs" classique en bleu. Cependant il y a beaucoup plus de nuances entre les bleus et donc entre tous les thèmes représentés dans cette gamme. Les zones urbaines ressortent en bleu beaucoup plus foncé, là où les sols nus vont être bleu pâle, et les carrières d'un bleu presque blanc. Les nuances les plus marquées sont dans la végétation. Tout ce qui est cultures irriguées ou végétation à très forte activité chlorophyllienne ressort en orange. En rouge on a les surfaces végétales à forte activité chlorophylliennes mais avec une moins grande humidité relative que ce qui est en orange, et ainsi toutes les nuances vers le vert déterminent un gradient lié au stade phénologique des plantes et de la végétation considérés. Les plans d'eau et les ombres sont de couleur bleu marine à noire.

Ces deux types de compositions colorées "fausses couleurs" ont été utilisées de manière complémentaire tout au long des traitements. La composition colorée classique faisant office de référent et la deuxième apportant un complément de nuances et d'information non négligeable.

1.2. - Les indices

Les indices sont des combinaisons particulières de canaux permettant de faire ressortir de manière distincte certains types d'objets à l'intérieur du paysage à partir des différents canaux d'une image satellitale. Il s'agit d'un type de traitement particulièrement prisé des américains (Robin, 1995) car à partir d'une formule appliquée sur des canaux bruts ils permettent d'automatiser les résultats sans faire intervenir d'approximation subjective. Nous avons utilisé deux des indices les plus fréquents qui sont l'indice de brillance (IB) et l'indice de végétation normalisé (IVN).

L'indice de brillance (IB) dont la formule est : $(R^2 + PIR^2)^{1/2}$, où R = rouge et PIR = proche infra-rouge, s'effectue avec les canaux 3 et 4 de Landsat. Il permet de faire ressortir dans les fortes valeurs toutes les surfaces et tous les objets du paysage qui ont une forte réflectance, qui "brillent". Les sols nus et les *tepetates*, ainsi que l'urbain...

L'indice de végétation normalisé (IVN) : $PIR - R / PIR + R$ permet une lecture de l'image où la végétation active occupe les valeurs les plus fortes. Il s'agit visuellement de l'inverse de l'indice de brillance car les sols nus et les zones urbaines y ont des valeurs proche de zéro.

1.3 - Les composantes principales

Dans un espace radiométrique du même nombre de dimension que le nombre de canaux bruts utilisés (7 ici), les valeurs des bandes spectrales forment un nuage de points. L'analyse en composantes principales est une technique qui opère une rotation des axes et une translation de l'origine de son repère (Bonn et Rochon, 1992). Autant de projections sont générées qu'il y a de canaux en entrée. Dans chaque projection le nuage de points est redistribué dans de nouvelles coordonnées où la variance est maximisée. Ce sont les premières composantes qui comportent le plus d'informations. Nous avons choisi de garder les composantes principales numéro 2 et 3 pour les traitements suivants, la première regroupant d'office tous les thèmes à forte réflectance (sols nus dont "tepetates", urbain et carrières), elle ne pouvait être d'aucun bénéfice pour ce que nous cherchons à discriminer.

1.4. - Mise en superposition du MNT

Afin d'avoir une meilleure représentation des surfaces télédétectées par rapport à la topographie, et mieux comprendre l'agencement des paysages, nous avons rendu le MNT et

l'image satellitale superposables. Pour ce faire nous avons sous échantillonné le MNT dont le pixel de départ était de 90 mètres, à un pixel de même taille que celui des images. Il a ensuite fallu extraire du MNT la partie correspondant à l'image. En utilisant le module GEO3d de GEOimage nous avons alors effectué différentes simulations de perspectives en plaquant sur le MNT une composition colorée.

2. - Classifications

Les classifications permettent de ranger l'espace radiométrique, et par son intermédiaire les unités paysagères, en fonction de critères de réflectance relative dans les différentes longueurs d'ondes, le tout associé à des connaissances de terrain. Dans ce cas il s'agit de classifications dites supervisées car le travail s'effectue sur une zone connue avec des relevés de terrain et des points de repère à l'appui. Cependant il existe également des classifications non supervisées où l'espace radiométrique est classé de manière automatique par le logiciel de télédétection, sans que les connaissances de terrain existent ou interviennent. L'expérience montre que malgré une logique certaine dans les résultats de classifications non supervisées, celles-ci présentent toujours un fort degré de confusion entre certains thèmes recherchés ou non. Aussi, quel que soit l'objet, l'unité paysagère ou la thématique, les données de terrain sont indispensables à l'obtention de résultats corrects.

La classification supervisée passe par plusieurs étapes qui sont :

- la prise de parcelles d'entraînement à partir des connaissances de terrain et de l'interprétation visuelle des compositions colorées,
- le seuillage radiométrique des différents canaux utilisés en fonction de la discrimination des thèmes recherchés,
- la création de masques pour discriminer ce qui ne peut pas être distingué radiométriquement.

2.1. - Interprétation visuelle et prise de parcelles d'entraînement

Sur la ou les compositions colorées, on commence par analyser visuellement les unités paysagères qui s'en dégagent, en fonction des canaux pris en compte et des couleurs qui leur sont associées. L'interprétation visuelle, relevant du même domaine que la photo-interprétation, est une étape qui est complémentaire de la connaissance de terrain. Elle permet de mieux comprendre l'agencement général du relief et des grands éléments structurant le paysage. L'avantage de l'oeil humain sur les ordinateurs et les logiciels de traitement d'image, c'est qu'il sait du premier coup reconnaître les structures sur l'image satellitale, alors que malgré les recherches et les tentatives il n'existe à ce jour aucune technique automatique fiable pour analyser l'ensemble des textures et structures. Une méthode de détection de structures fines et régulières a bien été mise au point par Axes (1991), cependant elle n'est pas applicable sur des paysages de montagne

comme ceux de notre étude, ou même le parcellaire agricole est beaucoup trop hétérogène dans ses dimensions et son organisation spatiale. Ce qui est reconnaissable à l'oeil sans hésitation, malgré les irrégularités de taille et de disposition dans l'espace, est le parcellaire agricole et les zones urbaines. Dans le domaine "non anthropisé" les structures du relief se conjuguent avec la texture des différentes associations végétales. C'est comme cela que l'on reconnaît sur la composition colorée les surfaces en *tepetates* affleurants, que les gradients de végétation en fonction de l'altitude se dessinent.

Seule l'interprétation visuelle permet de replacer l'image, donnée composée de mesures physiques, dans ce qu'elle est : la représentation d'une certaine réalité paysagère. Plus qu'une carte dont l'information est limitée par le support même, la composition colorée d'une image satellitale se passe de légende. C'est la raison pour laquelle son contenu est si riche. Plus qu'une analyse *in situ*, l'image permet une vue et une compréhension générale de l'espace et des paysages qui la composent.

Sur chacune des trois extractions réalisées nous avons pris un certain nombre de parcelles d'entraînement correspondant à des thèmes préalablement définis (*tepetates* affleurants et urbain) ainsi qu'à d'autres thèmes envisagés en fonction de l'interprétation visuelle, de manière à pouvoir restituer ces unités paysagères dans leur contexte plus général : irrigation, forte activité chlorophyllienne, faible activité chlorophyllienne, matériaux volcanique d'altitude, eau libre et faible couvert végétal. Tous ces thèmes ne se retrouvent pas systématiquement dans chacune des extractions. Les zones de *tepetates* discontinues ne sont pas des zones homogènes par définition. Aussi, bien que leurs critères d'existence les localisent géographiquement à côté des *tepetates* affleurants, dans un premier temps n'avons nous pu en prendre sur la zone de Tlaxcala.

2.2. - Seuillages radiométriques

Une fois les parcelles d'entraînement prises dans des zones les plus homogènes possible pour chacun des thèmes, on utilise les statistiques (moyennes et écarts-types) de chacune des parcelles dans chacun des canaux et néo-canaux, afin de construire des courbes radiométriques. Ces courbes radiométriques (annexe 7) représentent donc la moyenne plus ou moins l'écart type de chaque thème dans chaque canal, pour chaque extraction. Ils correspondent à une signature spectrale de chaque objet, groupe d'objets ou unité paysagère, mais plus que tout ils permettent de déterminer les canaux les plus discriminants en fonction de notre thème pour effectuer une classification par seuillage radiométrique. Pour la construction de ces courbes le canal thermique (n°6) n'a pas été utilisé car il s'est montré peu discriminant par rapport à notre thématique.

Parmi les dix canaux utilisés pour ces traitements statistiques nous avons retenu sur l'extraction n°1 les canaux bruts n° 3, 5, et 7, ainsi que la deuxième composante principale (ACP2).

Même lorsque les parcelles sont prises avec soin, cela n'empêche pas qu'il y ait une part de confusion entre les thèmes proches. Alors que la moyenne est différente, il est fréquent que l'intervalle formé autour de celle-ci par l'écart type chevauche partiellement l'intervalle radiométrique d'un ou plusieurs thèmes voisins. Le canal 3 est celui où les différents thèmes se chevauchent le moins les uns les autres. Seul l'urbain et les *tepetates* affleurants sont partiellement confondus, ainsi que les différents stades de végétation. Le canal 5 est celui où les *tepetates* affleurants sont le moins confondus avec l'urbain, cependant ces mêmes *tepetates* affleurants sont complètement confondus avec les parcelles en carrières. Il existe une continuité et un gradient logique entre les différents thèmes, et notamment avec les *tepetates* discontinus et la végétation. Le canal 7 apporte une plus grande discrimination des carrières par rapport aux *tepetates* affleurants. La deuxième composante principale sépare très bien les différents types de végétation, ainsi que les *tepetates* et l'urbain, bien que *tepetates* affleurants et discontinus aient ici une même réponse spectrale.

Pour cette première zone d'étude, il s'avère déjà impossible de discriminer correctement de manière radiométrique les différents thèmes minéraux entre eux. Pour l'extraction de Tlaxcala, bien que les confusions existent aussi, elles sont bien moindre, alors que les parcelles prises sur l'extraction d'Ixtlahuaca sont parfaitement discriminées les unes des autres, notamment entre l'urbain et les *tepetates*. Plus les confusions sont grandes et plus les résultats de classification seront mauvais. Aussi, à défaut de pouvoir trouver des parcelles plus discriminantes pour chaque thème dans la première extraction, avons nous dû faire intervenir des masques (§ 2.3.) afin de limiter spatialement les confusions dans certaines zones et sur certains thèmes.

Toutes les extractions ont fait l'objet des mêmes étapes que la première, bien que les différents thèmes y soient plus distincts les uns des autres, il y a toujours des zones de confusion radiométrique dans lesquelles il faut faire des choix.

2.3. - Création de masques

Au cours des classifications, en fonction des résultats intermédiaires, des connaissances de terrain et des interprétations visuelles des compositions colorées, différents types de masques sont créés. La séparation de l'urbain des *tepetates* s'effectue par un **masque graphique** également appelé masque spatial : sachant que les thèmes recherchés sont privilégiés par rapport aux autres, on envisage de classer le plus correctement possible les *tepetates* sur l'ensemble de l'extraction, sans tenir compte de l'urbain et des carrières. Une fois les zones à *tepetates* correctement classées on effectue une série de masques. Tout d'abord on dessine un masque graphique en s'appuyant

sur les compositions colorées et sur les cartes topographiques, avec localisation des bourgs et villages, pour reclasser en urbain tout ce qui avait été préalablement classé en *tepetates*. Dans ce cas, au masque graphique s'ajoute un **masque numérique**⁷ sur certains thèmes mal classés. Le troisième type de masque que nous avons utilisé est un masque créé à partir du modèle numérique de terrain, afin de déclasser ce qui pouvait ressortir en *tepetates* dans les zones de plaine (<2 300 m) et sur les sommets (>3 000 m), tout objet ayant des valeurs radiométriques similaires aux *tepetates* en dehors de cette tranche altitudinale étant nécessairement autre chose, identifié ou non!

La méthode la plus prometteuse pour arriver à obtenir des résultats corrects en ayant le moins de confusion possible entre les thèmes minéraux, consiste à éditer des masques sur l'image classée radiométriquement afin d'améliorer peu à peu la qualité des résultats (Faure, 1996). Pour les trois extractions des traitements de ce type ont été réalisés sur les premiers résultats de classification, avec un nombre plus ou moins grand d'itérations en fonction des résultats (figure 13).

Ces opérations de masque ont également dû être effectuées sur les carrières dont une partie est systématiquement classée en urbain ou en *tepetates* affleurants.

Une fois les confusions éliminées entre nos trois principaux thèmes minéraux, et chaque image paraissant classée correctement, nous avons utilisé le masque créé à partir du MNT. Celui-ci nous a permis d'enlever un certain nombre de parcelles cultivées, vraisemblablement sans végétation au moment de la prise d'image, et qui ressortaient comme des *tepetates* affleurants dans la plaine. Une fois cette dernière sélection faite, tous les pixels restant furent attribués aux différents thèmes végétaux.

⁷ également appelé masque de confusion, sur toutes les valeurs classées que l'on souhaite réattribuer autrement.

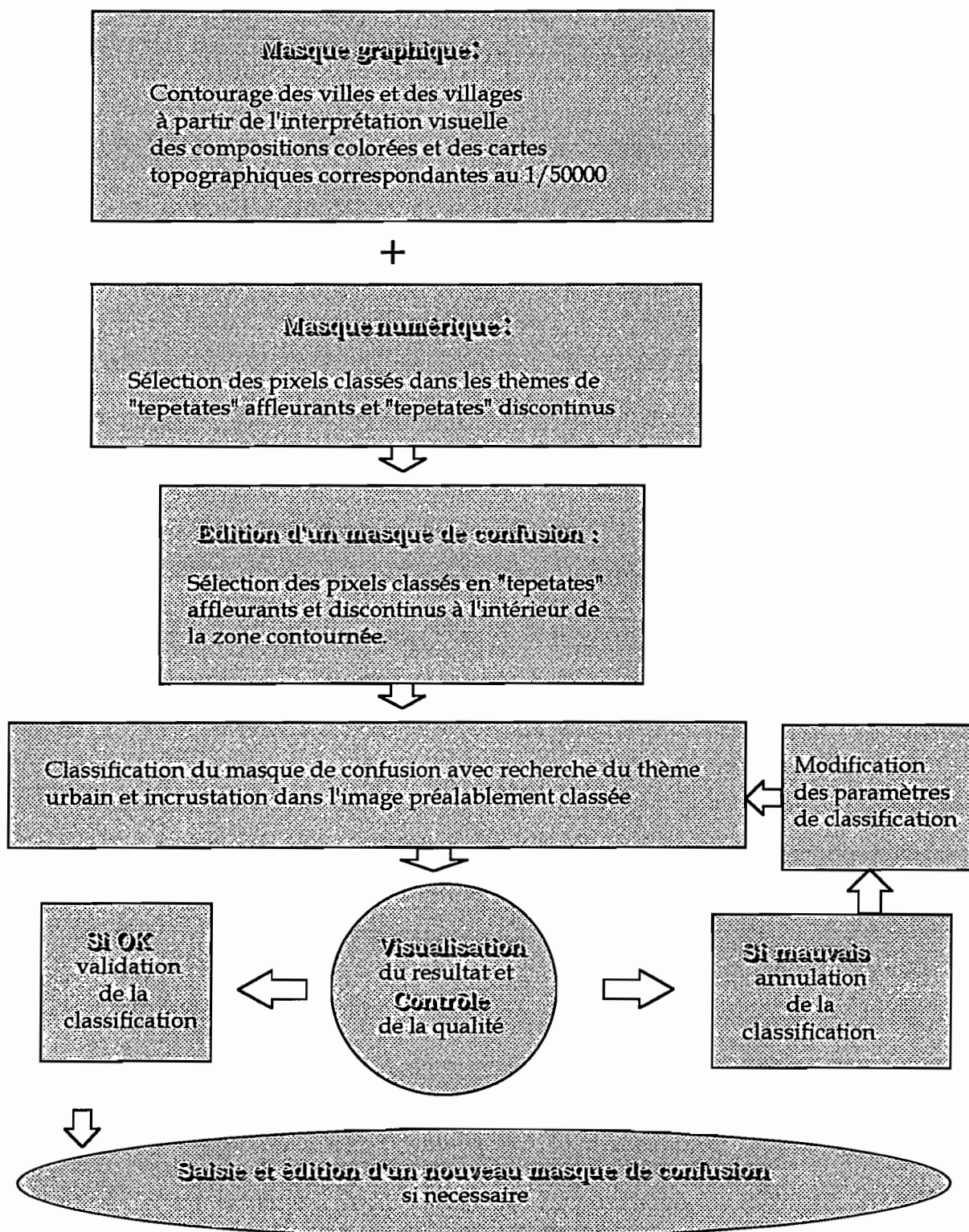


Figure 13: Schéma de succession des étapes dans l'utilisation de masques dans les classifications

3. - Combinaison et succession des étapes

Les différentes étapes que nous avons utilisé pour arriver à un résultat convenable sont les suivantes :

- 1 - Création des compositions colorées et des néo-canaux ;
- 2 - Prise de parcelles d'entraînement sur les compositions colorées ;
- 3 - Calculs et traitements statistiques des parcelles d'entraînement sur les canaux bruts et les néo-canaux ;
- 4 - Sélection des canaux les plus discriminants pour lancer la classification ;
- 5 - Classification radiométrique sur les thèmes retenus ;
- 6 - Visualisation des résultats ;
- 7 - Création et utilisation de masques et retour à 2 et 5 en modifiant les paramètres de lancement.

4. - Résultats et discussion

Ces successions d'étapes et de création de masques pour arriver à obtenir un résultat satisfaisant peut apparaître comme une méthode un peu empirique et pouvant manquer de rigueur scientifique. Cependant il ne faut pas oublier que nous sommes à un stade de recherche méthodologique. Notre objectif final étant de pouvoir généraliser une méthode satisfaisante à l'ensemble de l'axe néo-volcanique, il nous faudra peut être finalement nous rabattre sur des méthodes *a priori* plus subjectives telle la photo-interprétation, mais tout aussi satisfaisante en matière de résultats obtenus.

Pour ne prendre qu'un exemple de travail comparable au projet que nous envisageons d'effectuer, nous citerons le travail qu'a fait l'équipe de V. Sorrani de l'Institut de géographie de la UNAM de 1993 à 1995. Chargé de réaliser l'inventaire national forestier de tout le Mexique au 1/250 000, ils ont opté pour la réalisation de très bonnes impressions papier de leurs meilleurs compositions colorées, et ont fait un travail d'interprétation et classification visuelle, avec un grand nombre de points de vérification. Les résultats passés sur calque ont alors été scannés et vectorisés dans un SIG.



Figure 14: Légende des classifications

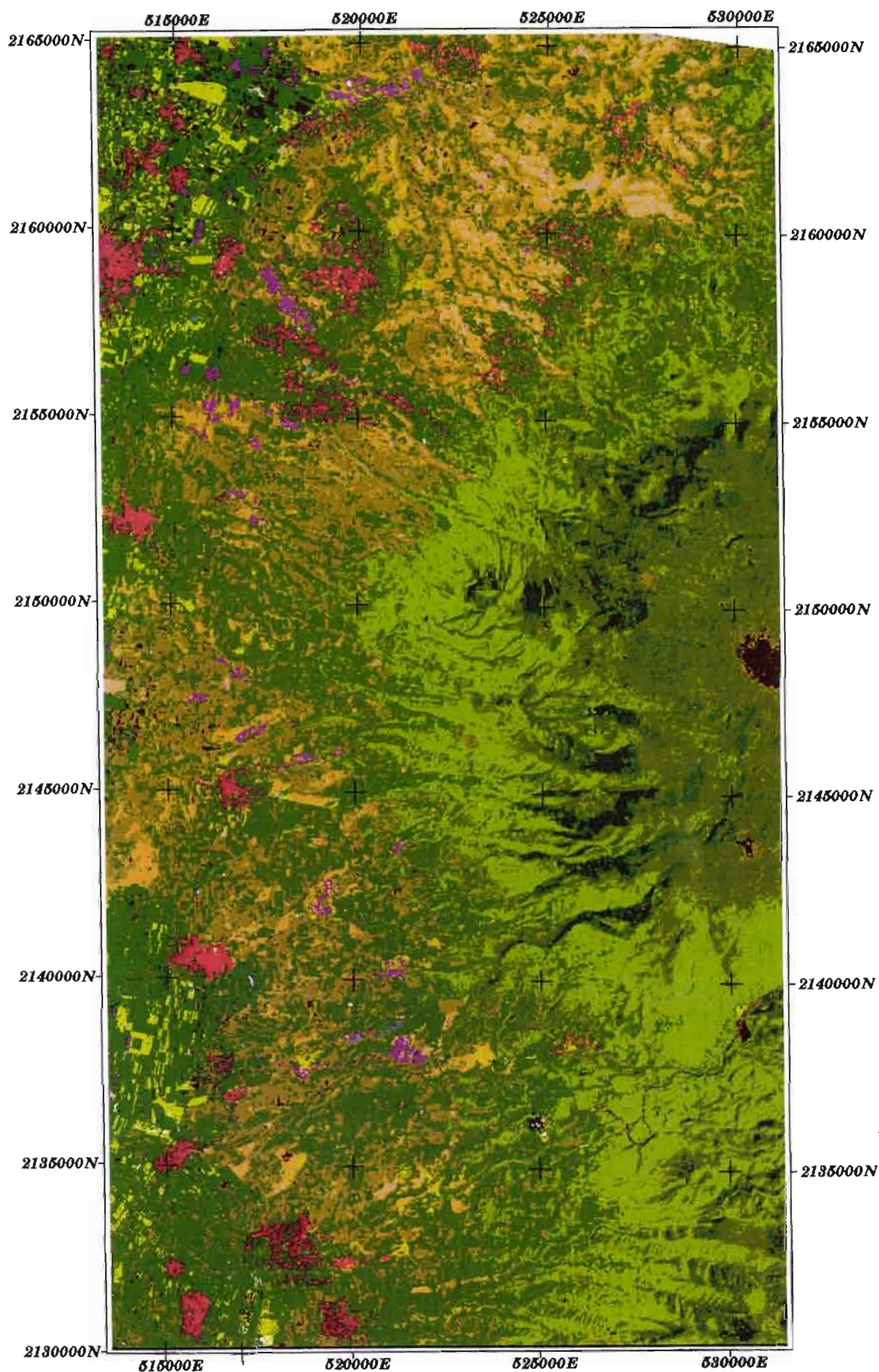


Figure 15: Classification finale sur "Sierra Nevada occidentale"

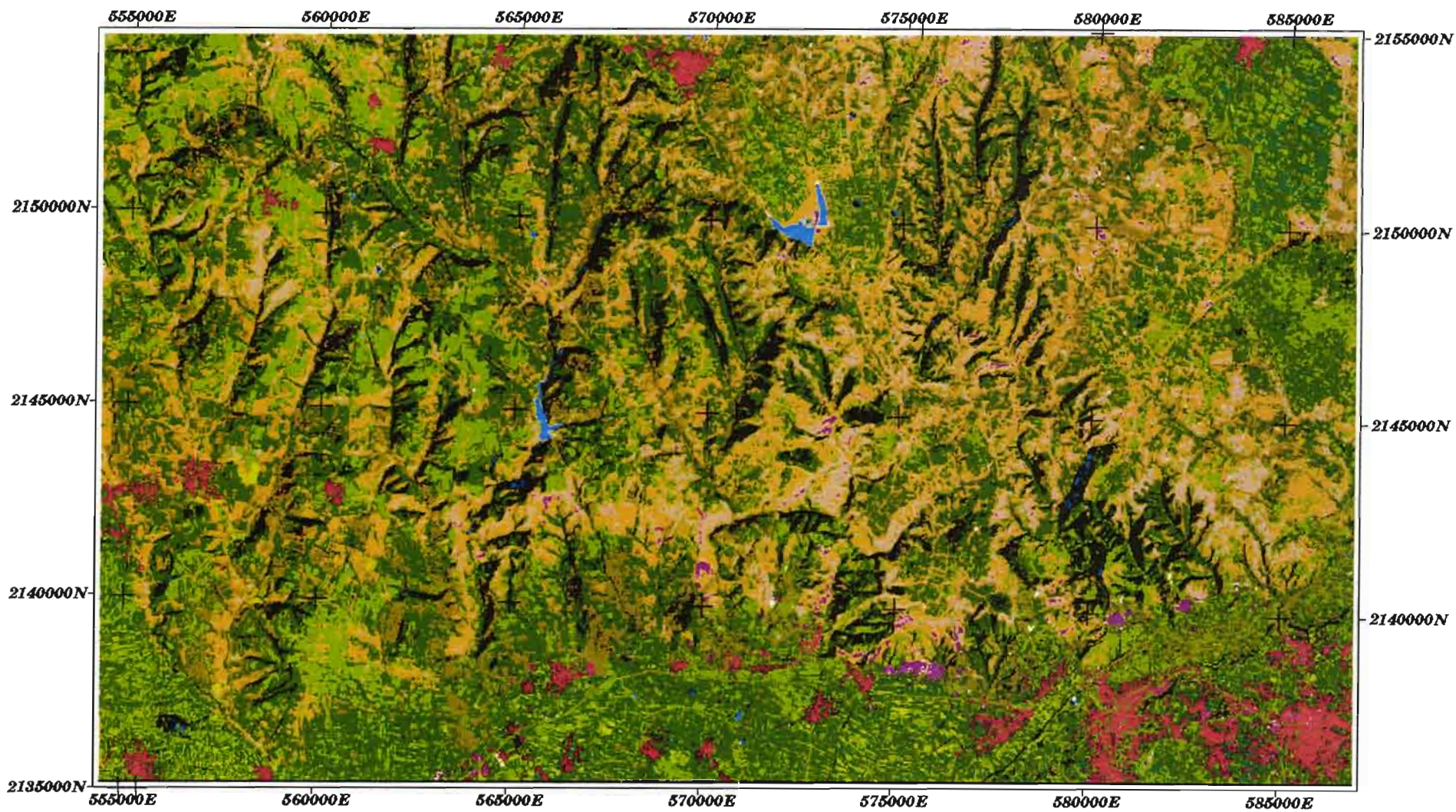
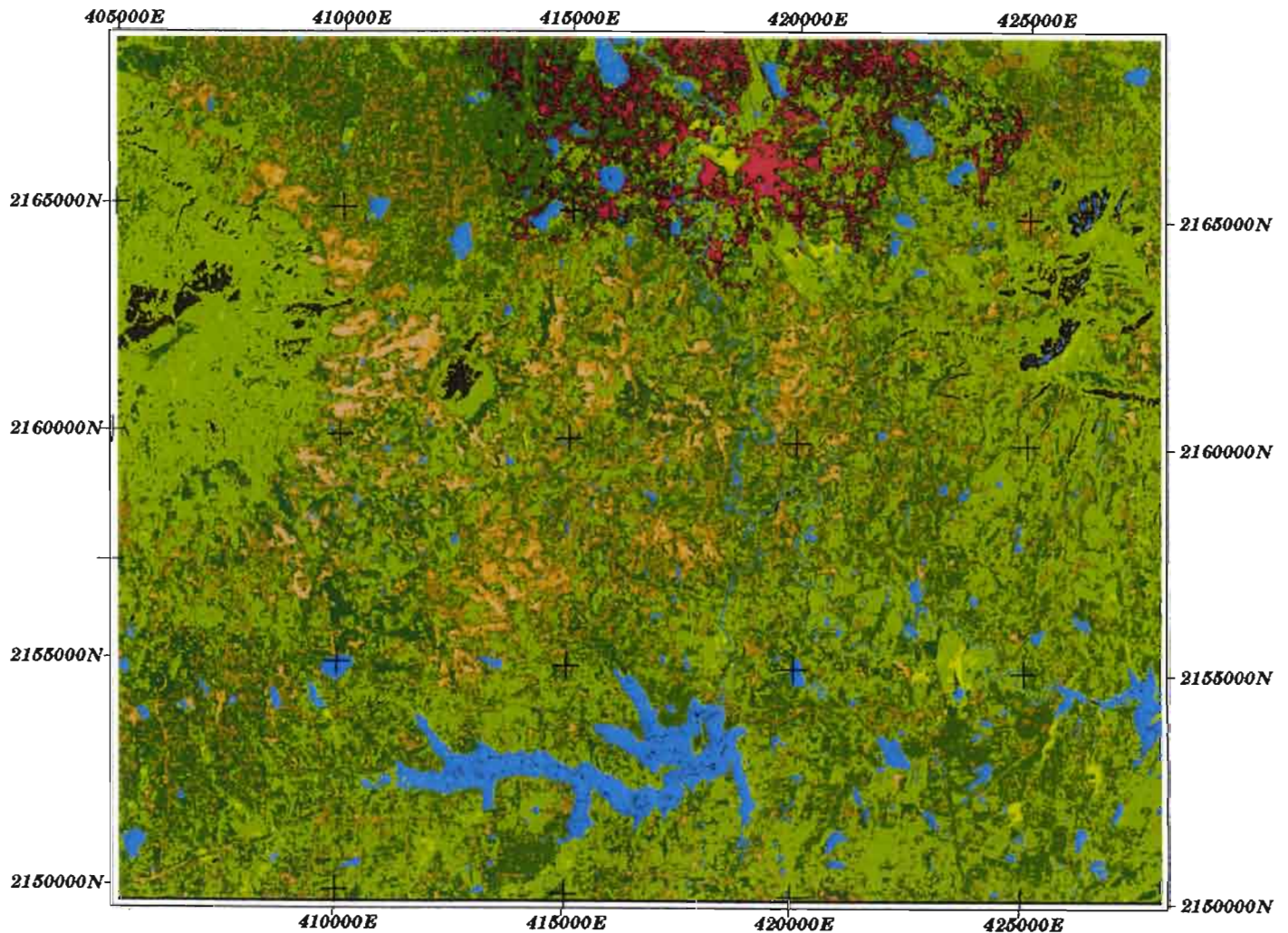


Figure 16 : Classification finale sur Tlaxcala

Bien que notre méthode fonctionne très bien, elle demande un grand investissement temporel. Notre but n'étant pas spécifiquement de trouver une méthode originale mais avant tout de pouvoir envisager d'arriver à un résultat correct dans certaines limites de temps. Ils nous faudra donc de toutes façons envisager de rectifier notre méthode de traitement d'image pour une meilleure efficacité, ou bien alors prévoir de mettre en place une équipe et non une personne seule pour ce travail.

Figure 17: Classification finale sur Ixtlahuaca



Les résultats de classification sur les trois extractions (figures 15, 16 et 17) sont satisfaisants, mais cela est justifié à la fois par la connaissance de terrain préalable de la plus grande partie de ces secteurs sur le terrain, et par la relativement faible étendue des zones tests. Une source d'erreur est cependant à signaler. Il s'agit des routes et chemins. Ne pouvant être éliminés des classifications par masques, il s'avère que quelques uns se retrouvent classés en *tepetates* alors qu'ils n'ont pas lieu de l'être. On les remarque notamment dans les figures 18 et 20 par leur structure linéaire continue qui n'est absolument pas en relation avec les *tepetates*.

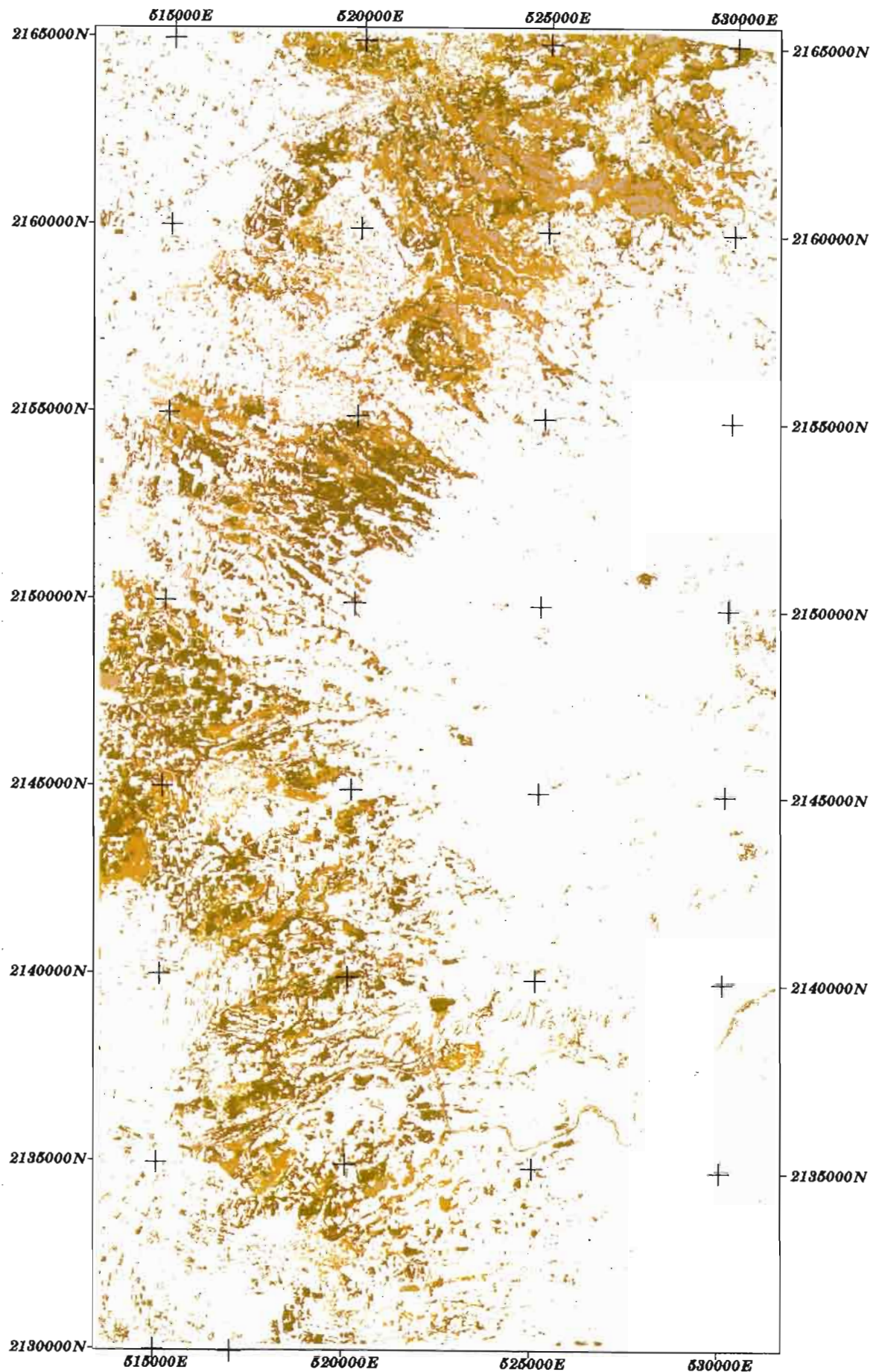


Figure 18: *tepetates* affleurants, discontinus et sous-jacents sur l'extraction n°1 : Sierra Nevada occidentale

Les classifications sur la Sierra Nevada (figure 15), Tlaxcala (figure 16) et Ixtlahuaca (figure 17) nous permettent un meilleur repérage de l'agencement des unités paysagères associées aux *tepetates* dans le paysage général car toutes les confusions ont été enlevées. Le tableau suivant ainsi que les figures 18, 19 et 20 présentent les surfaces en *tepetates* affleurants, discontinus et les unités mixtes avec faible couvert végétal et présence possible de *tepetates* sous-jacents.

Tableau 2 : Surfaces classées en *tepetates* dans les trois extractions

Surface de l'extraction	Sierra Nevada 63 050 ha		Tlaxcala 63 200 ha		Ixtlahuaca 44 850 ha	
	hectares	% de l'extr.	hectares	% de l'extr.	hectares	% de l'extr.
<i>tepetates</i> affleurants	690	1	2 800	4.5	400	0.9
<i>tepetates</i> discontinus	4 500	7	7 150	11	1 600	3.5
Total zones érodées	5 190	8	9 950	15.5	2 000	4.4
Unités mixtes (sensibles)	8 200	13	3 600	5.5	4 900	11
Total général	13 390	21%	13 550	21%	6 900	15.4%

De manière à effectuer une comparaison objective de ces résultats, nous les avons comparés avec les surfaces des différentes unités de *tepetates* décrites et cartographiées par Peña y Zebrowski (1992), sur la Sierra Nevada occidentale, correspondant à notre extraction n° 1. Parmi toutes les unités différenciées par Peña et Zebrowski nous avons sélectionné toutes celles correspondant aux trois états de *tepetates* que nous avons distingués, en faisant abstraction des différences de composition, et en nous cantonnant strictement à la zone couverte par notre extraction, sachant qu'elle est légèrement plus restreinte que la leur. Les unités prises en compte pour notre comparaison sont (se référer en annexe 8 pour les détails concernant ces unités) :

- pour les zones sensibles et *tepetates* sous-jacents : 23; 24; 25; 26; 27; 49 et 50
- pour les zones érodées correspondant aux *tepetates* affleurants et discontinus : 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38 et 39.

Il en ressort pour l'ensemble des zones érodées (en excluant les ravins qui ne sont pas pris en compte dans les classifications en raison de la végétation en forte densité qui les masque) une surface de 3 100 ha (2% de notre extraction). Les secteurs sensibles et susceptibles d'être érodés, sont quant à eux estimés à 26 700 ha.

Nous comparerons ultérieurement ces résultats avec les résultats obtenus par croisement de la base de données SIG au 1/250 000.

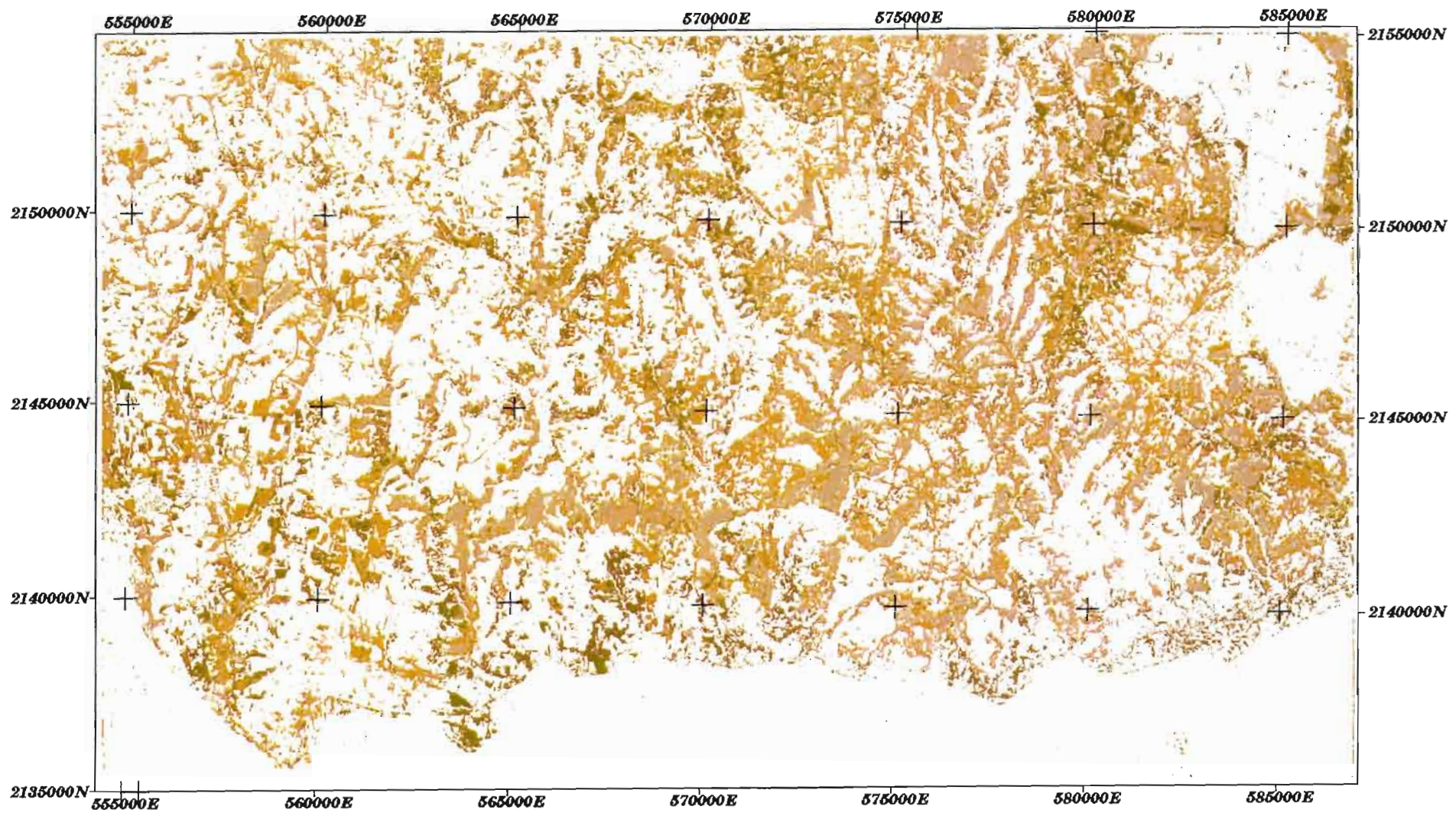


Figure 19: tepetates affleurants, discontinus et sous-jacents sur l'extraction n°2 :
Tlaxcala

Les moyens apportés par la télédétection et par les images Landsat peuvent également nous permettre d'aborder notre second objectif, qui pourra être complété par l'utilisation ultérieure du SIG. La meilleure méthode pour évaluer la vitesse d'érosion d'un sol sur une formation telle que les *tepetates* à partir de télédétection, est de disposer d'images prises avec un intervalle de temps suffisamment grand pour que la dégradation (quand elle existe) soit détectable. Nous pourrions envisager de nous procurer sur la zone d'étude des images plus récentes, et/ou plus anciennes (années 1980) qui permettraient d'évaluer sur une période alors déterminée par les dates des données, les surfaces gagnées en *tepetates* affleurants sur les *tepetates* discontinus, et en *tepetates* discontinus sur les secteurs voisins à faible couvert végétal. On peut bien évidemment considérer *a priori* que tous les secteurs en *tepetates* discontinus sont susceptibles de passer tôt ou tard à l'état de *tepetates* affleurants. Le stade de *tepetates* affleurants étant le stade ultime de dégradation de ces formations et des sols qui les recouvraient initialement. De même les secteurs à faible densité de couvert végétal ont plus de risque de passer rapidement au stade de *tepetates* discontinus que les formations végétales plus denses. Voici donc pour les trois parcelles d'étude préliminaire les zones de *tepetates* affleurants, discontinus et à faible couvert végétal susceptibles de se dégrader (fig. n° 16, 17 et 18).

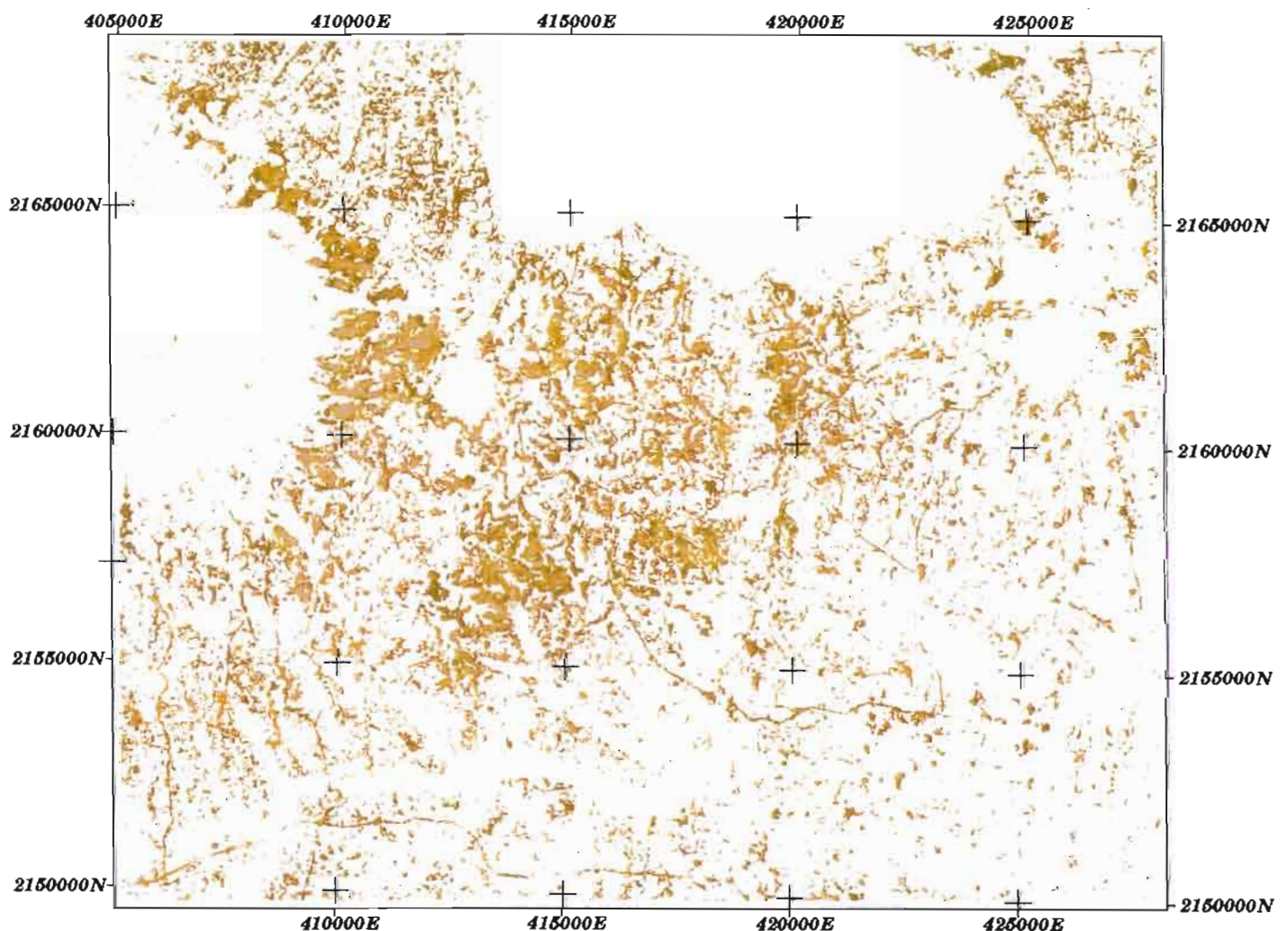


Figure 20: tepetates affleurants, discontinus et sous-jacents sur l'extraction n°3 : Ixtlahuaca

4^{EME} PARTIE : CARTOGRAPHIE DES SECTEURS SENSIBLES ET DES *TEPETATES* A REHABILITER PAR SIG

Les systèmes d'information géographique sont un recueil de données spatialisées de différents types. Ces informations peuvent alors être croisées entre elles sous forme de requêtes et de sélections en fonction de différents critères, suivant ce que l'on recherche. La précision de cet outil est définie lorsque la base de données cartographiques est mise en place. Il s'agit d'un outil qu'il faut commencer par mettre en place avant de pouvoir l'utiliser. Son concept est relativement simple. Il consiste à regrouper un certain nombre d'informations concernant des thèmes choisis, localisés dans l'espace géographique et d'obtenir par croisement une information spatialisée plus complète.

La logique que l'on souhaite appliquer grâce à l'emploi du SIG est : si en tel et tel endroit (Sierra Nevada occidentale et Tlaxcala) qui vérifient telle, telle, telle [...] et telle condition (saison sèche de plus de six mois, altitude supérieure à 2 300 m et inférieure à 2 800 m, précipitation en saison des pluies inférieure à 800 mm, *etc.*) on rencontre des *tepetates* affleurants et discontinus, alors en sélectionnant tous les endroits de l'axe néo-volcanique qui réunissent les mêmes conditions, on est susceptible d'y trouver également des *tepetates*.

1. - Création de la base de données

La mise au point de la base de données du SIG n'a pas été la même pour les informations concernant le milieu physique, et pour le milieu humain. En plus d'être constituée par de l'information de nature tout autre que celle sur le milieu physique, les données socio-économiques ont été importées à partir de support prêt à être utilisé de manière informatique, là où il a fallu tout construire pour le milieu physique à partir des supports papiers de cartes existantes.

1.1. - Le milieu physique

La base de données sur le milieu physique a essentiellement été créée à partir des cartes thématiques existantes de l'INEGI. Les étapes de la mise en place de la partie concernant le milieu physique du SIG sont disponibles en annexe 6.

Ces différentes étapes successives pour la création du SIG ont été appliquées pour :

- la carte des sols => couverture pédologique
- la carte géologique => couverture géologique
- la carte des précipitations en saison des pluies => couverture climat
- les zones irrigation extrait de la carte d'utilisation du sol => couverture irrigation.

Les légendes de ces bases de données sont disponibles en annexes 14, 15, 16, 17 et 18. Nous avons utilisé ces cartes comme documents de base pour notre SIG. Cependant, il faut préciser que ces cartes au 1/250 000 ne sont pas d'une fiabilité exemplaire. Elles peuvent comporter une part d'erreur qui est difficile à évaluer. Cela est dû notamment aux moyens mis en oeuvre par le gouvernement mexicain pour la réalisation de ces cartes. Attribuées à des personnes différentes en fonction des secteurs on peut craindre un manque d'homogénéité entre les définitions et les critères de chaque unité cartographiée de part et d'autre du pays. Ce travail ayant été prévu sur une période de temps trop courte pour l'ampleur de la tâche, les premières cartes à être réalisées le furent scrupuleusement contrairement aux dernières qui ne le furent pas nécessairement. Les documents sont donc d'une fiabilité aléatoire, toutefois ce sont les seuls existants qui servent de référence nationale et c'est avec ceux-ci qu'il nous faut travailler. Il convient donc de rester critique et ouvert vis-à-vis des résultats qui peuvent en découler. Pour ce qui est de la carte des précipitations, les zones les moins difficiles d'accès pour installer les pluviomètres étant dans les plaines, les données sur les sommets sont plus limitées. Entre ces points les extrapolations ont été faites sur une base altitudinale alors que l'on sait (Prat, 1996) que ce critère n'est que partiellement exact.

Le MNT, fourni sous forme de raster, codé sur 16 bits, et avec un pixel de 90 m, a dû être passé au format vecteur après sélection du type d'information dont nous avons besoin. Tout d'abord nous en avons extrait une carte des pentes supérieures à 10% et inférieures à 40%, car il n'y a que dans cette fourchette de pentes que l'on est *a priori* susceptible de rencontrer des *tepetates*. Nous avons ensuite sélectionné quatre valeurs d'altitude (figure 21) avec tout ce qui est inférieur à 2 300 m (vert), tout ce qui est entre 2 300 et 2 800 m (jaune), tout ce qui est entre 2 800 et 3 000 m (orange), et tout ce qui est supérieur à 3000 m (rouge).

1.2. - Le milieu humain

Les couches du SIG concernant les données socio-économiques n'ont pas demandé autant de travail de préparation que celles sur le milieu physique car elles nous ont été fournies sous support CDROM, directement exploitables en informatique. Il a cependant fallu sélectionner les thèmes susceptibles de nous servir parmi les nombreuses données statistiques disponibles au niveau socio-économique sur le pays, ainsi que les municipes entrant en ligne de compte dans notre zone d'étude, la base de données sur CDROM de l'INEGI ayant un découpage par état ne correspondant pas au découpage de la cartographie de pays au 1/250000e. Parmi les nombreuses informations disponibles suite au recensement (annexe 12), nous avons choisi de n'en garder qu'une partie (annexe 13), en fonction des thèmes pouvant être en relation directe ou indirecte avec les problèmes d'érosion, de pauvreté et d'agriculture.

A l'intérieur de cette première sélection nous avons redéfini avec précision les critères les mieux adaptés à prendre en compte afin de faire une estimation de la situation. Les rendements

en maïs et en blé, qui sont les cultures céréalières les plus répandues, permettent de voir quels sont les municipes qui sont en dessous d'un certain seuil de rendement, ce qui peut être directement attribué à des problèmes de mauvaises terres, d'érosion des sols et de mise à l'affleurement des *tepetates*. Concernant l'élevage, afin d'estimer le surpâturage il faut prendre en considération le nombre d'animaux sur le municipe, en relation avec la superficie totale du municipe, ou bien même avec la superficie totale en prés ou pâturages. Les données de population concernant les pourcentages en population rurale permettent de localiser les municipes les plus ruraux donc les plus dépendants de l'agriculture.

L'un des principaux problèmes avec les données socio-économique du SIG est qu'elles ont été constituées à partir des municipes. Or les municipes correspondent à un regroupement de hameaux ou de villages selon un maillage trop large qui a pour conséquence de trop moyenner les données. et on ne dispose pas d'information plus précise, notamment en matière de localisation. L'échelle des municipes n'est pas satisfaisante pour envisager des résultats précis par rapport au reste de la base de données mise en place.

2. - Requêtes

A partir des critères sélectifs théoriques mis au point par les chercheurs, sur des sites de référence nous allons vérifier ces critères puis les étendre à l'ensemble de la base de données dont nous disposons. La grande majorité des cartes présentées ici comprennent l'emplacement des trois secteurs d'étude préliminaire en hachures obliques ainsi que le District fédéral (DF) correspondant aux limites administratives de la ville de Mexico en treillis. Ainsi, nous allons pouvoir établir une carte des potentialités d'affleurement des *tepetates* où les *tepetates* affleurants, discontinus et sous-jacents peuvent ou non exister.

2.1. - Requêtes sur les données du milieu physique

En passant par le croisement des différentes couches d'information ainsi que par la sélection de certains critères préalablement définis, on effectue ce qu'on appelle des requêtes. On procède par étapes afin de mieux contrôler les résultats face à un seul type d'information à la fois, et de vérifier en fonction de nos connaissances si la sélection effectuée n'est pas trop ou pas assez sévère.

Les conditions théoriques d'apparition des *tepetates* établies sur les études menées sur les sites de Tlaxcala et Santa Catarina del Monte sont :

- altitude < 2800 m
- pentes > 10%
- saison sèche de 4 à 6 mois minimum,
- pluviométries annuelles inférieures ou égales à 800 mm,
- matériel parental constitué de dépôts volcaniques de type lahars, déferlantes et coulées pyroclastiques du Quaternaire,
- sols peu évolués lithiques.

En sélectionnant pour commencer quelques uns des principaux critères on obtient déjà une cartographie sélective sur le secteur où il est possible de trouver des *tepetates*. Les trois facteurs principaux sont les précipitations, le substrat géologique et l'altitude.

Suite aux critères énoncés précédemment ainsi qu'à un certain nombre d'essais, nous avons retenu des sélections particulières plus fines pour chacun des thèmes de base existants.

2.1.1. - Altitude

En plus de la limite maximum d'altitude pour l'apparition des *tepetates*, nous avons ajouté une limite minimale correspondant aux plaines de cette région volcanique, qui elles sont très fertiles et ne sont pas touchées par ce problème particulier. Cette limite, déjà utilisée comme masque dans la classification de l'image satellitale, est 2 300 m. De plus la limite maximale a été augmentée à 3 000 m afin de garder une marge moins restrictive sachant qu'il est malgré tout possible de rencontrer des *tepetates* au dessus de 2 800 m. Par rapport à la figure 21, la sélection retenue correspond à tout ce qui est de couleur jaune et orange.

2.1.2. - Pentes

Nous avons créé une couverture des pentes supérieures à 10% et inférieures à 40% à partir du MNT, toutefois celle-ci n'a pas été exploitable en raison du nombre beaucoup trop élevé de polygones qui arrive à limiter les capacités du logiciel utilisé.

2.1.3. - Climat

L'ensemble de la zone étudiée a une saison sèche marquée de plus de Six mois. En ce qui concerne les précipitations, nous avons retenu sur la base des travaux de Quantin (1992) tous les secteurs où les pluies sont inférieures à 800 mm (figure 22). Cependant, il s'est avéré que ce critère était trop limitant car il excluait dès le départ une grande partie des surfaces de *tepetates* affleurants dans les zones de référence même. Ceci s'explique par une définition trop restrictive puisque des *tepetates* affleurants ont été localisés dans des régions possédant une pluviométrie supérieure à 1 000 mm comme à Morélia (Alexandre, 1996) et par des imprécisions des cartes de l'INEGI dans la mesure où la pluviométrie ne suit pas nécessairement un gradient altitudinal (Prat, 1996). Il est donc nécessaire de modifier les critères. Nous sommes ainsi passé à une sélection englobant toutes les surfaces recevant moins de 900 mm de précipitations (figure 23). Les résultats alors obtenus correspondent mieux spatialement avec ce que l'on connaît.

Figure 21 :
Sélection de
quatre
fourchettes
altitudinales.

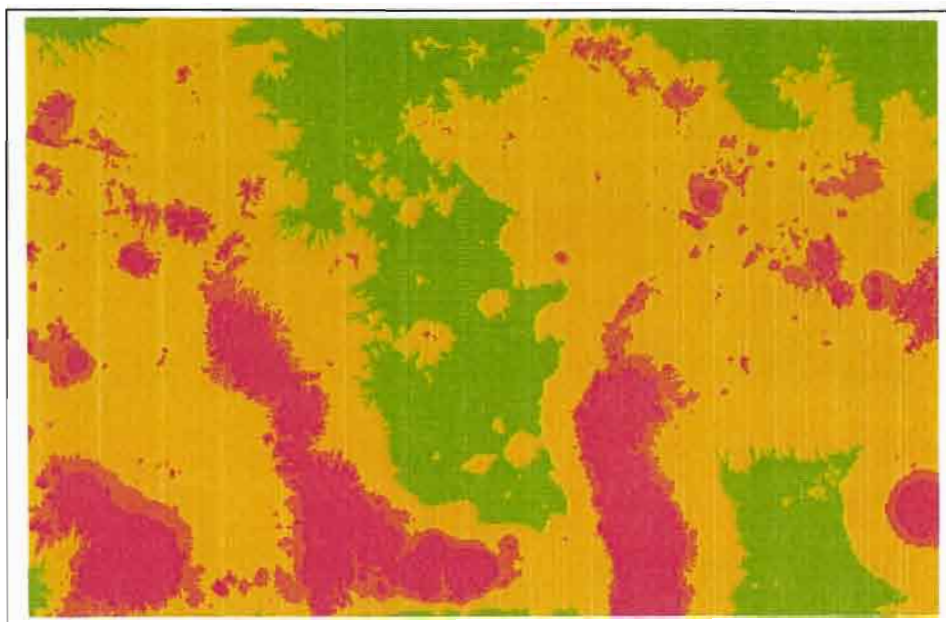
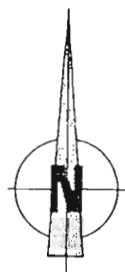


Figure 22:
Elimination des
précipitations
moyennes
supérieures à
800 mm (en
blanc).

Echelle : 1/1 750 000

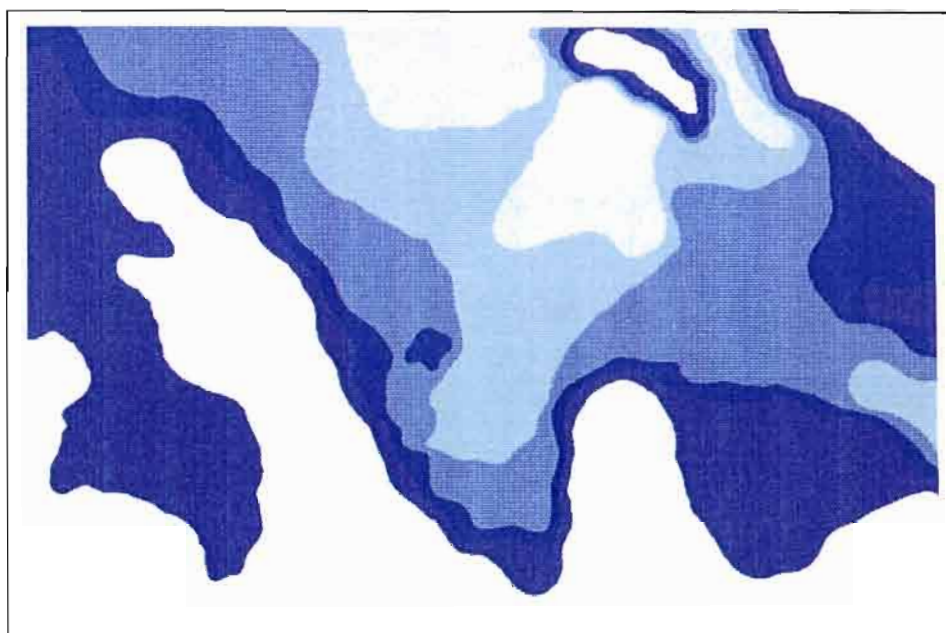
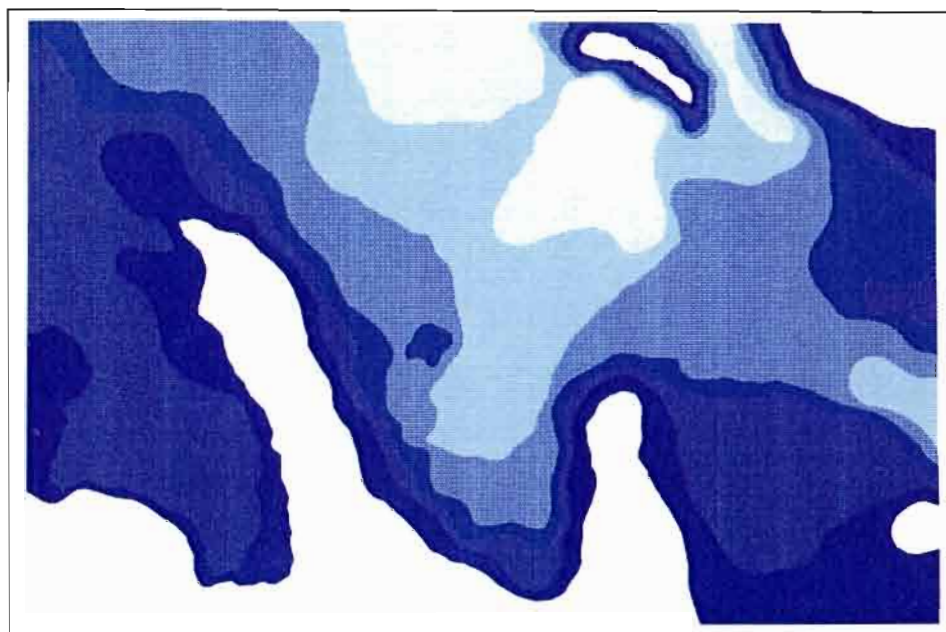
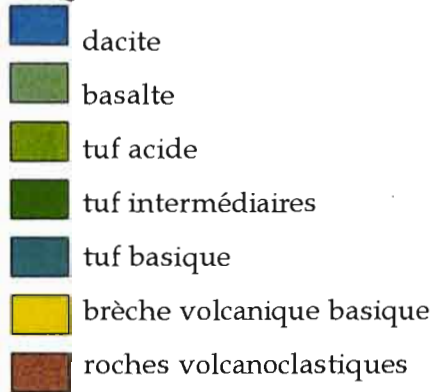


Figure 23:
Elimination des
précipitations
moyennes
supérieures à
900 mm (en
blanc).

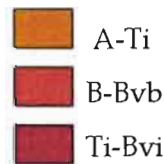


2.1.4. ~ Géologie

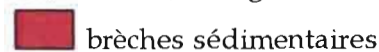
Pour ce qui est des critères de substrats géologiques à prendre en compte, nous en avons sélectionné un grand nombre. Dans la théorie les *tepetates* correspondent à des dépôts du Quaternaire. Cependant, la couverture géologique de notre SIG indique des substrats d'âge Tertiaire sur la plus grande partie des zones connues pour la présence de *tepetates* et supposément datée du Quaternaire. A l'intérieur des roches ignées extrusives nous avons retenu :



ainsi que certaines de leurs combinaisons :



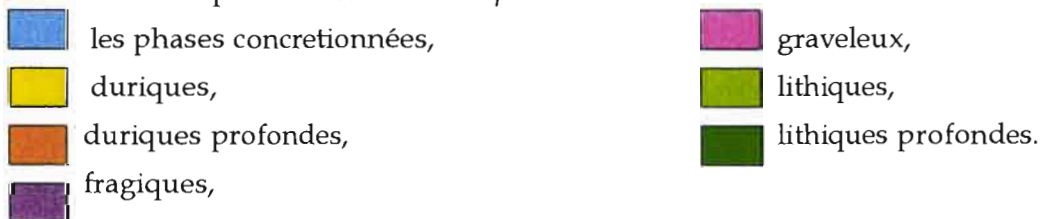
Seule une catégorie a été retenue parmi les roches sédimentaires, il s'agit des



Le résultat de cette requête sélective uniquement sur les critères géologiques (figure 24), nous montre que nos trois secteurs d'étude préliminaire se trouvent sur des substrats différents : Sierra Nevada occidentale est essentiellement sur une combinaison d'andésite et de tufs intermédiaires, Tlaxcala sur des tufs basiques, et Ixtlahuaca sur des roches volcanoclastiques. Malgré la diversité apparente des substrats ressortant sur cette carte, tout ce qui n'est pas en blanc est susceptible d'être le support de *tepetates*, quel que soit leur état de dégradation ou d'affleurement.

2.1.5. ~ Sols

La carte des sols étant *a priori* encore moins fiable que la carte géologique, car si elle était fiable elle indiquerait déjà avec précision les *tepetates*. Nous l'avons tout de même utilisée afin d'évaluer la fiabilité par rapport à nos connaissances en retenant les critères de phases physiques des sols, ainsi que les litosols et les regosols qui sont les meilleurs indicateurs d'induration ayant un lien avec les *tepetates* sur laquelle on puisse se fonder (Peña y Zebrowski, 1992). Les phases retenues comme pouvant abriter des *tepetates* sont :



On peut constater que pour nos secteurs de référence les *tepetates* apparaissent bien sous le critère de phases duriques et lithiques (figure 25), de lithosols et régosols retenus. Sur la Sierra Nevada occidentale, Tlaxcala et Ixtlahuaca il y a essentiellement des phases duriques et durique profond.

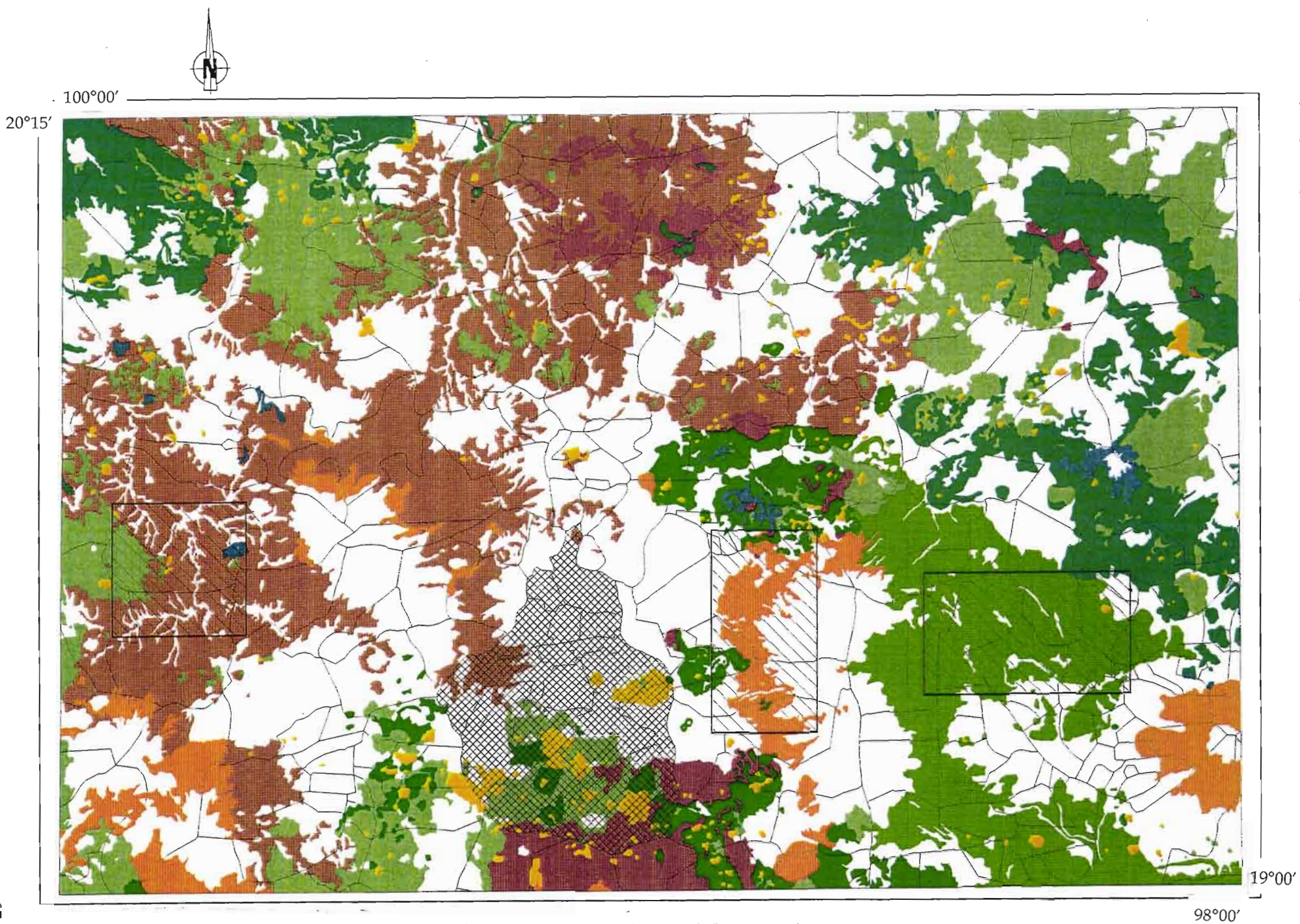


Figure 24: Carte des sélections sur critères géologiques (échelle : 1/895 000)

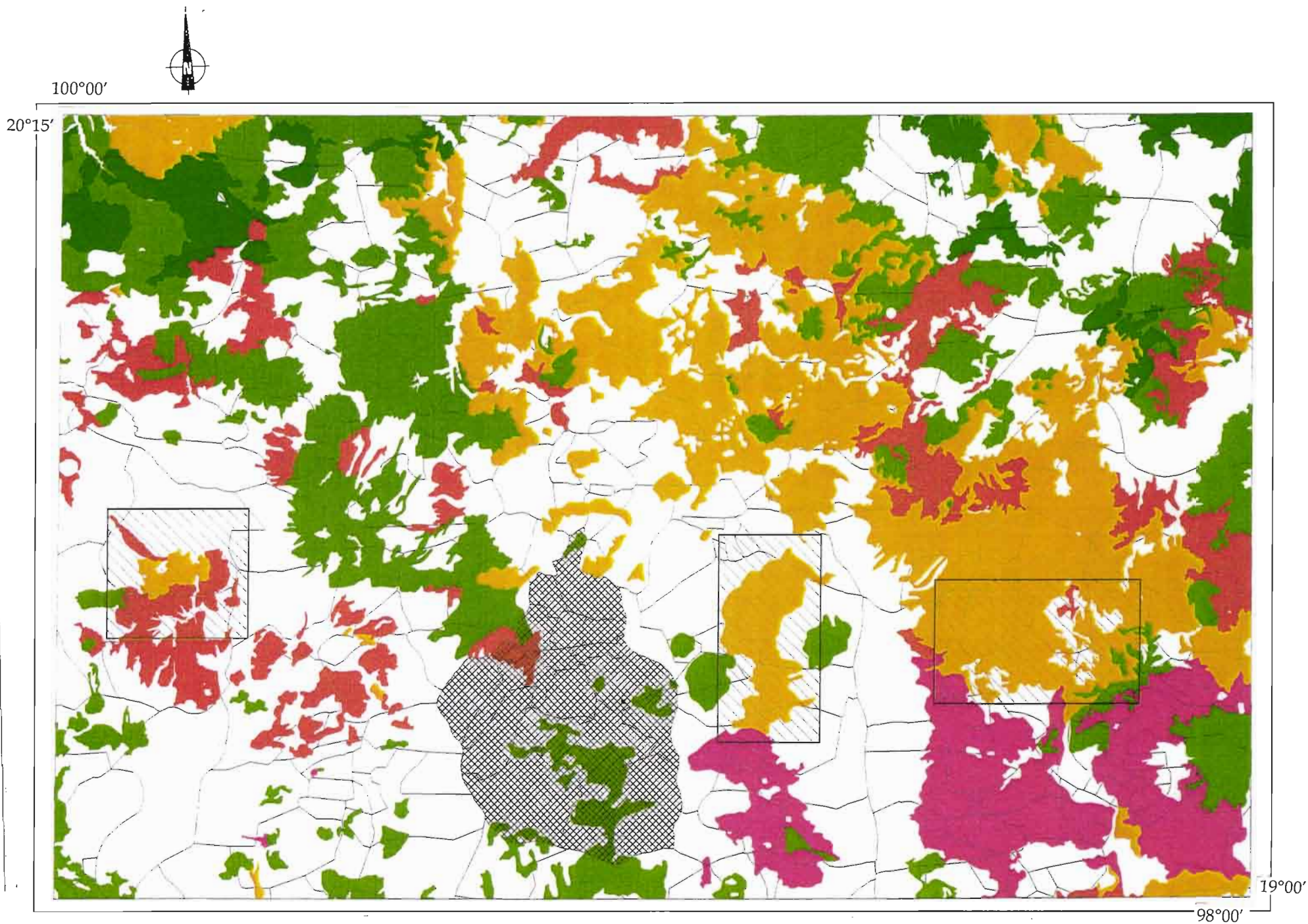


Figure 25 : Carte des sélections sur les phases physiques des sols retenues (1/895 000)

2.2. - Résultat des requêtes sur le milieu physique

Pour obtenir la carte des zones susceptibles d'avoir des *tepetates* à l'affleurement, nous avons combiné les différents critères retenus sur le milieu physique. La carte résultante (figure 26) comprend en blanc tous les secteurs qui ont été écartés de notre centre d'intérêt car ne correspondant pas à nos requêtes sélectives. Bien qu'ait été en couleur de fond les différents substrats géologiques sélectionnés, les zones retenues sont entre 2 300 et 3 000 m d'altitude, dans des secteurs où les précipitations moyennes en saison des pluies sont inférieures à 900 mm, où le substrat géologique correspond à des tufs ou à des brèches volcaniques, et où les phases physiques des sols correspondent à une induration.

En fonction des thèmes retenus et strictement sélectionnés, on constate que les résultats de croisement de la base de données SIG (figure 26) concordent spatialement très bien avec les résultats que nous avons préalablement obtenus en télédétection. Les principales différences sont liées à l'échelle de travail et au manque de précision d'une base de données qui a été réalisée à partir de documents au 1/250 000. On constate que la zone de Tlaxcala est celle qui est la plus atteinte par les phénomènes d'érosion et de mise à l'affleurement des *tepetates*, puisqu'elle réunit la plus grande surface autour de toutes les requêtes sur le milieu, près de 80% de ce secteur d'étude est potentiellement en *tepetate*. Les zones de la Sierra Nevada et d'Ixtlahuaca sont potentiellement touchées par la mise à l'affleurement des *tepetates* à des degrés équivalents. Ces secteurs sensibles sont localisés au niveau des piémonts.

Les surfaces estimées pour chaque extraction sont :

Tableau 3 : Surfaces susceptibles d'être en <i>tepetates</i>					
Surface de l'extraction	Sierra Nevada 63 050 ha		Tlaxcala 63 200 ha		Ixtlahuaca 44 850 ha
Total <i>tepetates</i>	25 450 ha	40%	48 730 ha	77%	18 800 ha 42%

Nettement plus élevées que les résultats obtenus par télédétection (tableau 2), ces surfaces correspondent en matière de localisation des zones érodées ou susceptibles de l'être. De plus, ces résultats sont comparables avec les surfaces susceptibles d'être érodées calculées à partir du document de Peña y Zebrowski (1992) pour la Sierra Nevada (26 700 ha).

Pour l'ensemble de la carte (3 000 000 ha) on dénombre 963 950 ha, soit 32% de surfaces susceptibles d'être des *tepetates* en fonction de l'ensemble des critères retenus. Ces secteurs potentiellement en *tepetate* sont localisés en piémonts des principaux édifices volcaniques. Ils sont répartis sur l'ensemble de la carte, avec une plus grande concentration dans la partie au nord-est du DF et de la Sierra Nevada. A l'exception du DF qui s'étend tellement qu'il empiète sur les montagnes qui l'entourent, les principales agglomérations sont installées en plaine et ne sont pas concernées par les problèmes liés à la présence de *tepetates*.

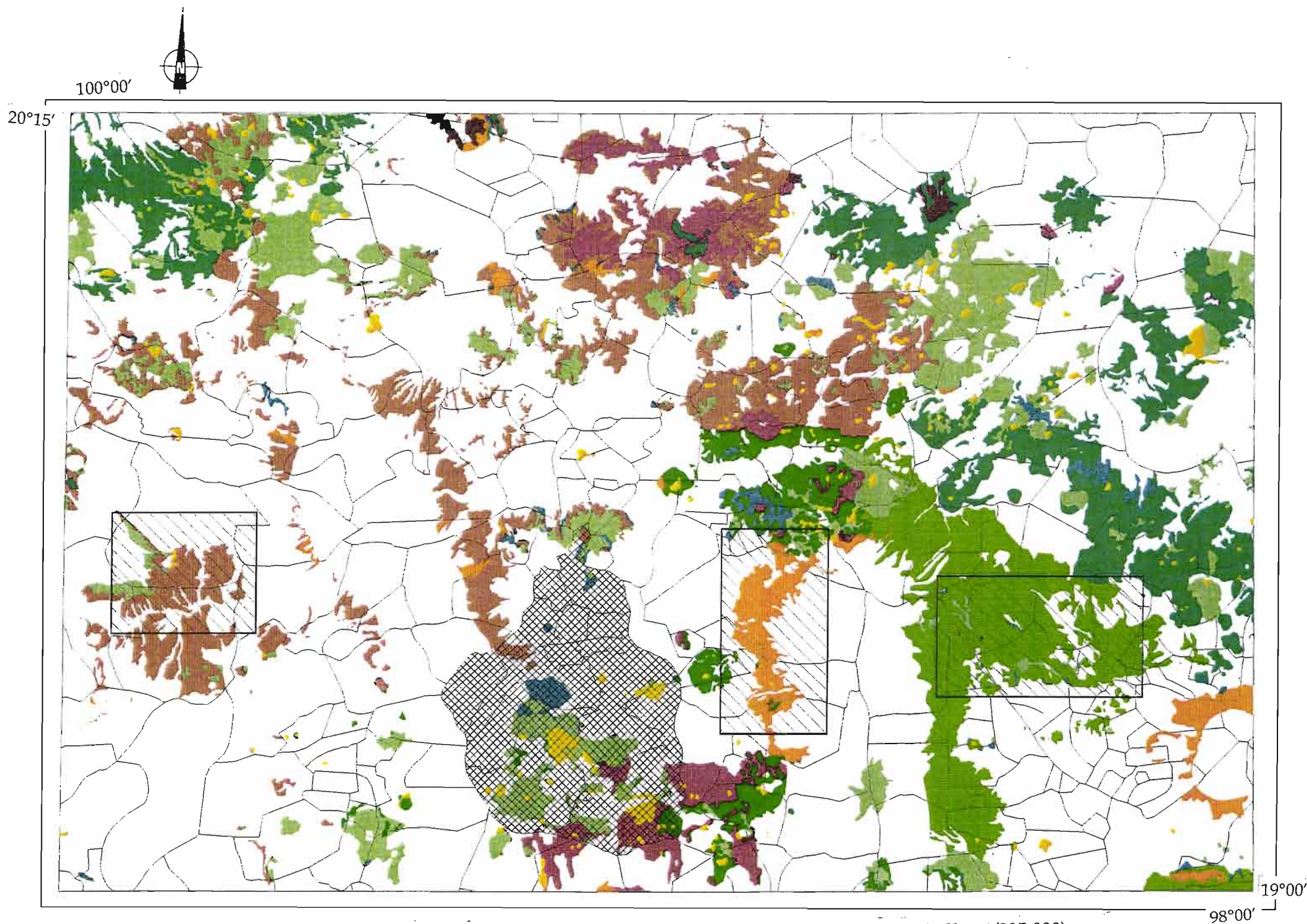


Figure 26 : Carte des *tepetates* à partir de l'ensemble des requêtes sélectives (échelle : 1/895 000)

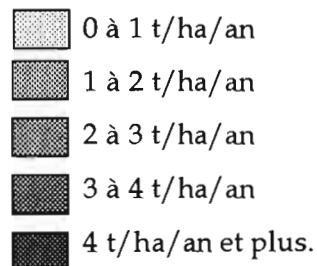
2.2. - Utilisation des données socio-économiques

Pour les données socio-économiques sur le découpage administratif des municipes, nous avons estimé qu'il était plus audacieux, en raison du type d'information et de l'échelle de découpage, de sélectionner l'information pour chaque thème, sans nous préoccuper de la croiser avec les autres résultats, sinon en localisant pour chaque carte nos secteurs d'études préliminaires. Les cartes ainsi obtenues permettent d'avoir une information relative entre les municipes sur chaque thème retenu. Notre objectif étant de pouvoir envisager les secteurs à réhabiliter en fonction des besoins, de la pression actuelle sur le milieu, et des possibilités.

2.2.1. - Les rendements céréaliers

Pour les rendements en maïs et en blé (figure 27 a et b) nous avons retenu comme critère de référence 1 t/ha/an et 2 t/ha/an, en considérant qu'en dessous de ces rendements pour cette région du Mexique, les récoltes peuvent être considérées comme mauvaises. En gris clair apparaissent tous les municipes ou le maïs ou le blé ne sont pas cultivés. Le

dégradé de gris du plus pâle au plus sombre indique un rendement croissant pour les fourchettes suivantes :



Le maïs est beaucoup plus cultivé que le blé. Les rendements sont naturellement plus élevés dans les zones basses et les secteurs irrigués qu'en zones de cultures saisonnières sur les piedmonts. Ainsi en zones de piémont, les rendements en maïs sont inférieurs à 1 t/ha/an, alors qu'en plaine irriguée, ils sont supérieurs à 4 t/ha/an. L'influence du relief et de l'altitude se fait sentir essentiellement dans la culture du blé. On peut noter l'existence de forts rendements de maïs à l'intérieur du DF, résultats aussi curieux qu'inexpliqués. Les rendements moyens de la Sierra Nevada occidentale, considérée comme la banlieue de Mexico, s'expliquent par une agriculture de *week end* (Ly, 1993).

Il est important de souligner que du fait du découpage des municipes, les différences entre la plaine irriguée **hautement productive** et la **zone de piémonts** peu productive, sont masquées.

Le secteur correspondant à notre extraction sur Tlaxcala a de faibles rendements en maïs. L'agriculture dans cette région est une agriculture de subsistance alors que les conditions du milieu naturel et des sols sont défavorables et qu'il n'y a pas d'irrigation. Cependant, pour cette même région, les rendements en blé sont plus élevés. Cela peut s'expliquer par la mécanisation plus fréquente de cette culture ainsi que par les forts intrants qui lui sont alloués, de plus cette plante est relativement peu exigeante, et plus résistante que le maïs aux conditions difficiles du milieu, notamment face à la sécheresse, fréquente dans ces régions.

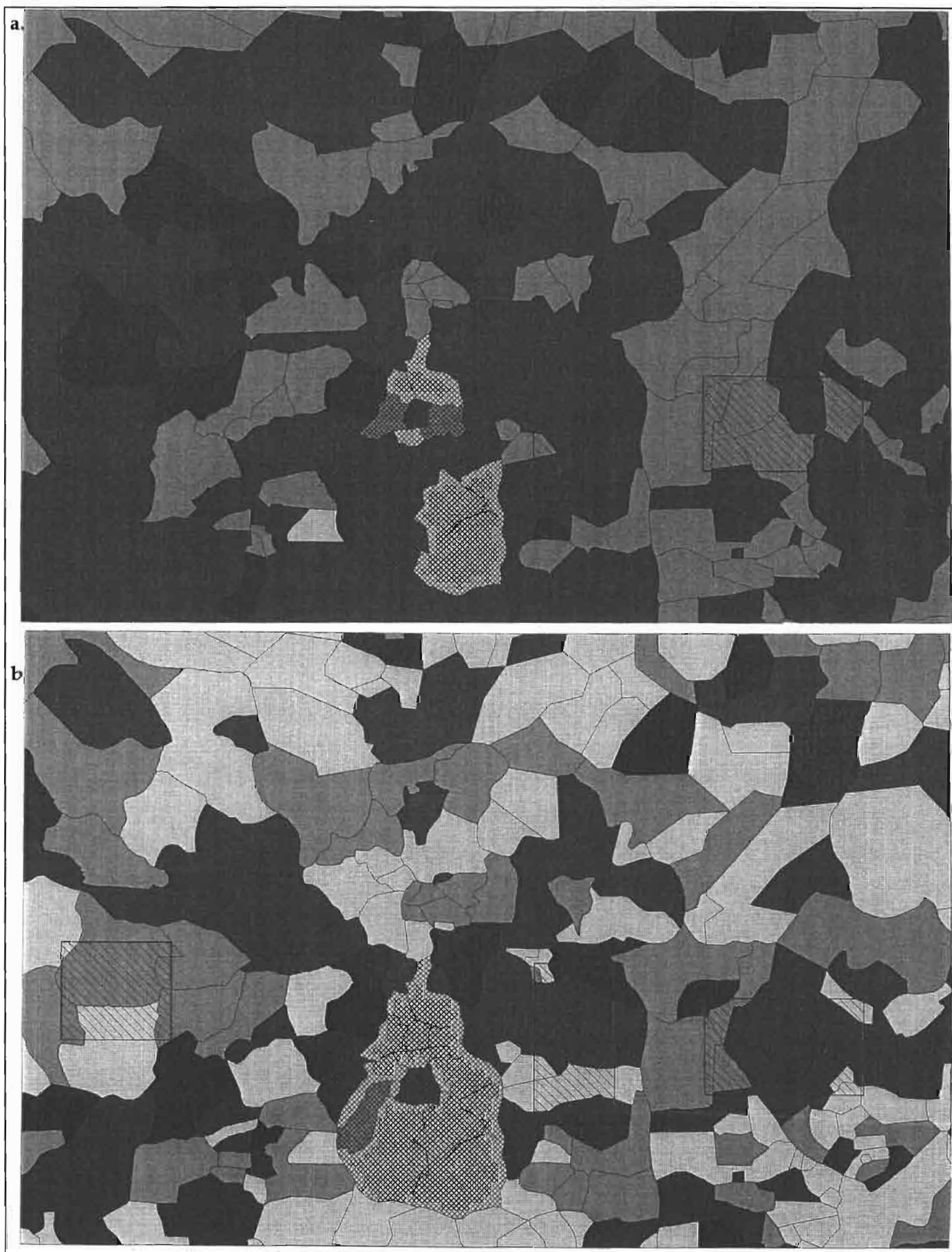


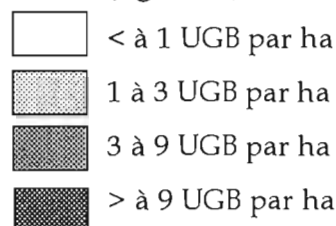
Figure 27 : Rendements céréaliers : a - Maïs ; b - Blé. (échelle : 1/1 160 000)

2.2.2. - L'élevage

Afin d'estimer la pression animale sur le milieu, nous avons analysé les données concernant les ovins et les bovins. L'accélération de la dégradation des sols et la modification des paysages sont liés à leur présence en grand nombre. En considérant uniquement les superficies en prés naturels ou en pâturages sur chacun des municipes,

nous avons effectué le rapport de la charge en UGB (unité gros bétail, 1 ovin = 0,2 bovin) par hectare. Il en résulte la carte suivante

(figure 24), avec :



Bien que la charge supportable pour le milieu varie en fonction de la saison, de la pente, des sols, etc. ,on peut estimer qu'au delà de 2 à 3 UGB/ha, il y a des risques de surpâturage.

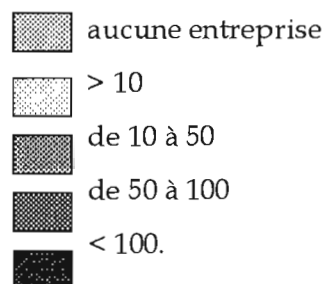
Par rapport à nos secteurs d'études on constate que la charge animale est bien présente dans ces zones de piémonts. Cependant, il faut relativiser ces données qui prennent en compte l'élevage extensif comme intensif, on remarque ainsi qu'une grande partie de l'élevage se fait sur le territoire même du district fédéral de Mexico, à proximité des consommateurs.



Figure 28 : Nombre d'UGB par ha de pâtures (échelle 1/1 160 000)

2.2.3. - L'exploitation des forêts

Liée directement aux déboisements depuis lesquels s'amorce l'érosion des sols et la dégradation des paysages, nous avons voulu localiser les unités productrices de bois et de papier (figure 29) :



On constate l'absence d'entreprises productrices de bois ou de papier dans les municipes en zone forestière comme l'est la majeure partie des montagnes et en particulier la Sierra Nevada. Cela signifie que les municipes concernés non seulement ne bénéficient pas des retombées économiques liées à l'exploitation des forêts, mais en plus ils perdent leur capital bois et sols. Le poids énorme du DF et la sous utilisation des massifs forestiers par les habitants est significatif d'un gros problème de gestion économique.

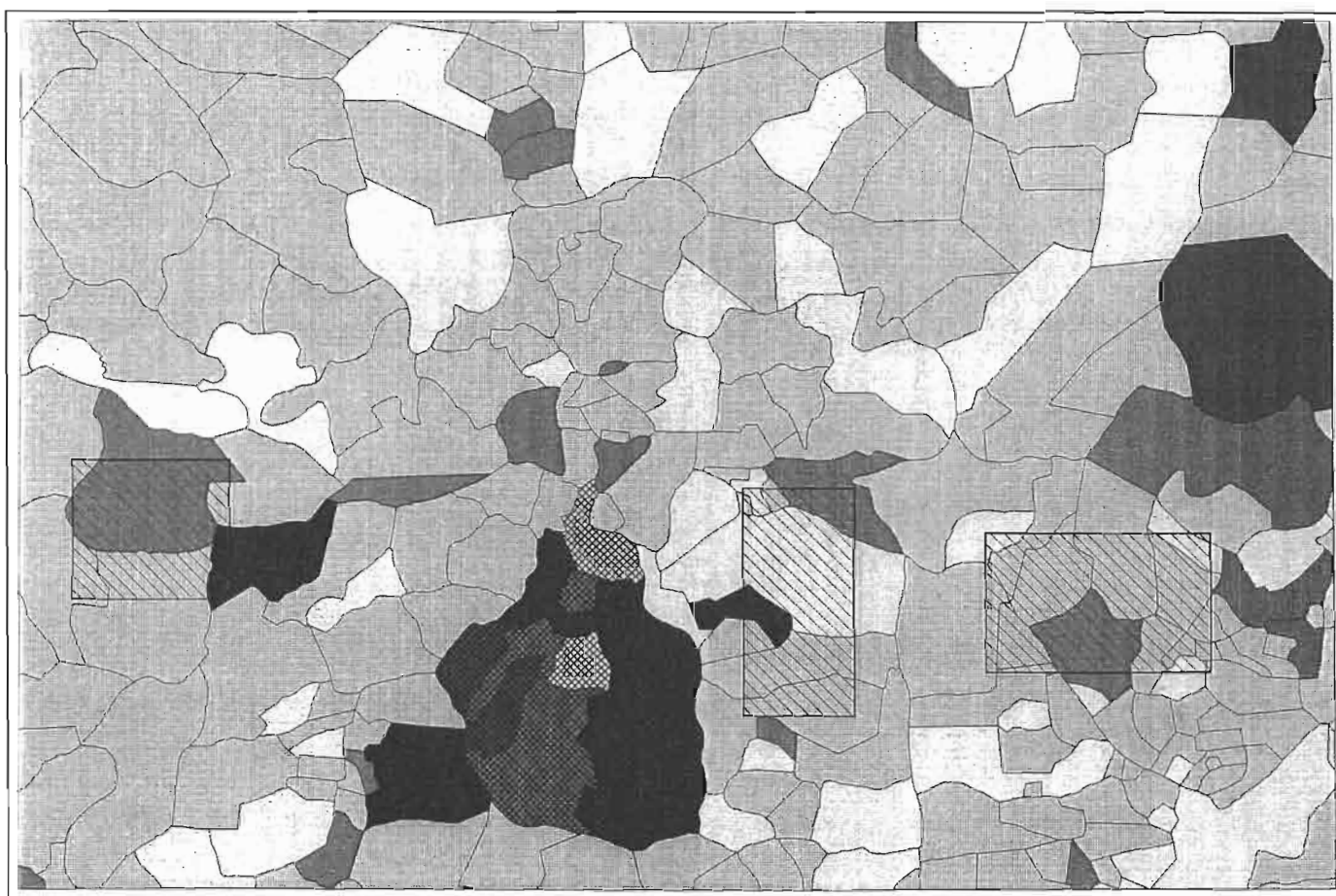


Figure 29: Unités productrices de bois et de papier (échelle : 1/1 160 000)

2.2.4. ~ L'économie

La caractérisation économique de la population est liée aux capacités de celle-ci à pouvoir payer des travaux de réhabilitation des *tepetates*.

Afin de caractériser la population et déterminer l'importance de l'agriculture sur celle-ci, nous avons retenu le pourcentage de population rurale (figure 30) comme un indicateur de l'activité agricole :

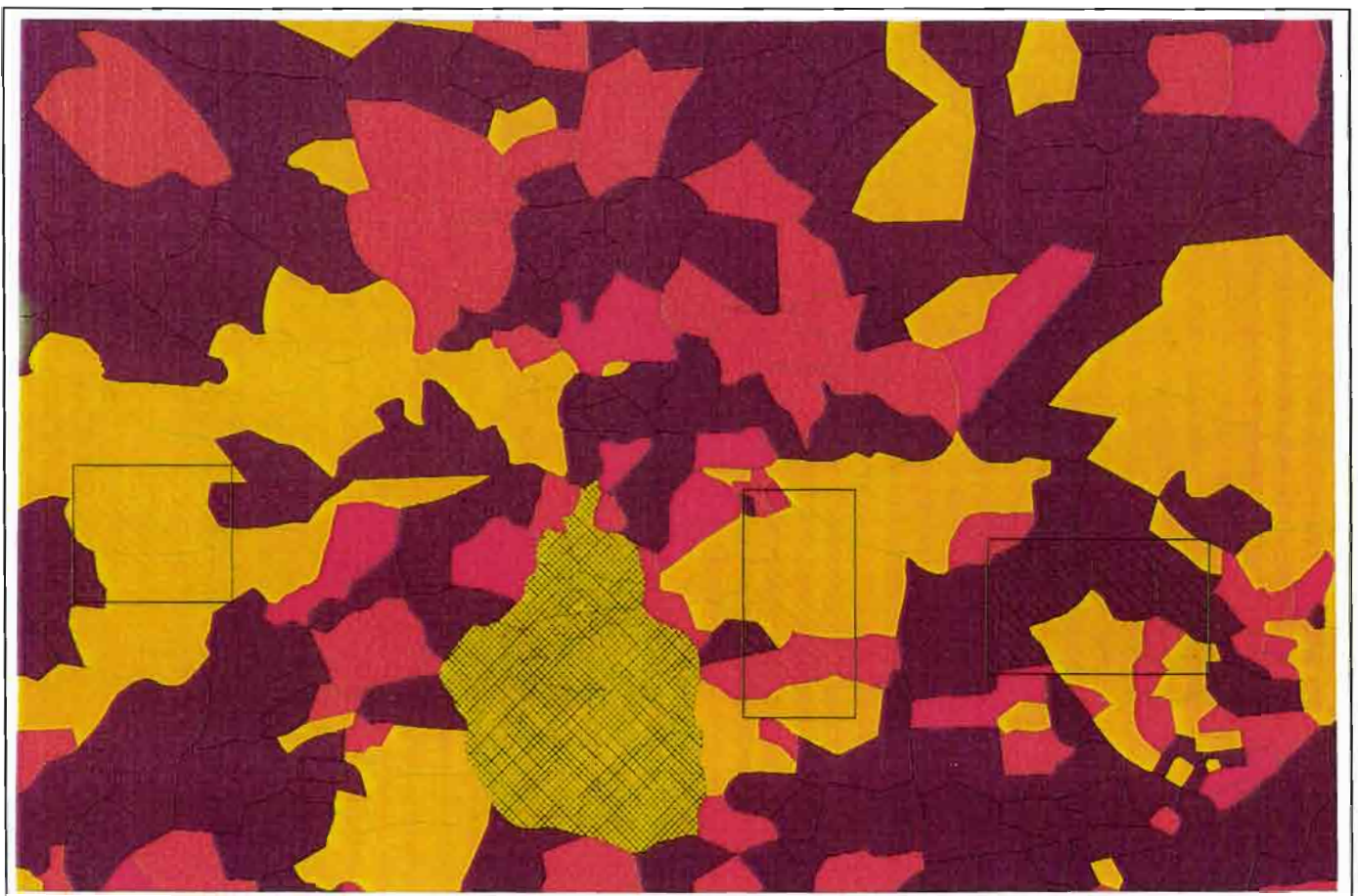
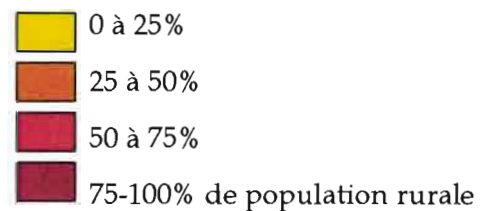


Figure 30 :Population rurale

On constate que 50 à 100% de la population de la majorité des municipes est rurale. Parmi nos secteurs d'étude préliminaire, la zone de Tlaxcala est la plus rurale. Celui de la Sierra Nevada et d'Ixtlahuaca étant plus proche de Mexico et de Toluca, elles en subissent directement les influences.

Pour évaluer le niveau de vie moyen de la population par municipe, nous avons sélectionné les pourcentages de population active occupée dont les revenus sont inférieurs au salaire minimum mexicain (figure 31).

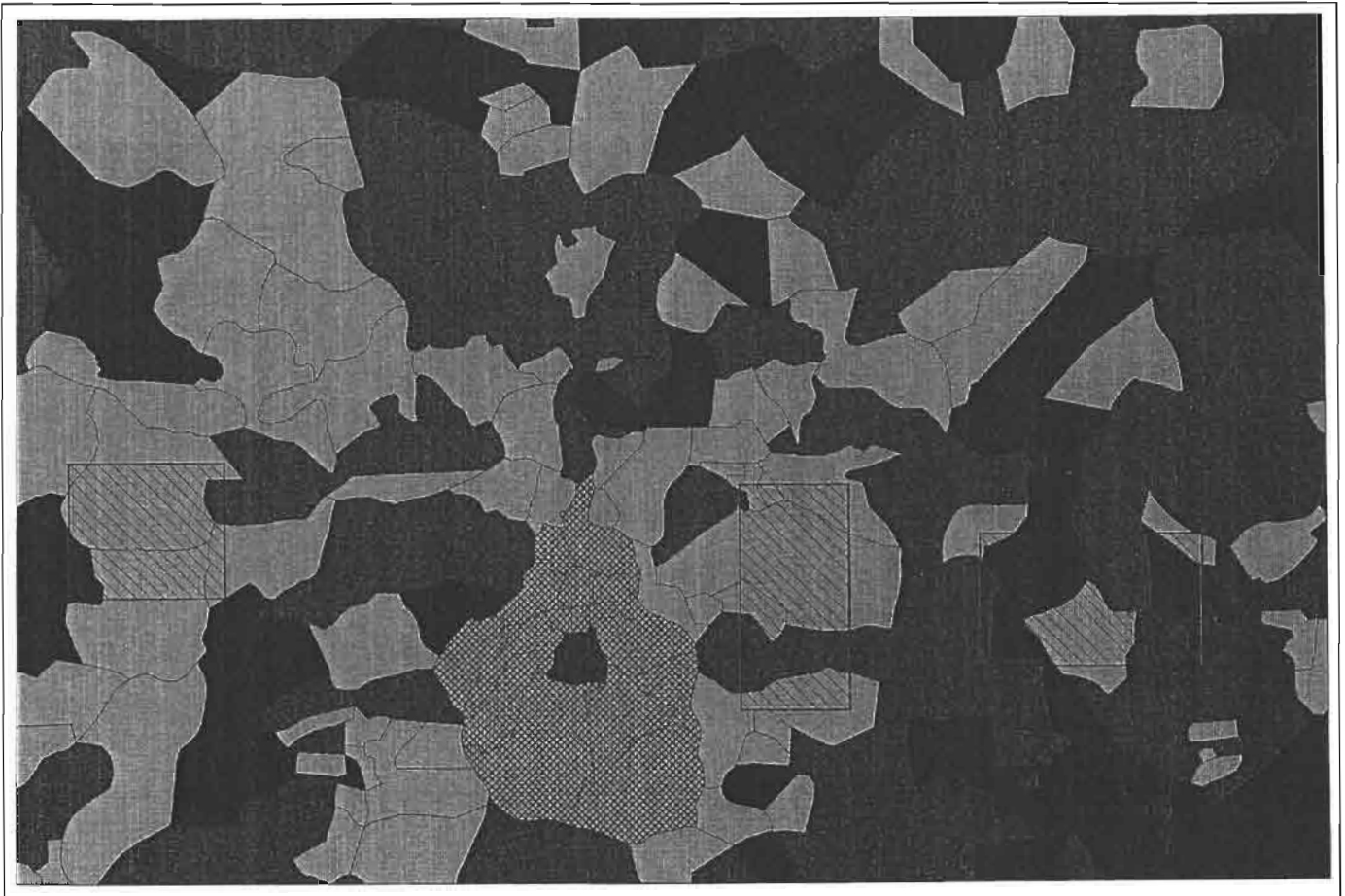
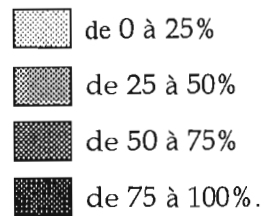


Figure 31: Revenus inférieurs au salaire minimum

Les municipes les plus pauvres sont également ceux dont la majeure partie de la population est rurale. On retrouve donc la zone de Tlaxcala comme très pauvre, là où celle de la Sierra Nevada et d'Ixtlahuaca le sont beaucoup moins.

2.2.5. ~ Résultats des données socio-économiques

Les données socio-économiques, qu'elles concernent l'agriculture ou les niveaux de vie, vont dans le même sens : les zones à faible rendement agricole comme Tlaxcala sont également les zones les plus pauvres, et celles où il y a la plus forte concentration de population rurale. La Sierra Nevada occidentale et Ixtlahuaca sont des zones qui subissent l'influence économique des villes de Mexico et Toluca. C'est la raison pour laquelle elles sont moins pauvres et ont une plus forte proportion de population urbaine.

3. - Résultats généraux et discussion

Les tableaux suivants (4, 5 et 6) effectuent un récapitulatif chiffré des différents résultats que nous avons obtenus à la fois avec les méthodes de télédétection, et avec l'utilisation du SIG.

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats sur Sierra Nevada Occidentale

Outils	Thèmes	Surface en hectares	Pourcentage de la zone d'étude
T E L E D E T E C T I O N	<i>tepetates</i> affleurants	690	1 %
	<i>tepetates</i> discontinus	4 500	7 %
	Total <i>tepetates</i>	5 190	8 %
	Zones sensibles	8 200	13 %
	Total général	13 390	21 %
SIG	<i>Tepetates</i> potentiels	24 450	40 %

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats sur Tlaxcala

Outils	Thèmes	Surface en hectares	Pourcentage de la zone d'étude
T E L E D E T E C T I O N	<i>tepetates</i> affleurants	2 800	4.5 %
	<i>tepetates</i> discontinus	7 150	11 %
	Total <i>tepetates</i>	9 950	15.5 %
	Zones sensibles	3 600	5.5 %
	Total général	13 550	21 %
SIG	<i>Tepetates</i> potentiels	48 730	77 %

Tableau 6 : Récapitulatif des résultats sur Ixtlahuaca

Outils	Thèmes	Surface en hectares	Pourcentage de la zone d'étude
T E L E D E T E C T I O N	<i>tepetates</i> affleurants	400	0.9 %
	<i>tepetates</i> discontinus	1600	3.5 %
	Total <i>tepetates</i>	2 000	4.4 %
	Zones sensibles	4 900	11 %
	Total général	6 900	15.5 %
SIG	<i>Tepetates</i> potentiels	18 800	42 %

Le tableau 7 permet de comparer et de relativiser une partie de nos résultats. Les plus grandes étendues en *tepetates* affleurants et discontinus s'expliquent par la marge d'erreur introduite par un pixel de 30 mètres. Le moyennage effectué entre les objets et les surfaces tend à englober des thèmes différents, spatialement proches et de faible étendue. Peña et Zebrowski ont pu extraire ces petites surfaces marginales de leur cartographie.

Tableau 7 : Résultats obtenus par Peña y Zebrowski (1992) sur Sierra Nevada Occidentale

Thèmes	Surface en hectares	Pourcentage de la zone d'étude
Total <i>tepetates</i>	3 100	2 %
Zones sensibles	26 700	42 %
Total général	28 800	44 %

La très grande différence qui existe entre les zones sensibles déterminées par Peña et Zebrowski, et ce que nous avons pu obtenir avec la télédétection, est due au couvert pédologique superficiel ainsi qu'au couvert végétal encore présent sur ces secteurs. Ces derniers modifient de telle sorte la réflectance des *tepetates* sous-jacents qu'ils ne sont plus directement détectables avec des capteurs passifs tel Landsat.

La différence notable qui existe entre les chiffres obtenus par télédétection et par SIG, concernant la spatialisation des *tepetates* et des zones sensibles, s'explique par l'échelle de travail. Toutefois l'échelle du SIG nous permet de mieux apprécier l'importance globale des phénomènes d'érosion des sols et de mise à l'affleurement des *tepetates*. Ces derniers résultats peuvent être pondérés grâce aux résultats de classification des images satellitales. Les critères de pente n'ayant pas encore pu être introduits dans les requêtes sélectives, il faut envisager qu'avec ceux-ci les surfaces alors concernées par des affleurements réels ou potentiels de *tepetates* sont susceptibles de diminuer.

Les cartes extraites des données du dernier recensement nous permettent de localiser grossièrement les zones les plus pauvres et de constater qu'il y a un lien étroit avec les zones les plus rurales. On remarque une corrélation entre les zones les plus pauvres comme Tlaxcala qui se trouve également être l'un des secteurs les plus touchés par l'érosion et l'affleurement des *tepetates*. Cependant, le découpage administratif à l'échelle des municipes n'est pas suffisamment fin pour pouvoir déterminer avec précision les secteurs ayant besoin d'être réhabilités. Effectivement, les limites des municipes englobent pour la plupart des unités paysagères différentes, avec un morceau de montagne ou de colline, leurs versants et piémonts associés, une partie de plaine partiellement irriguée, de l'habitat dispersé ou groupé, parfois une ville plus importante. Chaque municipe est donc composé d'un grand nombre de sous unités, et la moyenne des données socio-économiques pour chaque municipe n'est en fait pas toujours représentative de quelque chose de significatif. Ces données indicatives restent bien trop floues pour pouvoir être exploitées et mises en relation avec les résultats de spatialisation des *tepetates* tels quels.

La réalisation des recensements de population est en réalité effectuée sous forme d'enquêtes, et donc à une échelle bien plus grande que celle de chaque municipe, bien que ce soit uniquement sous cette forme que l'INEGI publie les résultats. Toutefois, il est envisageable par le biais d'un accord de coopération avec cet institut de pouvoir obtenir les résultats pour chaque ville, village ou hameau. Avec ces mêmes données sur un découpage administratif plus fin nous pourrions localiser de manière bien plus fiable et précise les sites à réhabiliter pour les besoins de l'agriculture, et les sites à protéger pour éviter qu'ils ne s'érodent d'avantage en fonction des utilisations.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Bilan sur les travaux de spatialisation

Lors de cette étude nous n'avons pas réussi à discriminer correctement de manière radiométrique les *tepetates* de certains autres thèmes minéraux comme l'urbain et les carrières; aussi, il nous a fallu utiliser des masques graphiques. Au terme de ces travaux de cartographie et état des lieux des surfaces en *tepetates* affleurants et discontinus, et d'identification des secteurs sensibles, il se dégage (tableaux 4, 5, et 6) que 15 à 20% des surfaces totales prises en compte sont touchées par les phénomènes d'érosion des sols, et que 40 à 70% des surfaces totale en zone de piémonts sont susceptibles de l'être si aucune mesure de protection n'est mise en place. Nos travaux montrent que les critères d'apparition à l'affleurement des *tepetates* (altitude < 2 800 m; pluviométrie annuelle < ou = à 700 mm; pentes > 10%; matériel parental constitué de dépôts volcaniques de type lahars, déferlantes, et coulées pyroclastiques), définis par Quantin (1992) et Peña *et al.* (1992) sur les secteurs de Tlaxcala et Santa Catarina, étaient trop restrictifs par rapport à nos zones tests. Aussi nous avons élargi deux de ces principaux critères d'existence des *tepetates* : l'altitude (<3 000) et les précipitations annuelles (<900 mm). Cependant, ces discordances entre les critères théoriques définis sur une région bien précise ne sont pas seulement liées à leurs variations plus ou moins marquées d'un lieu à un autre, mais également au manque de précision et de fiabilité de certains documents existants et utilisés, notamment les cartes climatiques.

Les différents résultats obtenus d'une part par les méthodes de télédétection et d'autre part par l'intégration du système d'information géographique, montrent la complémentarité de ces outils de spatialisation des connaissances. Il est vrai que dans notre zone d'étude, la télédétection permet une approche plus précise et plus fine que le SIG en ce qui concerne la spatialisation des zones de *tepetates* affleurants et discontinus. Ce dernier s'est révélé trop imprécis à la fois par ses données et son échelle de départ. L'avantage des images satellitaires est qu'elles permettent des changements d'échelle rapides, entre le 1/75 000ème et le 1/1 500 000ème pour Landsat, sans qu'il y ait une grande perte d'information. Certes, il est vrai que l'on est limité par la taille du pixel mais cette limite est bien moins grande au niveau de la précision que l'utilisation de données cartographiques au 1/250 000 comme nous l'avons fait avec le SIG. Pour augmenter la précision cartographique il est envisageable de travailler avec des données du satellite SPOT, ou avec des photographies aériennes. Toutefois, il existe également d'autres limites à l'utilisation de tels outils (coûts financiers, investissement temporel, qualité des données).

L'utilisation d'une base de données socio-économiques ne nous a pas permis de définir les zones prioritaires de réhabilitation des *tepetates*. En effet le support des statistiques socio-économiques repose sur le découpage administratif utilisé au Mexique (le *municipio*), découpage

beaucoup trop grand en superficie et qui a pour conséquence de couvrir des zones géographiques très variées (plaine, piémont, montagne), et d'utilisation très différente (irrigation, agriculture pluviale, forêt). Dans ces conditions, on ne peut qu'obtenir des moyennes au niveau du municipale. Néanmoins, l'utilisation de ces statistiques nous renseigne sur les zones pour lesquelles il est nécessaire d'obtenir des informations plus précises par rapport aux unités paysagères. De plus, ces données bien qu'à une échelle inappropriée permettent tout de même de pressentir les secteurs où seront localisées les zones prioritaires.

De nouveaux horizons

Le travail présenté à petite échelle est nécessaire car il permet d'obtenir une vision générale de la situation, de la localisation des paysages de *tepetates* qui posent problème. De plus, la localisation fine des *tepetates* est également nécessaire afin de connaître avec précision les surfaces à réhabiliter et leur situation par rapport aux infrastructures existantes. L'accès à une telle précision reste limité avec les données Landsat. Cependant, en plus des capteurs classiques existants comme SPOT ou Landsat, de plus en plus de nouveaux capteurs sont mis au point. Qu'il s'agisse de capteurs du type MERIS (medium resolution imaging spectrometer) ou CASI (compact airborne imaging spectrometer) avec une augmentation du nombre de canaux et des bandes spectrales de plus en plus fines. Avec ces capteurs, la finesse radiométrique peut permettre de mieux différencier les réponses spectrales des différents objets télédétektés. En outre, de plus en plus de capteurs ont une résolution extrêmement fine, de l'ordre du mètre, tel KOSMOS (3 m) et MOMS-02 (4,5 m).

Une méthode développée par Sorani (communication orale, 1997) est en cours de réalisation. Extrêmement précise (résolution spatiale de moins d'un mètre), elle est aussi peu coûteuse puisqu'elle ne représente que le prix d'un survol aérien (5 000\$ US pour 100 000 ha), et d'un traitement informatisé. Il s'agit de l'utilisation d'une caméra numérique aéroportée, reliée à un GPS pour les coordonnées de positionnement géographique ainsi qu'à un ordinateur pour le stockage et l'exploitation.

Par rapport aux données à très haute résolution spatiale en général, on peut se demander si l'intérêt d'arriver à un pixel métrique pour spatialiser les *tepetates* est si important, sachant que plus le pixel est petit et plus la quantité d'information à traiter augmente pour une même surface de départ. Il serait donc nécessaire de trouver un moyen de sélectionner d'une part les zones à survoler, puis d'autre part de trier rapidement les données ainsi obtenues afin de ne traiter que les unités paysagères concernant les *tepetates*. La première sélection pouvant être effectuée à partir des images Landsat disponibles, il faudrait ensuite repérer les unités recherchées par une classification

éliminant les autres unités paysagères (villes, cultures, forêts, ...) afin de ne traiter avec précision que celles susceptibles de contenir l'objet recherché. Cette méthode réduisant les vérifications de terrain nécessaires à toute cartographie par télédétection.

Perspectives d'étude doctorale

En collaboration avec des organismes tels que l'ORSTOM, et la UNAM, nous envisageons de traiter de la spatialisation des *tepetates* en vue de leur réhabilitation sur l'ensemble de l'axe néo-volcanique mexicain. Les travaux déjà effectués vont nous permettre de passer à l'utilisation d'une méthode de spatialisation plus fiable et plus fine comme celle décrite précédemment. Les principales étapes à réaliser seraient les suivantes :

- 1 - Améliorer la méthode de discrimination radiométrique des *tepetates*.
- 2 - Terminer l'exploitation des données satellitales disponibles afin de réaliser une cartographie générale de la localisation des grandes zones à *tepetates*.
- 3 - Utiliser des données télédéteectée permettant une cartographie à plus grande échelle sur les secteurs prédéterminés par la cartographie générale précédente.
- 4 - Comparer cette cartographie avec les cartes thématiques existantes (sols, géologie, climat, etc.) afin d'obtenir une nouvelle définition des conditions d'apparition des *tepetates*.
- 5 - Effectuer une série de relevés de terrain et d'analyses d'échantillons de *tepetates* afin d'obtenir une nouvelle classification de ceux-ci et de relier ces données aux résultats cartographiques.
- 6 - En fonction des résultats d'analyses, classification et cartographie des différents *tepetates* définir les zones prioritaires à réhabiliter en fonction des critères de stade de dégradation et de possibilité.
- 7 - Obtenir, exploiter, et compléter par des enquêtes auprès des populations concernées les données socio-économiques existantes à l'échelle locale.

Suite à ces nombreuses étapes de recherche nous pourrions alors déterminer quelles sont les zones de *tepetates* à réhabiliter en fonction des critères du milieu naturel et humain.

Une fois les travaux de spatialisation réalisés il sera éventuellement possible de développer la notion d'aide à la décision à partir des résultats, pour indiquer des pistes fiables pour l'aménagement et la réhabilitation des *tepetates*. Dans ce sens le projet européen ADAGE (Aide à la Décision pour l'Aménagement et la Gestion de l'Environnement) dont l'objectif est de mettre au point des simulations de décision concernant certains types d'aménagement, en fonction d'un état du milieu prenant en compte à la fois des données sur le milieu naturel, l'économie, les populations, pourrait être utile. Cette recherche réalisée en collaboration avec des chercheurs français et mexicains de différentes disciplines permettra enfin de fournir à partir d'une méthode originale qui croise des données du milieux naturel et humain, des résultats fiables et une base décisionnelle. Les décideurs, politiques et économiques pourront alors lancer des opérations de développement afin d'arrêter la dégradation du milieu et la paupérisation des paysans de ces régions.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE J.L. 1996. Etude de deux communautés paysannes de l'état du Michoacan (Mexique). CNEARC-ENSAIA. Mémoire de fin de première année ESAT. Montpellier. 76 p.
- ALVAREZ-ICAZA P., CERVERA G., GARIBAY C., GUTIERRES P., ROSETE F. 1993. Condicionantes socio ambientales para el desarrollo sustentable de la region purépecha. *Cuadernos agrarios*, n°7, enero-junio 1993, pp. 126-138.
- ARIAS, H. 1992. Reporte final. Proyecto "Incorporación de tepetates a la producción agrícola"; Contrato CEE-ORSTOM n° TS2-0212-C. Montecillo, Mexico, 68 p.
- AXES F. 1981. Complémentarité SIG-télédétection, Définition d'une méthodologie de classification avec intégration de données exogènes, contribution à la cartographie de l'occupation du sol en Languedoc-Roussillon. Mémoire de DEA. "Sciences de l'Information Géographique", ENSG-Paris VII.
- BÁEZ A., ASCENCIO E., PRAT C., MÁRQUEZ, A. 1996. Aálisis del comporatmiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal (1993-1995). Texcoco, México. Actas del 3 symp. intern. Suelos volc. endurecidos. Quito, Ecuador, déc. 1996. *En cours de publication*.
- BATAILLON C. 1968. Régions géographiques au Mexique. Institut des hautes études de l'Amérique Latine, Paris, 212 p.
- BAUMANN, J. 1992. Investigaciones sobre la erodibilidad y el regimen hídrico de los duripanes (tepetates) rehabilitados para los cultivos, en el bloque de Tlaxcala. Informe final, Contrato CEE-ORSTOM n° TS2-0212-C. 26 p.
- BLAMONT D., MERING C. 1986. Use of remote sensing for vegetation and landuse mapping in mountainous area: the case of central Nepal. Proc. 20th intern. symposium on remote sensing of environment, vol. III, 4-10 december, Nairobi, Kenya, pp. 1157-1164.
- BONN F., ROCHON F. 1992. Précis de Télédétection. Vol 1: Principes et méthodes. Presse de l'Université du Québec/AUPELF, 485 p.
- BONN F., ESCADAFAL R. 1996. La télédétection appliquée aux sols. Précis de télédétection vol. 2. Applications Thématiques. Presses de l'Université du Québec-AUPELF. pp. 93-135.
- CAMPBELL J. B. 1987. Introduction to remote sensing. Guilford press. USA.
- CAMPOS, A., DUBROEUCQ D. 1990. Formación de tepetates en suelos volcánicos. Terra 8: 137-147.
- CHAPELA F. 1995. La política para el campo: degradación ambiental. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*. enero 11-12 diciembre, nueva época. pp. 159-179.
- CHEVALIER F. 1953. La formation des grands domaines au Mexique/ terre et société aux 16ème et 17ème siècles. Institut d'ethnologie, Paris.
- CIHLAR J. 1987. A methodology for mapping and monitoring cropland soil erosion. *Can. J Soil Sci.* 67: 433-444.
- COCHET H. 1991. Alambradas en la sierra (un sistema agrario en México) La Sierra de Coalcomán. CEMCA. El colegio de Michoacán - ORSTOM. México.
- COURAULT D. 1989. Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales et diachroniques -Sols- INA-PG, 239 p.

- CRUZ-HERNANDEZ I. 1995. Transformaciones en el financiamiento rural mexicano durante el sexenio salinista - balance y tendencias. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*, enero 11-12 diciembre, nueva época. pp. 95-120.
- DE NONI G., JANEAU J.L., PRAT C., TRUJILLO G., VIENNOT M. 1994. Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique Latine (Equateur, Mexique, et Nicaragua): impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole. XV Congreso mundial de ciencias del suelo, Acapulco, México, 12-16 de julio de 1994. vol 6a, pp. 554-570.
- DOSSO M. 1990. Mise en relation de l'organisation tridimensionnelle des formations superficielles et de différentes données de télédétection correspondantes. Exemple pris en zone tropicale et en zone tempérée. Thèse, UER Sciences Physiques de la terre, Univ. Paris 7.
- DUBUCQ M. 1986. Télédétection spatiale et Erosion des sols: étude bibliographique. *Cahiers ORSTOM*, série Pédologie, vol. XXII, n°2, pp. 247-258.
- DUBUCQ M. 1989. Identification et cartographie par télédétection des sols érodés : application au Lauragais Toulousain (Sud-ouest France). Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 247 p.
- DUBROEUCQ, D., QUANTIN P., ZEBROWSKI C. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7: 3-12.
- ESCADAFAL R. 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Ed. ORSTOM, col. Etudes et Thèses, Paris, 317 p.
- ETCHEVERS J., LOPEZ R. R. M., ZEBROWSKI C., PENA H. D. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de Mexico y de Tlaxcala, Mexico. *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 171-177.
- ETCHEVERS J., ZEBROWSKI C., HIDALGO C., QUANTIN P. 1992 a. Fertilidad de los tepetates. II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de Mexico y Tlaxcala. Actes du symp. intern. sur les sols volcaniques indurés, *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 385-391.
- ETCHEVERS J., CRUZ L., MARES J., ZEBROWSKI C. 1992 b. Fertilidad de los tepetates. I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Actes du symp. intern. sur les sols volcaniques indurés *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 379-384.
- FAO of the United Nation. 1990. Remote sensing applications to land resources. Report of the 14th UN/FAO International Training Course in cooperation with the government of Italy. Rome. 298 p.
- FAUGERE G. 1995. Etude d'une communauté paysanne de l'état du Jalisco (Mexique). Mémoire de fin de première année ESAT. CNEARC-INAP-G. 77 p.
- FAURE J.F. 1996. L'érosion des sols dans le bassin inter-andin de l'Equateur : Spatialisation et cartographie des affleurements de "cangahua" par télédétection. Rapport de DESS. ORSTOM. Université Montpellier III. 110 p.
- FENTON T.E. 1982. Estimating soil erosion by remote sensing techniques. In: Remote sensing resource management. (Eds. C. J. Johannsen & Sanders J. L.). Soil Conservation Society of America. pp. 217-231.
- FISHER R. V., SCHMINCHE H. V. 1984. Pyroclastic Rocks. Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 472 p.
- FRIEDMANN H. 1991. "Changes in the International Division of Labor" en William H. Friedland, Lawrence Busch, Frederick H. Buttel y Alan P. Rudy (eds.), *Toward a New Political Economy of Agriculture*, Westview, Boulder.

- GARCIA C.A. 1961. Estudio de los suelos tepetatosos y sus posibilidades de recuperación agrícola. Tesis de Licenciatura. Dpto; Suelos, UACH, Chapingo, Mexico.
- GARCIA C.A. 1986. El control de la erosión en Tlaxcala : un problema secular. *Erdkund* 40, pp. 251-261.
- GDTA. 1991. Les cahiers pédagogiques du GDTA, cahier M1. Visualisation d'image numérique.
- GIRARD M-C. 1995. Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols, un exemple dans la région de Lodève. *Etude et gestion des sols*, vol. 2, n°1, pp. 7-24.
- GOUGEON O. 1987. Recherche sur l'évolution de la mise à contribution par l'homme de deux paysages agraires du nord du Michoacan depuis 1900. Rapport des recherches effectuées dans le cadre de la coopération en 1987 au CEMCA.
- GUERRERO E., LUNA J-L., CABALLERO E. 1992. Distribución de los tepetates de la república mexicana, escala 1/4.000.000. *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 131-136.
- GUYOT G. 1992. Télédétection satellitaire. Vol. 5: Signatures spectrales des surfaces naturelles. Ed. Paradigme, France.
- HEINE K. 1973. Die jungpleistozänen und holozänen Gletscher-vorstöße am Malinche Vulkan, Mexico. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 23/24 : 46-62.
- HESSMANN R. 1992. Micromorphological investigations en « tepetates » formation in the « toba » sediments of the state of Tlaxcala (Mexico) *Terra*, vol. 10, n° especial, pp 145-155.
- HIDALGO, C. 1995. Etude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico. Contribution à la connaissance de leurs caractères et de leur formation. Thèse, Univ. Nancy I, Nancy, France. 215 p.
- IBARRA J.L. 1992. ¿Hacia el fin de derecho y el corporatismo agrario? . In: 27 constitucional. *Cuadernos agrarios*, mayo 5-6 diciembre. nueva época. pp. 25-39.
- 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. Monographie de fin d'études, ISTOM, 06/1992. 191 p.
- LANDAZURI-BENITEZ G. 1995. El programa nacional de solidaridad en el imaginario social. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*. enero 11-12 diciembre, nueva época. pp. 135-148.
- LAPORTE J.M., 1983. Etude de la texture sur des simulations d'image du satellite de télédétection SPOT. Thèse, Univ. Paris VII.
- LEON A. 1992. Desarrollo o administración de la miseria: organizaciones campesinas y la política al campo. In: 27 constitucional. *Cuadernos agrarios*. mayo 5-6 diciembre. nueva época. pp. 9-24.
- LEPIGEON I. 1994. Etude d'une communauté paysanne de l'état de Tlaxcala (Mexique). Evolution de la mise en valeur du milieu et impact des tepetates sur les systèmes de production. CNEARC-ENSAT-ENSSAA. Mémoire de fin de première année ESAT. 75 p.
- LINCK T. 1988. El campesino desposeído. CEMCA, Mexico. 176 p.
- LINCK T. 1989. Changements technologiques et choix de société. La motorisation de l'agriculture pluviale. In: Innovation technologique et civilisation. Ed. CNRS, Paris, pp. 351-370.
- LINCK T. 1992. Cambio técnico y macroeconómico de la "modernización" de la agricultura campesina. Tiré à part, Univ. Toulouse le Mirail, 17 p.
- LINCK T. 1994. Agricultures et paysanneries d'Amérique Latine. ORSTOM Paris.

- LY B-T. 1993. Evolution d'un système agraire péri-urbain et étude des systèmes de production de la commune de Santa Catarina del Monte (Mexique). Rapport de stage CNEARC-ESAT. Montpellier. 65 p.
- MARQUEZ A., ZEBROWSKI C., NAVARRO H. 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 465-473.
- MARTINEZ M., OLESCHKO K., H. ARIAS. 1991. Estimación del estado óptimo del tepetate en el proceso de su recuperación. Resum. ampl. 1er Simp. Intern. Suelos Volcánicos Endurecidos. Montecillo, Mexico, pp. 56.
- MASSIEN-TRIGO Y. C. 1995. La modernización biotecnológica de la agricultura mexicana: otro sueño enterrado durante el sexenio salinista. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*. enero 11-12 diciembre, nueva época. pp. 121-134.
- MORALES-SALES E. S. 1989. Estado de México. Biblioteca de las entidades federativas. Sociedad Economía Política Cultura. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades. UNAM. 119 p.
- MIEHLICH, G. 1992. Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanascheböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de Mexico). Habilitation thesis. Hamburg. Deutschland. 417 p.
- MORALES-SALES E. S. 1989. Estado de México. Biblioteca de las entidades federativas. Sociedad Economía Política Cultura. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades. UNAM. 119 p.
- MULDERS M.A. 1987. Remote sensing in soil science. Development in soil science 15. ELSEVIER - Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo. 379 p.
- NAERT B. 1975. Utilisation de techniques de traitement photographique (équidensité, combinaisons chromatiques, maculographie) en télédétection des ressources terrestres. Applications à la cartographie pédologique et aux programmes d'aménagements ruraux. Séminaire de sensibilisation sur la télédétection des ressources terrestres. Tunis 29-30 octobre, Groupe de recherche sur la télédétection de Montpellier, S.E.S. N° 267, Ed. INRA, 19 p.
- NAVARRO G. H. 1992. Metodología para análisis de sistemas de producción en el manejo de tepetates. *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 451-459.
- NAVARRO, H., ZEBROWSKI C. 1992. Etude des sols volcaniques indurés (tepetates) des Bassins de Mexico et de Tlaxcala (Mexique). Leur production agricole. Informe final, anexo, Contrato CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- NAVARRO H., ZEBROWSKI C. 1993. La rehabilitation des sols volcaniques indurés et érodés en Equateur et au Mexique. XV Congreso mundial de ciencias del suelo, Acapulco, México, 12-16 de julio de 1994. vol 6a.
- NAVARRO H., PRAT C. 1996. Habilitación agrícola de los tepetates (suelos volcánicos endurecidos y estériles) de los valles de México y de Tlaxcala. In: P. Bovin (Ed.). El campo mexicano. CEMCA, Mexico, pp. 253-291.
- NIMLOS, T. M. 1987. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas. In: J.F. Ruiz F. (Ed.). Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, México, pp. 10-18.
- NIMLOS, T. 1990. The strength moisture relations and hydraulic conductivity of mexican tepetate. *Soil science*, vol. 150 (1), pp. 425-430.
- OROPEZA-MOTA J.L. 1995. Modelación del escurrimiento superficial en terrenos agrícolas con pendiente. *Terra*, vol. 13, n° 4, pp. 454-463.

- ORTIZ ESPEJEL B. 1993. La nueva agronomía. Una revisión biotecnológica. *Cuadernos agrarios*, n°7, enero-junio 1993, pp. 97-104.
- ORTIZ S., PAJARO H. C. A. D., ORDAZ C. V. M. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- OTERO G., SCOTT S. 1993. Reestructuración de la agricultura mexicana: Implicaciones sociales y ambientales. *Cuadernos agrarios*, n°7, enero-junio 1993, pp. 23-41.
- PALERM A., WOLF E. 1975. Agricultura y civilización en Mesoamérica. Ed. Gernika, 216 p.
- PEÑA, D., ZEBROWSKI C. 1992. Informe del mapa morfoedafológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada y anexos : 1. Mapas temáticos; 2. Description de perfiles. Informe final, anexos, contrato CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- POUGET M-J., CAVIEDES E., HAMELIN P., REMY D., MATHIEU R., LIRA V. y ALVAREZ D. 1996. Ambiente árido y desarrollo sustentable : la provincia de Limarí. Universidad de Chile. ORSTOM. 103 p.
- PRAT C. 1996. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Talixpán (Texcoco, México). Actas del 3 symp. intern. Suelos volc. endurecidos. Quito, Ecuador, déc. 1996. *En cours de publication*
- PRAT C. 1997. Horizons volcaniques indurés d'Amérique Latine. *Site Web ORSTOM Mexique en cours d'installation*.
- PRAT C., LY B-T., LEPIGEON I., FAUGERE G., ALEXANDRE J-L. 1996 (a). Los sistemas de producción agropecuarios con tepetates de 4 comunidades del altiplano mexicano. Actas del 3 symp. intern. Suelos volc. endurecidos. Quito, Ecuador, déc. 1996. *En cours de publication*.
- PRAT C., BÁEZ A., MÁRQUEZ A. 1996 (b). Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3, Texcoco, México. Actas del 3 symp. intern. Suelos volc. endurecidos. Quito, Ecuador, déc. 1996. *En cours de publication*.
- PRICE M.F., HEYWOOD D.I. 1994. Mountain environments and geographic information systems. Taylor & Francis Ltd. 309 p.
- QUANTIN P. 1992. Etude des sols volcaniques indurés *tepetates* des bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final Contrat ORSTOM-CEE. TS2 A212 C Bruxelles. 77 p.
- QUANTIN P., ZEBROWSKI C., DELAUNE M., HIDALGO C. 1992. El material original de los tepetates t2 y t3 de la region de Texcoco (Mexico): ¿Loess o cineritas? *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 178-182.
- QUINTANA R. D. 1995. El paradigma neoliberal rural y las reformas agrarias en México. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*, enero 11-12 diciembre, nueva época, pp. 13-26.
- RAMIREZ-RANCANO M. 1992. Tlaxcala. Biblioteca de las entidades federativas. Sociedad Economía Política Cultura. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades. UNAM. 148 p.
- ROBIN M. 1995. La Teledetection. fac. geographie. Nathan Université.Paris. 318 pg.
- ROUGERIE G., BEROUTCHACHVILI N. 1991. Géosystèmes et paysages. Bilan et méthodes. Armand Colin. 302 p.
- SALVADOR A. F.. 1993. Economía campesina y sustentabilidad. *Cuadernos agrarios*, n°7 enero-junio 1993, pp. 105-117.

- SALVADOR A. B. Dimensiones ecológicas del estado de Morelos. UNAM. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. Cuernavaca, Mor., 221 p.
- SANDERSON S. 1990. La transformación de la agricultura mexicana. Estructura internacional y política del cambio rural. Alianza Editorial Mexicana, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, DF.
- SANTANA R. 1990. La question alimentaire en Amérique Latine (Mexique, Vénézuéla, Equateur, Pérou). Ed. CNRS. Paris.
- SERVENAY A. 1995. Spatialisation de la cangahua en Equateur à partir de données SPOT : cas du bassin de quito. Rapport de Maîtrise. Université Paris VII. ORSTOM Montpellier. 47 p.
- SERVENAY A., PRAT C., SORANI V. y GONZALEZ E. 1996. Estudio espacial de los tepetates (suelos volcánicos endurecidos) del eje neovolcánico mexicano : metodología para un programa de investigación. In: Iforo sobre aplicaciones de los sistemas de información geográfica. Ponencias. Universidad autónoma del Estado de México, Facultad de geografía. pp 179-182.
- SMSS. 1975. Soil Taxonomy: a basic system of soil clasification for making and interpreting soil surveys. Soil survey staff, USA.
- SUAREZ-CARRERA V. 1995. Ni autosuficiencia alimentaria ni ventaja comparativas: los saldos del neoliberalismo en grano básicos y oleaginosa. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*, enero 11-12 diciembre, nueva época, pp. 59-66.
- TARRIO M., STEFFEN C., CONCHEIRO L. 1995. La modernización en crisis: análisis de la evolución de los principales productos agroalimentarios- Un balance de la política salinista para el campo. In: Neoliberalismo y campo. *Cuadernos agrarios*, enero 11-12 diciembre, nueva época, pp. 27-44.
- WERNER G., MIEHLICH G., LÜCKOFF A., MOLL W. 1988. Die böden des staates Tlaxcala im zentralen hochland von Mexiko. Untersuchungen über ihre entwicklung, verbreitung, erosion und nutzung unter dem einfluss 3000-jährigen ackerbaus. Editor Wilhelm Lauer. Stuttgart.
- WHITE S.E. 1962. Late Pleistocene glacial sequence for the West side if Iztaccihuatl, Mexico: Geol. Soc. Amer. Bull. 73: 935-958.
- WILLIAMS B. 1972. Tepetate in the valley of Mexico. *Annals of the Association of American Geographers*. vol. 62, n°4, pp. 618-626.
- WILLIAMS B. 1992. Tepetate in 16th century and contemporary folk terminology, valley of Mexico. . *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 483-493.
- ZEBROWSKI, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra*, vol. 10, n° especial, pp. 15-23.
- ZEBROWSKI, C. 1993. La réhabilitation des sols volcaniques indurés et érodés en Equateur et au Mexique.

ANNEXES

<i>Annexe 1 : Les sols volcaniques indurés sur le continent Américain</i>	<i>i</i>
<i>Annexe 2 : Description complète d'un profil de tepetates type (Peña y Zebrowski, 1992)</i>	<i>ii</i>
<i>Annexe 3: Complément sur les propriétés physiques et chimiques des tepetates</i>	<i>iv</i>
<i>Annexe 4: Quelques exemples de fonctionnement de communautés paysannes :</i>	<i>v</i>
<i>Annexe 5 : Spécificité des scènes Landsat 4 et 5 (Campbell, 1987)</i>	<i>vi</i>
<i>Annexe 6 : Caractéristiques des scènes mises à notre disposition</i>	<i>vi</i>
<i>Annexe 7: Espaces radiométriques des parcelles d'entraînement prises sur les trois zones d'étude préliminaires</i>	<i>vii</i>
<i>Annexe 8: Légende des unités cartographiées par Peña et Zebrowski (1992) sur la Sierra Nevada occidentale</i>	<i>viii</i>
<i>Annexe 9: Carte des zones érodées et carte des zones réhabilités sur la Sierra Nevada occidentale par Peña et Zebrowski (1992).</i>	<i>xi</i>
<i>Annexe 10: Unités de sols érodés cartographiés par Werner (1988) sur Tlaxcala.</i>	<i>xii</i>
<i>Annexe 11: Etapes pour la mise en place de la partie du SIG concernant le milieu physique :</i>	<i>xiii</i>
<i>Annexe 12: Données du recensement 1994 disponibles sur le CDROM CIMA (INEGI)</i>	<i>xiv</i>
<i>Annexe 13: Données du recensement 1994 retenues et introduites dans le SIG.</i>	<i>xvi</i>
<i>Annexe 14: Légende de la couverture géologique du SIG</i>	<i>xvii</i>
<i>Annexe 15: Légende de la couverture pédologique du SIG</i>	<i>xviii</i>
<i>Annexe 16: Légende du couvert forestier introduit dans le SIG</i>	<i>xix</i>
<i>Annexe 17: Légende des zones d'irrigation introduites dans le SIG</i>	<i>xx</i>
<i>Annexe 18: Légende de la couverture des précipitations en saison des pluies</i>	<i>xx</i>
<i>Annexe 19: Charge croissante en UGB pour chaque municipe à partir du nombre de bovins et d'ovins</i>	<i>xxi</i>

Sur le continent américain on rencontre des formations géo-pédologiques indurées comparables aux *tepetates*, en différents endroits. La répartition de ces formations suit les montagnes et reliefs d'origine volcanique. Ainsi, on les retrouve le long de la Cordillère des Andes, en Amérique centrale, et le long de l'Axe néo-volcanique trans-mexicain.

Ces formations portent différents noms suivant les régions et les pays : au Mexique elles sont appelées *tepetates*; *talpetates* au Nicaragua, *hardpans* au Salvador et au Honduras; *duripan* en Colombie et au Pérou; *cangahua* en Equateur; ou encore *moromoro*, *tosca* et *ñadis* au Chili (Peña y Zebrowski, 1992).



Les formations indurées d'origine volcanique en Amérique Latine (Prat, 1997)

Sous ces différentes dénominations on rencontre un problème commun posé par la présence de ces formations, biologiquement et chimiquement très peu fertiles : sans être nécessairement aussi dure que la roche, elles représentent une couche de matériau suffisamment massif pour être une contrainte pour l'agriculture, dans ces pays. L'affleurement de ces matériaux conduit à la formation d'un milieu érodé et extrêmement dégradé, qui ne cesse de s'étendre au détriment des champs et forêts.

Annexe 2 : Description complète d'un profile de tepetates type (Peña y Zebrowski, 1992)

DESCRIPCION DEL SITIO

No: P-1-P-30

FECHA: 31/1/90

DESCRITO POR: C. Zebrowski, D. Peña H. y J. N. Valencia B.

LOCALIZACION: Al SE del poblado San Miguel Tlaixpan, margen derecho del camino Sn. M. Tlaixpan Sta. Catarina del Monte. Carta Chalco 1/50,000: X=21.8 Y=55.8 Z=2555 msnm.

VEG. NAT. Y/O CULTIVO : Sin vegetación natural; con hierbas principalmente de la familia de compuestas distribuidas en forma de manchones que no rebasan los 30 cm de altura. Al sur, existen áreas reforestadas con pinos sobre terrazas protegidas con nopal y maguey. y al oeste con eucaliptos. En áreas vecinas y generalmente sobre terrazas se practica el cultivo de maíz, frijol y haba.

CLIMA : Templado subhúmedo con lluvias en verano. Precipitación total anual de 621 mm y Temperatura Media Anual de 14.7°C.

MAT. PARENTAL : Tobas y material coluvio aluvial.

FISIOGRAFIA : Pie de monte. Interfluvio con ladera transversal al pie de monte, con pendiente de 8-10 %, moderadamente cóncava, y orientada de Sur a Norte (S-N).

OTROS: Erosión muy fuerte. Aflora el tepetate (formación T3) erosionado con cárcavas de aproximadamente 1 m de profundidad y de abertura. Se observan materiales testigos (montículos de entre 4 y 5 m de altura) que muestran el nivel original del suelo que ha sido erosionado y bajo del cual se presenta la formación T2 (tepetate blanco) que a su vez sobreyace a la formación T3 (tepetate, amarillo).

DESCRIPCION DEL PERFIL

- Ap 0-25 cm; capa coluvio-aluvial con pequeñas grietas de 1-3 mm de abertura. Seco; pardo grisáceo (10 YR 5/2, seco) a gris muy oscuro (10 YR 3/1, húmedo); franco arcilloso, con arena fina; sin estructura, rompe en bloques subangulares, moderadamente desarrollados, principalmente de finos (5 mm) a medios (15 mm), pocos gruesos (40 mm); consistencia duro, friable a firme, muy pegajoso y ligeramente plástico; poros comunes, finos y medios; raíces comunes, muy finas y finas, pocas medias distribuidas en toda la capa; límite horizontal y abrupto.
- 2B 25-69 cm; capa con carácter vértico, negra, con fragmentos de ladrillo, grietas menores o iguales a 1 cm de abertura y con manchas blanquecinas (Carbonatos o destrucción de arcillas por hidrólisis?) concentradas en algunas partes de la capa. Seco; gris muy oscuro (10 YR 3/1, seco y húmedo); arcilloso, con pocos gránulos muy firmes, difíciles de disgregar; estructura en prismas fuertemente desarrollados, de finos (10 mm) a gruesos (40 mm); consistencia duro a muy duro, firme a muy firme, pegajoso y plástico; poros comunes, muy finos; raíces comunes, muy finas y finas distribuidas en toda la capa; con muchas gravas de 2-4 mm de diámetro y pedazos de guijarros laminares de 2-6 cm; límite ligeramente ondulado y claro.
- 3BC 69-87 cm; capa compacta masiva, más clara que la anterior. Seco; pardo amarillento claro (10 YR 6/4) mezclado con pardo (10 YR 5/3, seco) a pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2, húmedo) con manchas negras de manganeso en las caras de los pedos; arcilloso, con poco limo; sin estructura, rompe en bloques angulares y subangulares, moderadamente desarrollados, de finos (5 mm) a gruesos (30 mm); consistencia ligeramente duro, muy friable, pegajoso y plástico; poros muchos, finos y medios vesiculares y tubulares, sin raíces; límite difuso.
- 3BC2 87-124 cm; suelo más café, más estructurado, más friable. Ligeramente húmedo; aproximado a pardo oscuro (7.5 YR 3/2) mezclado con pardo amarillento claro (10 YR 6/4, seco) a gris muy oscuro (10 YR 3/1) mezclado con pardo (10 YR 5/3, húmedo); arcilloso, parecido al anterior; sin estructura, rompe en bloques subangulares y algunos prismas fuertemente desarrollados, principalmente finos (5-10 mm) y en menor grado gruesos (30 mm); consistencia duro, friable, pegajoso y plástico; poros muchos, finos y medios, vesiculares y tubulares, raíces pocas, muy finas; con muchas manchas negras de manganeso en las caras de los pedos y en forma de micelios orientados verticalmente; con revestimientos de manganeso y arcilla; con apariencia lustrosa; se vuelve más friable que las capas anteriores por la presencia de grietas de 1-2 mm de abertura; límite ondulado y claro.
- 4C 124-150 cm; tepetate macizo (T2) con círculos de material más suelto, de 15 cm de diámetro ((concreciones de cenizas alteradas?). Seco; pardo (10 YR 5/3) mezclado con pardo amarillento claro (10 YR 6/4, seco) a pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2), mezclado con pardo (10 YR 5/3, húmedo); arcilloso; parecido a 3 y 4; sin estructura, masivo que rompe en fragmentos en forma de cáscara y algunos bloques angulares, fuertemente desarrollados, de finos (5 mm) a gruesos (30 mm); consistencia duro a muy duro, firme con algunos gránulos muy firmes; pegajoso y plástico; poros comunes, vesiculares y tubulares, finos y medios sin raíces; con revestimientos de arcilla en los poros y caras de los pedos; con minerales de cuarzo; los fragmentos recién desprendidos muestran un color amarillo miel; límite ligeramente ondulado y abrupto.

- 58 150-200 cm; arcilla gris que se disgrega fácilmente. Seco; pardo grisáceo (10 YR 5/2, seco) a gris (10 YR 5/1, húmedo); arcilloso; con un poco de limo; estructura en bloques angulares, moderadamente desarrollados, de finos (5 mm) a gruesos (30 mm), con algunas prismas gruesos; consistencia ligeramente duro, friable, pegajoso y plástico; poros pocos, muy finos vesiculares; pocas raíces, muy finas concentradas en algunas partes de la capa; con revestimientos de arcilla que dan una apariencia cerosa al agregado; con filamentos blanquecinos (CaCO_3 ?) en las caras de los pedis; límite ligeramente ondulado y claro.
- 6C 200-220 cm; tepetate (T2) con concreciones redondeadas de carbonatos de calcio de 2 a 4 cm de diámetro. Seco; gris claro (2.5 YR 7/2, seco) a pardo grisáceo oscuro (2.5 YR 4/2, húmedo); franco arcilloso; sin estructura, masivo que rompe en bloques subangulares, moderadamente desarrollados, de finos (5 mm) a gruesos (30 mm); consistencia duro, firme, ligeramente pegajoso y plástico; poros pocos, vesiculares, muy finos; sin raíces; con revestimientos de arcilla; con filamentos blanquecinos (CaCO_3 ?) en las caras de los pedis; límite ligeramente ondulado y claro.
- 7CB 220-235 cm; capa compacta rojiza (T2 ó T3?), un poco más que la anterior. Seco; pardo amarillento claro (10 YR 6/4, seco) a pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4, húmedo); con revestimientos negros de manganeso; franco arcilloso, con arena fina y gránulos difíciles de romper; sin estructura, masivo que rompe en bloques angulares y subangulares, fuertemente desarrollados; consistencia duro a muy duro, firme, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; poros pocos, finos vesiculares; con revestimientos de arcilla y manganeso; límite gradual.
- 88t 235-260 cm; suelo rojizo con abundantes manchas negras de manganeso. Ligeramente húmedo; pardo amarillento claro (10 YR 6/4, seco) a pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4, húmedo) con revestimientos de arcilla pardo oscuro (7.5 YR 4/4, húmedo); arcilloso, con gránulos muy firmes difíciles de romper al igual que en 7CB; sin estructura, masivo que rompe en bloques angulares y subangulares, fuertemente desarrollados, de finos (5 mm) a medios (15 mm); consistencia duro a muy duros, firme, pegajoso y plástico; poros muchos finos y medios tubulares y vesiculares; con abundantes revestimientos de manganeso y pocos de arcilla dentro de los poros; más friable que la capa 7CB por la presencia de grietas de 1-2 mm de abertura que facilitan la disgregación; límite gradual.
- 98t2 260-420 cm; suelo amarillo con manchas de manganeso (menos que la anterior). Pardo amarillento claro (10YR6/4, seco) a cercano al amarillo (10YR7/6, húmedo), con revestimientos pardo oscuro (7.5YR4/4, húmedo) dominantes sobre la matriz; arcilloso, con un poco de limo igual que 58; sin estructura, rompe en bloques subangulares y angulares, de moderados a fuertemente desarrollados, de finos (5 mm) a gruesos (30 mm); consistencia muy duro, firme, ligeramente pegajoso y plástico; poros comunes, finos y medios, vesiculares y tubulares; sin raíces; con revestimientos de manganeso (pero menos que la capa 88t) y de arcilla en los poros; con manchas negras (menos que en 88t) de manganeso en las caras de los pedis; con manchas blanquecinas (parecidas a CaCO_3) dispuestas en forma de filamentos y concentradas principalmente en la parte superior; límite horizontal y claro.
- 98t3 420-460 cm; suelo amarillo más macizo. Ligeramente húmedo; pardo amarillento claro (10YR6/4, seco) a pardo amarillento (10YR5/6, húmedo) con revestimientos pardo oscuro (7.5YR4/4, húmedo); arcilloso, con gránulos muy firmes difíciles de romper sin estructura, rompe en fragmentos angulares, de moderados a fuertemente desarrollados; poros comunes, finos y medios (4 mm), vesiculares y tubulares, con revestimientos de arcilla y muy pocos de manganeso.

Compacts et durs, les *tepetates* ont une densité apparente de 1,45 gcm⁻³. Le *tepetate* pétrocalcique qui se caractérise par:

- des encroûtements calcaires
- une teneur en argile inférieure à 15%,
- la présence d'une porosité totale de 25 à 30%
- une réserve en eau faible (inférieures à 20-30%).

Le *tepetate* fragipan est moins calcaire et plus argileux :

- porosité totale supérieure à 40% (microporosité supérieure à 30%)
- une réserve d'eau utile pour la plante d'au moins 10% en volume.

La dureté augmente avec la présence de calcaire, elle est maximale à l'état sec (Miehlich, 1992) : les valeurs de résistance à la pénétration sont élevées sur *tepetate* pétrocalcique, de l'ordre de 200 kgcm⁻² (Nimlos, 1990, et Peña y Zebrowski, 1992). Elles baissent à moins de 20 kgcm⁻² sur *tepetate* fragipan. Il résulte de ces propriétés que la conductivité hydraulique est lente : de 2 à 10 mmh⁻¹ sur *tepetate* calcaire et de 0 à 0,5 mmh⁻¹ sur *tepetate* fragipan.

La stabilité structurale des fragments grossiers est bonne (supérieure à 2 mm). L'agrégat optimum a un diamètre de 3,4 à 2,4 mm. Pour cette classe, 98% des agrégats sont stables, la vitesse d'infiltration est maximum et sans effet de colmatage, la capacité de rétention en eau est élevée (29% en poids et 39% en volume) et comparable à un sol argilo-limoneux. Les fragments fins (inférieurs à 2 mm) sont par contre très instables. La rapidité de dispersion dépend du taux de matière organique.

Du point de vue chimique, on distingue essentiellement les *tepetates* calcaires et non calcaires. Les *tepetates* non calcaires ont des taux de CaCO₃ inférieurs à 2,5%, alors que les *tepetates* calcaires varient entre 4,6 et 14,2%.

La capacité d'échange cationique des *tepetates* est de 15 à 25 méq/100g. Les teneurs en bases échangeables sont importantes sur :

- le calcium (7 à 18 méq/100g),
- le magnésium (6 à 10 méq/100g)
- le potassium (0,8 à 1,2 méq/100g), (Quantin, 1992).

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

Le pH varie de modéré à fortement alcalin, plus élevé dans les *tepetates* fortement calcaires (taux supérieur à 5%). La saturation des bases est évidemment plus élevée pour les *tepetates* calcaires.

Les sols indurés sont fortement carencés en matière organique (taux inférieur à 0,3%), en azote (moins de 0,04 ‰) et en phosphore total et assimilable (inférieur à 3 ppm), (Etchevers *et al.* 1992 a et b).

Annexe 4: Quelques exemples de fonctionnement de communautés paysannes :

Dans la région de Tlaxcala (Lepigeon, 1994), les premières sédentarisation eurent lieu vers 1600 avant JC. C'est dès cette époque que les premières terrasses furent construites, tout d'abord pour y installer l'habitat, puis les premières cultures sous forme de jardins familiaux. Les plantes cultivées étaient typiquement méso-américaines, comme le maïs et le haricot, mais également la fève, la courgette, le piment, la tomate, l'avocat, ...

L'apogée des tlaxcaltécas se situe entre -300 et +100. L'agriculture est développée : des terrasses; des canaux d'irrigation, des barrages et des digues ont été installés. Le système agraire alors en place était basé sur l'usage intensif du sol et de la main d'oeuvre. Il existait trois systèmes de culture :

- un système de cultures pluviales dominant sur les semi-terrasses et les terrasses de versants,*
- un système de cultures sur humidité résiduelle ou de contre saison était installé dans les zones de bas fond près des lacs; des couches alternées de plantes aquatiques et de boues, immergées par un mécanisme de canaux ou parce que placées en bord de lac, permettaient de conserver une humidité permanente et d'obtenir deux récoltes ou plus par an,*
- un système de cultures irriguées par inondation, à bras ou à partir de galeries filtrantes fut développé près des points d'eau et rivières permanentes ou temporaires.*

Les modes de tenure de la terre étaient de trois types : usufruit individuel, propriété publique et propriété collective; la propriété privée n'existait pas.

Dans l'empire Purépecha (Alexandre, 1996) que l'on trouvait dans l'actuel état du Michoacan, la tenure de la terre et son exploitation furent les bases du développement économique et social. Son économie se fondait sur l'agriculture, le contrôle de la terre étant dévolu à une élite politique et religieuse. Il existait deux formes de tenures foncières : les propriétés publiques au pouvoir des groupes dominants, et les terres communales. Ces dernières étaient exploitées en usufruit par les paysans, en échange d'un tribut versé au chef religieux de l'empire, qui avait tout pouvoir de décision sur les cultures à semer et de l'usage qui serait fait de la production. Ces formes de tenure et de contrôle de la terre au sein de la société Purépecha constituaient les bases d'une stratification sociale, et d'une profonde division du travail agricole.

Le système de culture pratiqué par les Purépéchas sur les piémonts des montagnes était fondé sur l'abattis-brûlis, mais sur les rives des fleuves et des lacs ils développèrent également l'irrigation à petite échelle.

Dans la partie orientale de la vallée de Mexico (Ly, 1993), les peuples installés étaient les Chichimèques et les Toltèques. Ces derniers, guerriers et paysans, obligèrent les Chichimèques à abandonner leur système de chasseur-cueilleur-pêcheur pour celui de l'agriculteur. Ce changement est dû à la pression de l'accroissement démographique de la vallée où se sont établis les paysans-guerriers. Toutes ces zones en bordure de l'ancien lac de Texcoco dédiées à l'agriculture étant saturées, ils furent donc obligés de coloniser de nouvelles terres de culture, notamment celles des montagnes. Le système d'abattis-brûlis se développe sous la domination des Toltèques. Puis, la pression démographique s'accroissant, la durée de la friche forestière s'est amenuisée et des systèmes de jachères et d'irrigation se mirent en place. L'apogée du système hydraulique de terrasse correspond au règne de Netzahualcoyotl.

Le système agraire préhispanique est intimement lié à l'organisation sociale dont l'unité de base est le "capulli". Ce terme nahuatl désigne un groupe de personnes ou une famille vivant dans un même quartier et dont la tenure des terres est régie selon un système particulier. Chaque division du "capulli" appartient à une même lignée familiale, elle n'est donc pas une propriété individuelle en tant que telle. Le chef de famille qui possède ces terres peut les travailler pendant toute sa vie et les laisser à ses enfants ou héritiers, mais il lui est interdit de les céder à des personnes extérieures à la famille. Dans le cas où toute une lignée s'est éteinte, les terres reviennent au "capulli" qui les redistribue entre ses habitants. Chaque "capulli, que l'on peut assimiler aux terres labourables ou non entourant le village, administre sa propre section à travers un conseil des anciens. Si le "capulli" n'a pas le droit de prendre la terre à celui qui la travaille, il peut par contre la reprendre à celui qui l'a abandonnée. Dans le cadre de travaux d'utilité collective, les terres peuvent être reprises à tout moment par le "capulli" en échange d'autre terrain. Il est également possible pour un paysan d'échanger ses terres contre un autre terrain de meilleure qualité, à condition que celui-ci soit libre et que les terres qu'il laisse ne soient pas incultivables. Quant aux terres non labourables ou forestières, leur accès est libre, par contre leur exploitation est soumise à l'avis du conseil.

Chez les Tarasques du Michoacan (Linck, 1988), le système agraire traditionnel était basé sur la culture du maïs et l'élevage du bétail, de plus elles exploitaient, tout en les entretenant, les ressources forestières. Leur système de production était relativement stable, avec une pression sur la forêt suffisamment faible pour ne pas compromettre sa capacité de reproduction. L'élevage du bétail avait un rôle secondaire et complémentaire pour l'alimentation. La culture du maïs était l'activité dominante au sein du système de production agricole. Ils fonctionnaient sur un assolement bisannuel, les bovins étant élevés sur les jachères, s'alimentant avec les cannes et les feuilles de maïs.

Annexe 5 : Spécificité des scènes Landsat 4 et 5 (Campbell, 1987)

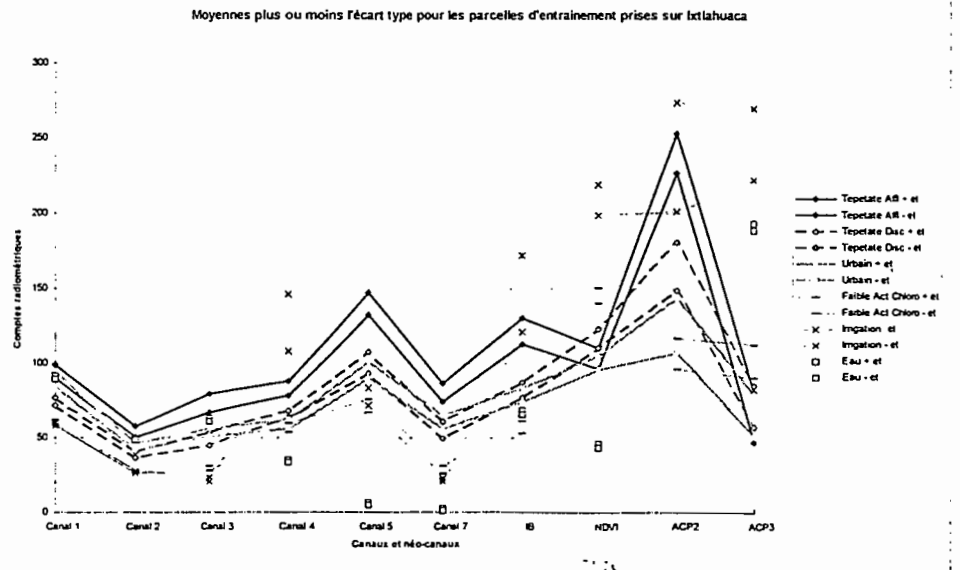
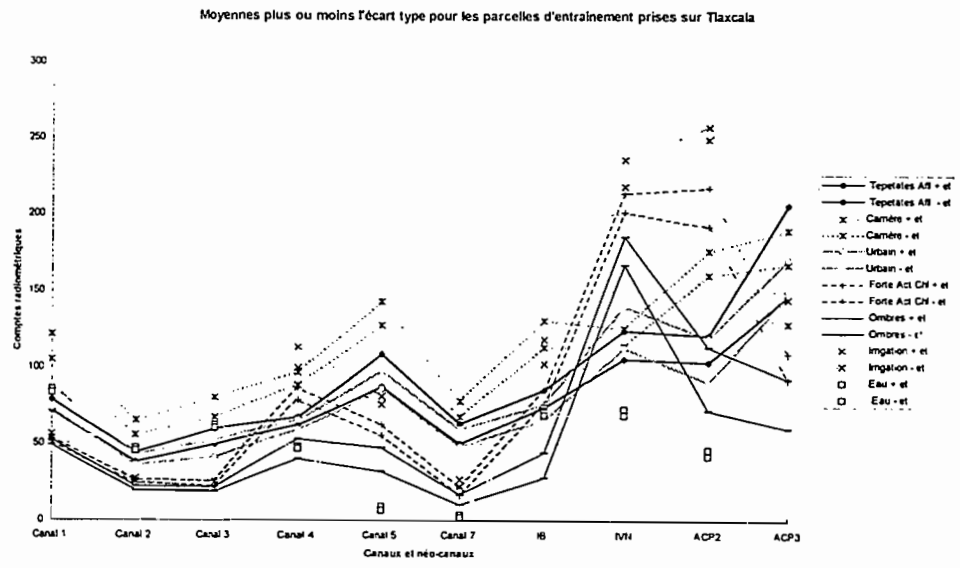
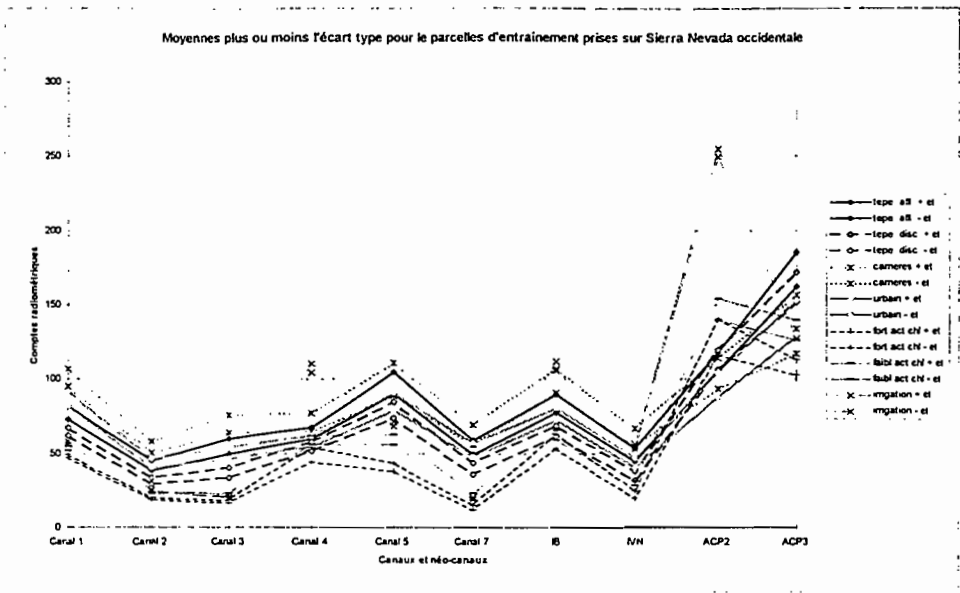
Les images Landsat TM ont une résolution au sol 30 mètres. Elles comportent sept bandes spectrales de longueurs d'ondes différentes :

Numéro de bande spectrale	Longueurs d'ondes enregistrées	Correspondance dans le spectre	Spécificité et utilisation préconisée
1	0.45-0.52 μm	Visible : bleu et vert	Séparation du sol et de la végétation.
2	0.52-0.60 μm	Visible : vert	Réflexion de la végétation.
3	0.63-0.69 μm	Visible : rouge	Absorption chlorophyllienne.
4	0.76-0.90 μm	Proche infra-rouge	délimitation des plans d'eau.
5	1.55-1.75 μm	Moyen infra-rouge	Humidité de la végétation
7	2.08-2.35 μm	Infra-rouge 2	Stress hydrique des plantes.
6	10.4-12.5 μm	Infrarouge lointain	Thermique.

Annexe 6 : Caractéristiques des scènes mises à notre disposition

Références en Past Road	Date d'enregistrement	Satellite
Début de saison des pluies :		
25-47	20 avril 1990	Landsat 4
2746	9 mai 1992	Landsat 4
27-47	25 mars 1990	Landsat 5
28-46	30 avril 1992	Landsat 4
28-47	30 avril 1992	Landsat 4
Fin de saison des pluies :		
26-46	15 octobre 1991	Landsat 5
26-47	15 octobre 1991	Landsat 5

Annexe 7: Espaces radiométriques des parcelles d'entraînement prises sur les trois zones d'étude préliminaires



Annexe 8: Légende des unités cartographiées par Peña et Zebrowski (1992) sur la Sierra Nevada occidentale

VI LAS UNIDADES DE MAPEO

A Descripción de las unidades

Son unidades morfopedológicas definidas según los grandes conjuntos fisiográficos reconocidos en la fotointerpretación: sierra, aparatos volcánicos aislados, piedemonte y glacis, barrancas, valles y planicie aluvial; pero también de acuerdo con otros criterios, tales como la naturaleza de los materiales originales y las características de los suelos.

A continuación se presentan las diferentes unidades con sus principales características. En cada una de ellas se mencionan los tipos de suelos haciendo referencia, por medio de su clave, a los que se describieron en el capítulo precedente.

1 - La Sierra

Se divide en sierra alta (entre 3400 y 4100 msnm) y sierra baja (entre 2800 y 3400 msnm).

11. La sierra alta (unidades 1 a 6)

A una altitud superior a 3400 msnm, la sierra fue cubierta por los glaciares de la última glaciación de la cual presenta ciertos rasgos tales como las cañadas glaciares.

Presenta un clima semifrío subhúmedo con precipitación media anual entre 1100 y 1200 mm y temperatura media anual de 5° C. El régimen de humedad del suelo es údico y el régimen de temperatura es isomésico, pero se acerca a isocríico en la parte más alta de la sierra.

La vegetación consiste principalmente en bosques de pinos y oyameles. El sotobosque, de gramíneas, se utiliza para la cría extensiva de ganado bovino. Los substratos de dacitas y riolitas se encuentran cubiertos en su mayoría por cenizas volcánicas recientes, postglaciares, a partir de las cuales se han desarrollado Andosoles oscuros.

Unidad 1: Corresponde a las cimas del Tláloc y del Telapón en las cuales las cenizas han sido erosionadas, dejando aflorar las rocas volcánicas duras del substrato. Los suelos (S1) son, naturalmente, delgados.
Superficie: 586 ha

Unidad 2: Incluye los relieves con pendientes inferiores al 40%. Los Andosoles (S2) son poco profundos, excepto en las zonas cóncavas, coluvionadas.
Superficie: 6428 ha

Unidad 3: Corresponde a las zonas fuertemente disectadas con pendientes superiores al 40%. Los suelos, truncados por la erosión y generalmente coluvionados, son principalmente Andosoles oscuros (S2) con profundidad variable. Los afloramientos rocosos y los Leptosols (S1) son frecuentes.
Superficie: 2722 ha

Unidad 4: Son zonas cóncavas con relieve ligeramente ondulado y pendientes inferiores al 25%, que corresponden al fondo de las antiguas cañadas glaciares. Los Andosoles son negros (S2) medianamente profundos.
Superficie: 231 ha

Unidad 5: Fondo de cañada glaciar con relieve plano o muy ligeramente ondulado (pendientes inferiores al 12%). La vegetación es esencialmente herbácea y se utiliza para zonas de pastizales. Los Andosoles, profundos, son muy húmedos y muy negros (S3).
Superficie: 64 ha

Unidad 6: Corresponde a extensas zonas coluvionadas y cubiertas por las cenizas recientes. Las pendientes varían de 5 a 25%. Los Andosoles son profundos (S2).
Superficie: 158 ha

12. La sierra baja

Ubicada entre 2800 y 3400 msnm, no fue cubierta por los glaciares de la última glaciación, de tal manera que las cenizas recientes cubren cenizas más antiguas, anteglaciares.

El clima, menos frío que en la sierra alta, presenta precipitaciones medias anuales que varían de 1000 a 1100 mm y una temperatura media anual cercana a los 10°C. El régimen de humedad del suelo es údico y el régimen de temperatura es isomésico.

La vegetación consiste en pinos, encinos y oyameles, los cuales pueden formar bosques de una sola especie o mixtos. En la parte más baja también es frecuente encontrar el Madroño.

Los cultivos de maíz, pero sobre todo de haba, cebada y avena se practican en las partes bajas de esta unidad.

En función de la naturaleza del substrato, se han separado a las unidades con substrato antiguo (lavas y brechas volcánicas) de aquellas con substrato reciente.

121. Formaciones antiguas

Se dividen en lavas (andesitas, dacitas, riolitas) y brechas volcánicas (riodacitas).

Substrato de lavas: constituye la mayor parte de la sierra baja.

Unidad 7: Consiste de zonas onduladas cuyas pendientes, predominantemente entre 5 y 25 %, pueden alcanzar hasta el 50%.

Los Andosoles desarrollados a partir de las cenizas recientes son oscuros a más de 3200 msnm (S2) y cafés (S5), por debajo de esta altitud. En la parte más baja de la sierra, los suelos tienden a perder sus características ándicas, son Luvisoles y Cambisoles (S13).

Superficie: 8020 ha

Unidad 8: Es una área casi plana ubicada al norte de la sierra, unos km al SE de Guadalupe Amanalco, entre 3000 y 3120 msnm. Corresponde a una zona cubierta por flujos piroclásticos riolíticos antiguos y de considerable espesor, los cuales, a su vez, están cubiertos por cenizas recientes. A partir de estas últimas se han desarrollado Andosoles de color café (S5).
Superficie: 194 ha

Unidad 9: Representa a las zonas disectadas con pendientes fuertes (>50%). Los suelos son Andosoles oscuros (S2) en la parte alta y cafés (S5) en la parte baja. Los afloramientos rocosos y los Leptosoles (S1) son frecuentes.
Superficie: 4458 ha

Substrato de brecha

Esta formación, localizada en el extremo norte de la Sierra Nevada, entre 2750 y 3100 msnm, presenta un relieve típico. De dirección general sur-norte, los flujos piroclásticos fueron disectados por barrancas orientadas de suroeste a noreste (probablemente después de un sistema de fallas orientadas en la misma dirección), de tal manera que se originó un relieve de interfluvios. La cima de éstos presentan una pendiente longitudinal relativamente suave (10%), pero los flancos de las lenguas, delimitadas por las barrancas, ofrecen un aspecto asimétrico, es decir; mientras que las pendientes orientadas al oeste son fuertes (>50%), las que están orientadas al este son más suaves (10 a 25%). Las diferentes unidades morfopedológicas dependen de esta disección así como de la altitud, misma que determina la presencia o la ausencia de suelos con características ándicas.

Unidad 10: Zona ondulada con pendientes inferiores a 20% localizada a altitud superior a 2850 msnm, con Andosoles cafés (S5).
Superficie: 102 ha

Unidad 11: Zona ondulada (pendientes < 20%), localizada a una altitud inferior a 2850 msnm, con Luvisoles (S13).
Superficie: 20 ha

Unidad 12: Zona disectada (pendientes >50%), localizada a una altitud superior a 2850 msnm. Andosoles (S5), suelos coluvionados y afloramientos rocosos con Leptosoles (S1).
Superficie: 1040 ha

Unidad 13: Zona disectada (pendientes >50%), localizada a una altitud inferior a 2850 msnm. Suelos coluvionados sin reacción al NaF: Luvisoles (S13), Leptosoles (S1) y afloramientos rocosos.
Superficie: 93 ha

122. Formaciones recientes.

Corresponden a la colada dacítica de Río Frío, localizada entre 2650 y 3400 msnm, la cual está cubierta por cenizas recientes del Popocatepetl. En su parte alta, a más de 3200 msnm, los suelos son Andosoles negros, los cuales pierden sus características ándicas en las partes bajas y relativamente secas con régimen ústico. Las diferentes unidades fueron establecidas según la morfología y la topografía de esta colada.

Unidad 14: Corresponde al cono volcánico con pendientes fuertes (>25%). Los Andosoles (S2) son de poco espesor debido a la erosión. Los afloramientos rocosos son abundantes.
Superficie: 96 ha

Unidad 15: Está representada por la parte ondulada de la colada con pendientes de 10 a 25%. Los suelos son Andosoles negros (S2) poco profundos y los afloramientos rocosos frecuentes.
Superficie: 3694 ha

Unidad 16: Esta unidad está constituida por zonas mucho más planas (pendientes <12%). Los Andosoles oscuros (S2) son más profundos y los afloramientos rocosos prácticamente inexistentes.
Superficie: 604 ha

Unidad 17: Son zonas casi planas (pendientes <12%), ubicadas en zonas secas, cultivadas (maíz y trigo). Los suelos, que presentan una ligera reacción al NaF, son Andi-Euric Cambisols (S6).
Superficie: 382 ha

Unidad 18: Corresponde a los frentes de colada de lava, con pendientes fuertes (>50%) y rocas aflorantes. Los suelos son Leptosoles (S1).
Superficie: 122 ha

2 - Aparatos volcánicos aislados.

Los aparatos volcánicos aislados están constituidos por aquellas estructuras volcánicas, particularmente volcanes y frentes de lava, que morfológicamente se encuentran separados de la Sierra.

El clima es principalmente templado subhúmedo, con precipitaciones medias anuales que varían de 600-700 mm. Sin embargo hacia el noroeste del área pueden presentar un clima templado semiseco, cuyas precipitaciones son menores a las citadas. El régimen de humedad del suelo es ústico y el de temperatura principalmente isotérmico, aunque en el sur del área es probable que los suelos de algunos volcanes presenten un régimen de temperatura isomésico.

Se han considerado los aparatos antiguos así como los recientes.

21. Aparatos antiguos.

Se presentan tanto en el norte como en el sur, pero se concentran principalmente en el centro y norte del área de estudio. Están repartidos según dos líneas de fracturas: una orientada de suroeste a noreste (de Ayotla a Ciudad Sahagún) y otra de este a oeste, a la altura de Xometla. (Figura 4).

Sus rocas y sus formas son muy variables. Las primeras están representadas por andesitas, riolitas y basaltos, las cuales pueden ser coherentes y/o escoriáceas.

En cuanto a las formas se pueden observar lo mismo, conos volcánicos aislados que formando pequeñas sierras (como la sierra del Patlachico que se ubica entre Teotihuacán y Texcoco). Asimismo se presentan, tanto conos bien definidos como destruidos en diferentes grados por la erosión.

Los frentes de lava presentan, normalmente, formas alargadas. Sus pendientes generalmente pronunciadas y convexas, permiten reconocer con frecuencia la colada de lava de la cual forman parte y cuya cima se encuentra cubierta por depósitos más recientes. Entre estos últimos se incluyen: materiales edólicos (colada "mesa larga"), tobas T2/T3 (colada ubicada unos km hacia el sur de San Pedro Chiantzingo, sobre la cual pasa el oleoducto) y/o materiales endurecidos, correspondientes a los T1 (coladas del norte, cercanas a Oxtotipac). En los dos últimos casos es común ver a las tobas cubiertas, además, por coluviones.

Unidad 19. Volcanes. Las pendientes de éstos varían generalmente de 25-50%, pero en ocasiones tienen pendientes menores (12-25%). Están generalmente cubiertos por una vegetación herbácea y/o arbustiva, la cual se distribuye irregularmente. Se encuentran cultivos en la parte alta y más plana de algunos de ellos.

Los suelos son de poco espesor. Se trata de Leptosoles (S1) con contacto lítico en los volcanes de roca maciza y con contacto paralítico en los volcanes de tezontle. Superficie: 7023 ha

Unidad 20. Corresponde a los frentes de colada de lava. Consisten de rocas duras, las cuales marcan generalmente un desnivel en los paisajes de los piedemontes. Dicho desnivel hace relativamente fácil el reconocimiento de éstas en el campo. Los suelos, escasos, son Leptosoles (S1). Superficie: 2120 ha

22. Aparatos recientes.

Están representados por la parte occidental de la colada de lava basáltica reciente ("mal país"), ubicada en el noreste de la zona, entre San Marcos y Emiliano Zapata.

Las precipitaciones medias anuales se sitúan entre 600 y 700 mm. El régimen de humedad del suelo es ústico; el régimen de temperatura es isotérmico. La vegetación corresponde a un bosque semi seco.

Esta colada (<13,000 años) ha sido cubierta por materiales volcánicos, retransportados por el viento (formación T1), cuyo espesor depende de la morfología. En las partes convexas son de poco espesor mientras que en las partes planas y cóncavas se acumularon los materiales tanto por la acción del viento como del agua. Como resultado, tenemos las dos unidades siguientes:

Unidad 21: Zona ondulada con pendientes entre 5 y 12%. Suelos friables de poco espesor: Cambisoles (S7) con numerosos afloramientos rocosos y Leptosoles (S1). Superficie: 750 ha

Unidad 22: Zonas planas (pendientes <5%), frecuentemente cultivadas. Suelos friables, profundos: Cambisoles (S7), sin o con pocas rocas aflorantes. Superficie: 74.96 ha

3 - Piedemonte y glacia.

Están localizados entre 2250 y 2800 msnm: al pie de la Sierra Nevada y de los volcanes aislados.

Presentan un clima templado subhúmedo, cuyas precipitaciones medias anuales cubren un rango bastante amplio, entre 600 y 1000 mm.

El régimen de humedad es ústico, pero de transición ústico-ústico en las partes más altas y más húmedas. El régimen de temperatura es isomésico arriba de 2600 msnm, e isotérmico a altitudes inferiores.

Corresponden a zonas cultivadas: maíz y cereales de granos pequeños en las zonas más húmedas, y cultivos de nopal en las áreas secas del norte.

Se diferenciaron, mediante fotointerpretación, las zonas no erosionadas de las zonas erosionadas con tepetate aflorante.

31. Zonas no erosionadas

De acuerdo con la naturaleza del material parental, es posible distinguir las formaciones con:

- depósitos piroclásticos preholocénicos (T2, T3, T1)
- depósitos coluvio-édicos, holocénicos.
- depósitos retransportados por el viento (T1).

311. Formaciones con depósitos piroclásticos preholocénicos
Estas formaciones agrupan a las tres unidades siguientes:

Unidad 23: Las áreas más representativas de esta unidad se localizan en zonas relativamente secas, entre Sta. Ma. Tecuanulco y Coatlinchán, estando comprendidas entre 2500 y 2600 msnm. Sin embargo, también se presentan hacia el norte (hasta Buenavista) y en el sur (al sureste de San Francisco Acuatla) En este último caso se presenta a altitudes inferiores a los 2400 msnm.

Presenta pendientes relativamente suaves (entre 5 y 12% principalmente) y suelos Mollisols (S11), con tepetate (T2/T3) medianamente profundo (< 1m). El tepetate de esta unidad corresponde a un fragipan y está representado por los depósitos de la serie T2, los cuales están superpuestos a los de la serie T3. Los depósitos de la serie T2 se caracterizan por la presencia de características vérticas y de concreciones de carbonato de calcio.

Superficie: 3863 ha

Unidad 24: Se presenta en las zonas altas del Piedemonte. En el sur se ubican entre 2500 y 2850 msnm y en el norte (en las zonas menos secas), arriba de 2700 msnm.

Presentan pendientes inferiores al 25%. Los suelos, Luvisols (S12), son arcillosos y con tepetate medianamente profundo. Los materiales originales pertenecen a la serie T2, la cual cubre a la serie T3. Estos materiales constituyen el tepetate (fragipan) que se localiza a mediana profundidad (<1 m) y, a diferencia de los que se presentan en la unidad 23, se caracterizan (sobre todo los depósitos de la serie T2), por la presencia de abundantes revestimientos negros de óxidos de manganeso.

Superficie: 2324 ha

Unidad 25: Frecuente en la zona alta y húmeda de los piedemontes, se encuentra también en algunas zonas más bajas del sur de la zona estudiada. Los suelos son Luvisols (S13) más friables y más rojizos que los correspondientes a la unidad 24. La coloración de estos suelos permite suponer que los materiales originales pertenecen a la serie T3. Sin embargo, la falta aparente de la T2 sugiere considerarlos como indefinidos (Ti).

Superficie: 5781 ha

312. Formaciones coluviales sobre Ti

Unidad 26: Representa áreas con pendientes muy suaves (<5%), la mayoría de las cuales corresponden a glacia. Se localizan principalmente en el norte (Belem, Otumba) y en el centro entre Tepetlaoxtoc y San Vicente Chicoloapan. Los suelos franco-arcillosos, de poco espesor, con epipedón mólico, sobre ti (duripan) rico en CaCO₃, son Calcaric Phaeozems (S16). Superficie: 10372 ha

Unidad 27: Son áreas con pendientes suaves (<10%) de la zona baja y seca. Se encuentran principalmente al norte del Cerro Patlachico y en el abanico de Coatepec. Los suelos, de arcillosos a arcilloso-pedregosos, son Cambisols o Phaeozems (S15). Superficie: 3489 ha

Unidad 28: Se localiza en una región relativamente húmeda a 2800 msnm. Corresponde a zonas coluvionadas entre los volcanes aislados, alrededor de San Telmo.

Los suelos, arcillosos y profundos, son Vertisoles (S14). Superficie: 467 ha

313. Formaciones retransportadas por el viento

Corresponden a la serie T1 y comprenden dos unidades.

Unidad 29: Se encontró en cuatro sitios con suficiente extensión para ser mapeada como unidad pura. Estos sitios se localizan en la vertiente oriental y septentrional de la "Mesa larga", en la vertiente oriental del volcán Cuatlapanca (al oeste de Coatepec), al sur de San Miguel Coatlinchán y al oeste de San Marcos; sobre pendientes orientadas al norte. Los depósitos de la serie T1 también se encuentran en otras pendientes orientadas hacia el norte, pero las áreas son demasiado pequeñas para ser representadas en el mapa. Los suelos, franco-arcillosos y friables, son Cambisoles (S8). Superficie: 917 ha

Unidad 30: Representa a la cima de la "Mesa larga". Los suelos, desarrollados a partir del mismo material edólico que los de la unidad 29, son igualmente Cambisoles friables, pero menos profundos (S9). Superficie: 173 ha

32. Zonas erosionadas

Estas unidades corresponden a zonas en las cuales el suelo sobreyacente al tepetate ha sido erosionado, dejando aflorar el tepetate. En función de la superficie de dichas zonas, éstas están representadas en el mapa en unidades puras cuando se refiere a una erosión total, o en unidades complejas cuando se presentan diferentes grados de erosión. Están subdivididas en "zonas con erosión severa", cuando las áreas erosionadas predominan en relación con las áreas no erosionadas (con suelo), y en "zonas con erosión parcial" cuando las áreas no erosionadas predominan en relación con las áreas erosionadas.

321. Zonas con erosión total

De acuerdo con el tipo de material original y la presencia o la ausencia de CaCO_3 , se subdividen en tres unidades.

Unidad 31: Corresponde a materiales de la serie Ti con CaCO_3 (S23, duripan). Se encuentra principalmente en los glacis del norte de la zona, desde Oxtotipac hasta Tepetlaoxtoc, es decir en la región más seca con precipitaciones de 600 mm. Superficie: 1516 ha

Unidad 32: Corresponde a materiales de la serie T3 con CaCO_3 (S19 y S 20, duripan). Se encuentra en las partes bajas y secas de los piedemontes, es decir a lo largo de una franja estrecha, entre 2300 y 2600 msnm, que se prolonga desde San Martín Cuautlapan hasta Buenavista. Superficie: 1042 ha

Unidad 33: Son los tepetates t3 sin CaCO_3 (S18, fragipan). Están localizados en una franja ubicada, en el piedemonte, al este de la unidad 32, es decir a una altitud mayor que 2600 msnm, en una zona más húmeda. Superficie: 1750 ha

322. Zonas con erosión severa

Unidad 34: Asociación de las unidades 31 y 26 Superficie: 1267 ha

Unidad 35: Asociación de las unidades 32 y 23 Superficie: 541 ha

Unidad 36: Asociación de las unidades 33 y 24 (localmente 25) Superficie: 589 ha

323. Zonas con erosión parcial

Unidad 37: Asociación de las unidades 31 y 26 Superficie: 5025 ha

Unidad 38: Asociación de las unidades 32 y 23 Superficie: 1072 ha

Unidad 39: Asociación de las unidades 33 y 24 (localmente 25) Superficie: 1346 ha

4 - Barrancas

La zona de estudio está disectada por numerosas barrancas, a través de las cuales drenan las aguas durante la época húmeda.

Unidad 40: Son barrancas con suelos erosionados. En el sur de la zona, más húmeda, corresponde a gargantas profundas con pendientes de fuertes a muy fuertes. Los suelos son coluvionados, erosionados y los afloramientos rocosos frecuentes. En el norte, las pendientes son menos fuertes, pero debido al clima más seco la erosión es severa, los afloramientos rocosos están generalizados. En los dos casos los suelos son Leptosols (S1) Superficie: 8607 ha

Unidad 41: Son barrancas localizadas en el sur de la zona de estudio, con pendientes inferiores a 40%. Los suelos, muy a menudo coluvionados y profundos, son Luvisoles y Cambisoles (S13). Superficie: 1738 ha

5 - Valles y Planicie aluvial

En función del recubrimiento de los materiales aluviales por las cenizas recientes, se establecieron las dos unidades siguientes:

Unidad 42: Valles de la sierra con cenizas recientes. Los suelos francos son Andosoles profundos (S4). Superficie: 319 ha

Unidad 43: Valles sin cenizas recientes y Planicie aluvial. Suelos profundos de texturas diversas. (S10). Superficie: 18476 ha

6 - Zonas reforestadas

Representan a las zonas roturadas y terraceadas sobre las cuales se plantaron especies forestales. Se dividen en:

Unidad 44: Zonas reforestadas sobre tepetate aflorante. Superficie: 2674 ha

Unidad 45: Zonas reforestadas sobre pendientes de volcanes (generalmente de tezontle). Superficie: 172 ha

Unidad 46: Zonas reforestadas sobre flancos de barrancas. Superficie: 1009 ha

Unidad 47: Corresponde a una pequeña zona reforestada, ubicada en la parte baja de la sierra. Superficie: 81 ha

Unidad 48: Zonas localizadas en el piedemonte. Superficie: 437 ha

7 - Zonas con terrazas agrícolas

Ocupan superficies menores que las zonas reforestadas. Están localizadas en la región de San Pablo; la mayoría está constituida por antiguas zonas erosionadas tepetatosas, pero de igual manera que para las zonas reforestadas, algunas áreas, no erosionadas, localizadas sobre el piedemonte, han sido terraceadas con fines agrícolas. Por consiguiente tenemos las dos unidades siguientes:

Unidad 49: Terrazas agrícolas sobre tepetate. Superficie: 423 ha

Unidad 50: Terrazas agrícolas sobre piedemonte. Superficie: 392 ha

8 - Minas

Unidad 51: Las minas de explotación de arena para la construcción son abundantes en el piedemonte y en los glacis que se encuentran entre la autopista de México-Puebla y Tequesquínahuac. La mayoría de dichas minas

están ubicadas en el fondo de las barrancas, es decir en posición peligrosa en caso de lluvias abundantes. Superficie: 362 ha

B. Representación de las unidades: el mapa morfopedológico

1. Las unidades de mapeo están caracterizadas por un color y una clave.
- El color se refiere a los grandes conjuntos morfopedológicos cuya leyenda se proporciona posteriormente.
- La clave está compuesta por un número y una letra. El número corresponde a las diferentes unidades descritas en el capítulo precedente (VI A). La letra indica el rango dominante de pendientes en la unidad. Los diferentes rangos son:

a: pendientes de 0 a 5%
b: pendientes de 5 a 12%
c: pendientes de 12 a 25%
d: pendientes de 25 a 40%
e: pendientes superiores a 40%

2. El mapa morfopedológico está dividido en doce hojas. El índice de estas hojas está indicado en la Figura 20.

Annexe 9: Carte des zones érodées et carte des zones réhabilitées sur la Sierra Nevada occidentale par Peña et Zebrowski (1992).

PIEDEMONTES y GLACIS

Zonas erosionadas

Erosión total: tepetate aflorante.

Unidad 31 Formaciones indiferenciadas (Ti), con CaCO_3 .
Duripans (S23)

Formaciones de la serie T3.

Unidad 32 con CaCO_3 .
Duripans (S19, S20)

Unidad 33 sin CaCO_3 .
Fragipans (S18)

Erosión severa: las zonas con tepetate aflorante dominan sobre las zonas con suelos.

Unidad 34 Formaciones indiferenciadas (Ti), con CaCO_3 .
Duripans (S23) y Phaeozems (S16)

Formaciones de la serie T3.

Unidad 35 con CaCO_3 .
Duripans (S19, S20) y Cambisols (S11)

Unidad 36 sin CaCO_3 .
Fragipans (S18) y Luvisols (S12, S13)

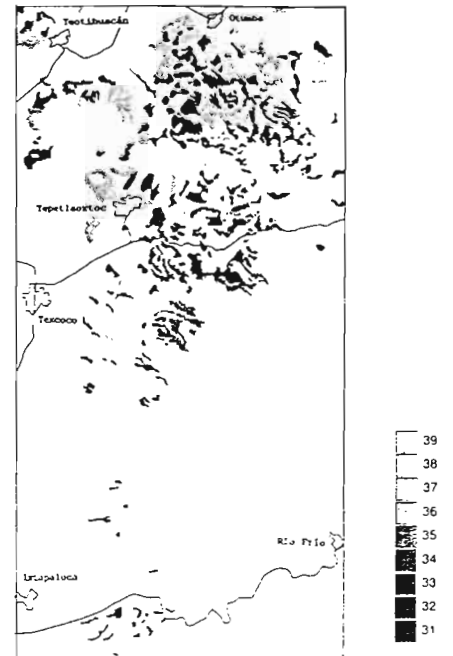
Erosión parcial: las zonas con suelos dominan sobre las zonas con tepetate aflorante.

Unidad 37 Formaciones indiferenciadas (Ti), con CaCO_3 .
Phaeozems (S16) y Duripans (S23)

Formaciones de la serie T3.

Unidad 38 con CaCO_3 .
Cambisols (S11) y Duripans (S19, S20)

Unidad 39 sin CaCO_3 .
Luvisols (S12, S13) y Fragipans (S18)



ZONAS REHABILITADAS

Zonas reforestadas

Unidad 44 Sobre tepetate.

Unidad 45 Sobre volcán.

Unidad 46 Sobre flancos de barrancas.

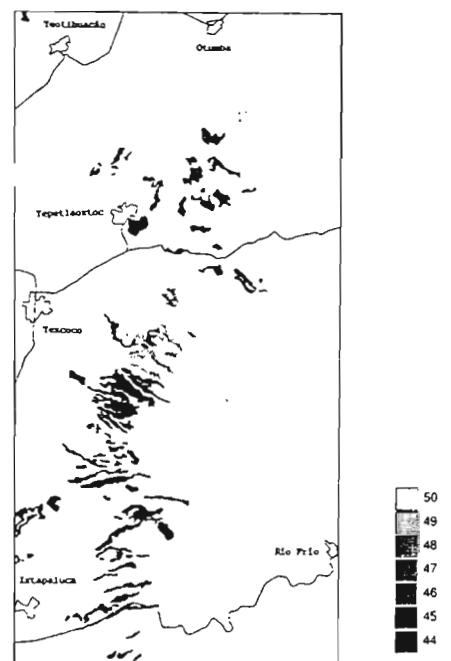
Unidad 47 En la sierra.

Unidad 48 Sobre piedemonte.

Zonas con terrazas agrícolas

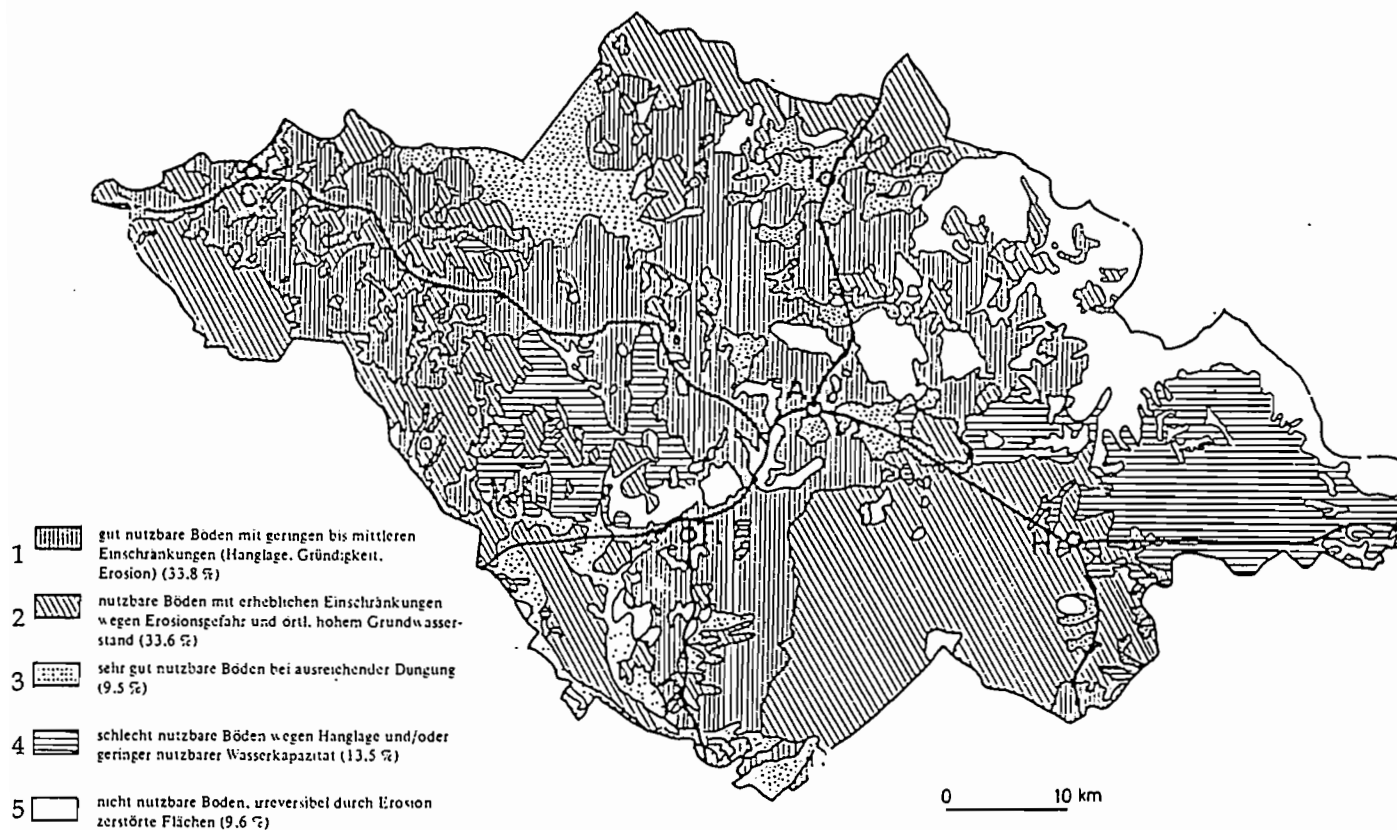
Unidad 49 Sobre tepetate.

Unidad 50 Sobre piedemonte.



Annexe 10: Unités de sols érodés cartographiées par Werner (1988) sur Tlaxcala.

Abb. 21: Kartenskizze der Verteilung der potentiellen ackerbaulich nutzbaren Böden im Staat Tlaxcala (nach CRUZ LOPEZ, 1949 und FABILA et al., 1955; verändert vom Verfasser)



- 1 - Sols de bonne qualité mais avec quelques limitations (pente forte, érosion, ...).
- 2 - Sols avec de nombreuses limitations (hydromorphie) et forte érosion.
- 3 - Sols nécessitant une forte fertilisation.
- 4 - Sols à ne pas utiliser car pente trop forte et réserve en eau trop faible.
- 5 - Erosion irréversible, sols disparus.

Annexe 11: Etapes pour la mise en place de la partie du SIG concernant le milieu physique :

- a - reprise de l'information sélectionnée sous chaque thème à partir d'un calque avec : en noir les différentes zones surfaciques à informer et en rouge un code pour chaque zone correspondant à l'information sur le contenu à intégrer.
- b - scanérisation des calques en ne prenant pas en compte la couleur rouge
- c - vectorisation de la couche scannée
- d - correction avec fermeture des polygones et élimination des arcs en trop.
- e - création d'un cadre et rentrée des références géographiques et cartographiques en Latitude Longitude de la couche.
- f - numérotation de tous les polygones.
- g - impression de la couche graphique comportant les polygones numérotés.
- h - création de la base de données attributaire dans un tableur à partir des numéros attribués à chaque polygone et de l'information thématique provenant de la carte préalablement retranscrite en rouge sur le calque de départ.
- i - association de la base d'information à la base graphique.
- j - vérification et correction des erreurs ou oublis éventuels entre la base graphique et ses informations associées.

Annexe 12: Données du recensement 1994 disponibles sur le CDROM CIMA (INEGI)

A01	Número de ejidos	E01	Total de establecimientos	n
A02	Superficie total ejidal en ha	E02	Personal ocupado total	n
A03	Superficie parcelada en ha	E03	Establecimientos micro respecto al total (%)	n
A04	Superficie ejidal sembrada en ha	E04	Personal ocupado en establecimientos micro (%)	n
A05	Superficie ejidal de riego en ha	E05	Remuneraciones medias al personal ocupado	n
A06	Superficie ejidal de temporal en ha	E06	Valor de la producción total	n
A07	Sup. con pastos naturales o agostadero en ha	E07	Valor agregado censal	n
A08	Superficie con bosque o selva en ha	E08	Total de establecimientos en las manufacturas	n
A09	Número total de ejidatarios	E09	Personal ocupado total en las manufacturas	n
A10	Número de ejidatarios con parcela individual	E10	Establecimientos micro en las manufacturas (%)	n
A11	Número de ejidos con actividad agrícola	E11	Personal ocupado en manufacturas micro (%)	n
A12	Número de ejidos con actividad ganadera	E12	Pagos al personal ocupado en manufacturas	n
A13	Número de ejidos con actividad forestal	E13	Valor de la producción en las manufacturas	n
A14	No. ej. con bovinos pal. espe. anim. explot.	E14	Valor agregado censal en las manufacturas	n
A15	No. ej. con porcinos pal. espe. anim. explot.	E15	Total de establecimientos productores de alimentos	n
A16	No. ej. con aves de corral pal. espec. explot.	E16	Personal ocupado en la manufactura de alimentos	n
A17	Pino como ppal especie forestal explota en ejidos	E17	Unidades micro-productoras de alimentos (%)	n
A18	Otras especies forestales explotadas en ejidos	E18	Personal en microproductoras de alimentos (%)	n
A19	Ejidos que realizan recolección	E19	Pagos al personal en la manufactura de alimentos	n
A20	Núm. de ej. que obtuvieron crédito o préstamo	E20	Valor de producción en la manufactura de alimentos	n
A21	Número de ejidos que obtuvieron seguro	E21	Valor agregado en la manufactura de alimentos	n
A22	Existencias de tractores funcionando en ejidos	E22	Total de unidades en la manufactura de textiles	n
A23	Número de unidades de producción	E23	Personal ocupado en la manufactura de textiles	n
A24	Número de unidades de producción rurales	E24	Establecimientos microproductores de textiles (%)	n
A25	Número de unidades de producción urbanas	E25	Personal en microproductoras de textiles (%)	n
A26	Núm. de viviendas con actividad agropecuaria	E26	Pagos al personal en la manufactura de textiles	n
A27	Sup. total de unidades de prod. rural en ha	E27	Valor de producción en la manufactura de textiles	n
A28	Superficie sembrada en ha	E28	Valor agregado censal en manufactura de textiles	n
A29	Superficie no sembrada en ha	E29	Unidades productoras de madera y papel	n
A30	Superficie de riego en ha	E30	Personal en la manufactura de madera y papel	n
A31	Superficie de temporal en ha	E31	Unidades microproductoras de madera y papel (%)	n
A32	Sup. con pastos naturales o agostadero en ha	E32	Personal en microproductoras de madera y papel (%)	n
A33	Superficie con bosque o selva en ha	E33	Pagos al personal manufacturero de madera y papel	n
A34	Sup. bosque con pastos para agostadero en ha	E34	Valor de producción de madera y papel	n
A35	Superficie ejidal en ha	E35	Valor agregado en la manufactura de madera y papel	n
A36	Superficie de propiedad privada en ha	E36	Total de establecimientos en otras manufacturas	n
A37	Núm. de unidades que obt. crédito o préstamo	E37	Personal ocupado en otras manufacturas	n
A38	Número de unidades que obtuvieron seguro	E38	Establecimientos micro en otras manufacturas (%)	n
A39	Núm. de unidades de prod. con org. individual	E39	Personal en microunidades otras manufacturas (%)	n
A40	Existencias de tractores funcionando	E40	Pagos al personal ocupado en otras manufacturas	n
A41	Núm. de unidades que venden la prod. agrícola	E41	Valor de la producción en otras manufacturas	n
A42	Núm. de unidades que venden la prod. ganadera	E42	Valor agregado censal en otras manufacturas	n
A43	Núm. de unidades que venden la prod. forestal	E43	Total de establecimientos comerciales	n
A44	Núm. de unidades de prod. con sup. de labor	E44	Personal ocupado en el sector comercio	n
A45	Sup. total sembrada en ciclo P-V 91-91 en ha	E45	Establecimientos microcomercializadores (%)	n
A46	Sup. total sembrada en ciclo O-I 90-91 en ha	E46	Personal ocupado en microcomercios (%)	n
A47	Superficie agrícola en ha	E47	Pagos al personal ocupado en el comercio	n
A48	Sup. total ocupada con cultivos perennes en ha	E48	Valor de la producción en el comercio	n
A49	Núm. de unidades que usan tecnología agrícola	E49	Valor agregado censal en el comercio	n
A50	Número de unidades que usan tractor	E50	Total de unidades en el comercio de alimentos	n
A51	Núm. de unidades que usan equipo e instal. agr.	E51	Personal ocupado en el comercio de alimentos	n
A52	Has. sembradas de arroz en el año agrícola	E52	Unidades microcomercializadoras de alimentos (%)	n
A53	Has. cosechadas de arroz en el año agrícola	E53	Personal ocupado en microcomercio de alimentos (%)	n
A54	Ton. obtenidas de arroz en el año agrícola	E54	Pagos al personal ocupado en comercio de alimentos	n
A55	Has. sembradas de trigo en el año agrícola	E55	Valor de la producción en el comercio de alimentos	n
A56	Has. cosechadas de trigo en el año agrícola	E56	Valor agregado censal en el comercio de alimentos	n
A57	Ton. obtenidas de trigo en el año agrícola	E57	Total de unidades en comercio de no alimenticios	n
A58	Has. sembradas de frijol en el año agrícola	E58	Personal en comercio de productos no alimenticios	n
A59	Has. cosechadas de frijol en el año agrícola	E59	Unidades microcomercializadoras no alimenticio (%)	n
A60	Ton. obtenidas de frijol en el año agrícola	E60	Personal en microcomercios de no alimenticios (%)	n
A61	Has. semb. de maíz grano en el año agrícola	E61	Pagos al personal en comercio de no alimenticios	n
A62	Has. cosech. de maíz grano en el año agrícola	E62	Valor de producción en comercio de no alimenticios	n
A63	Ton. obten. de maíz grano en el año agrícola	E63	Valor agregado en comercio de no alimenticios	n
A64	Has. semb. de sorgo grano en el año agrícola	E64	Total de establecimientos en el sector servicios	n
A65	Has. cosech. sorgo grano en el año agrícola	E65	Personal ocupado en el sector servicios	n
A66	Ton. obtenidas sorgo grano en el año agrícola	E66	Establecimientos micro en el sector servicios (%)	n
A67	Has. sembradas de soya en el año agrícola	E67	Personal en microprestadoras de servicios (%)	n
A68	Has. cosechadas de soya en el año agrícola	E68	Remuneraciones al personal ocupado en servicios	n
A69	Ton. obtenidas de soya en el año agrícola	E69	Valor de la producción en el sector servicios	n
A70	Has. semb. de trigo grano en el año agrícola	E70	Valor agregado censal en el sector servicios	n
A71	Has. cosech. trigo grano en el año agrícola	E71	Total de unidades en los servicios sociales	n
A72	Ton. obtenidas trigo grano en el año agrícola	E72	Personal ocupado en los servicios sociales	n
A73	Hect. reas plantadas de alfalfa	E73	Unidades micro en los servicios sociales (%)	n
A74	Hect. reas cosechadas de alfalfa	E74	Personal en unidades micro servicios sociales (%)	n
A75	Toneladas obtenidas de alfalfa	E75	Pagos al personal ocupado en servicios sociales	n
A76	Hect. reas plantadas de café	E76	Valor de la producción en los servicios sociales	n
A77	Hect. reas cosechadas de café	E77	Valor agregado censal en los servicios sociales	n
A78	Toneladas obtenidas de café	E78	Total de restaurantes y hoteles	n
A79	Hect. reas plantadas de caña de azúcar	E79	Personal ocupado en restaurantes y hoteles	n
A80	Hect. reas cosechadas de caña de azúcar	E80	Restaurantes y hoteles micro (%)	n
A81	Toneladas obtenidas de caña de azúcar	E81	Personal en restaurantes y hoteles micro (%)	n
A82	Hect. reas plantadas con pastos cultivados	E82	Pagos al personal en restaurantes y hoteles	n
A83	Núm. unidades de prod. cría y explot. animales	E83	Valor de producción en restaurantes y hoteles	n
A84	Núm. de unidades de prod. con ganado bovino	E84	Valor agregado censal en restaurantes y hoteles	n
A85	Existencias totales de bovinos	E85	Total de unidades en los servicios profesionales	n
A86	Existencias de bovinos en viviendas	E86	Personal ocupado en los servicios profesionales	n
A87	Existencias de bovinos hembras para ordeño	E87	Microunidades en los servicios profesionales (%)	n
A88	Existencias de bov. hembras para prod. carne	E88	Personal en microservicios profesionales (%)	n
A89	Existencias de bov. hembras doble propósito	E89	Pagos al personal en los servicios profesionales	n
A90	Existencias totales de porcinos	E90	Valor de producción en los servicios profesionales	n
A91	Existencias de porcinos en viviendas	E91	Valor agregado censal en servicios profesionales	n
A92	Existencias de porcinos hembras para cría	E92	Total de unidades en los servicios inmobiliarios	n
A93	Existencias de aves de corral	E93	Personal ocupado en los servicios inmobiliarios	n
A94	Existencias de aves de corral en viviendas	E94	Unidades micro en los servicios inmobiliarios (%)	n
A95	Existencias de caprinos	E95	Personal en microservicios inmobiliarios (%)	n
A96	Existencias de ovinos	E96	Pagos al personal en los servicios inmobiliarios	n
A97	Volumen cortado de pino en m3	E97	Valor de producción en los servicios inmobiliarios	n
A98	Volumen obtenido de otras especies en m3	E98	Valor agregado censal en servicios inmobiliarios	n
A99	Núm. de unidades de prod. usan tec. forestal	E99		

P01	Población Total
P02	Pob. Femenina
P03	Pob. de 5 años y m s
P04	Pob. de 6 años y m s
P05	Pob. de 12 años y m s
P06	Pob. de 15 años y m s
P07	Pob. de 16 años y m s
P08	Pob. de 18 años y m s
P09	Pob. de 35 años y m s
P10	Pob. de 65 años y m s
P11	Pob. Nacida en la Entidad
P12	Pob. Nacida fuera de la Entidad
P13	Pob. de 5 años y m s Residentes en la Entidad en 1985
P14	Pob. de 5 años y m s Resid. fuera de la Entidad en 1985
P15	Pob. de 5 años y m s Católica
P16	Pob. de 5 años y m s No Católica
P17	Pob. de 6-14 años que Saben Leer y Escribir
P18	Pob. de 15 años y m s Alfabeta
P19	Pob. de 6-14 años que Asisten a la Escuela
P20	Pob. de 15 años y m s sin Instrucción
P21	Pob. de 15 años y m s con Primaria Completa
P22	Pob. de 15 años y m s con Instrucción Postprimaria
P23	Pob. de 15 años y m s sin Instrucción Media Básica
P24	Pob. de 15 años y m s con Secundaria Completa
P25	Pob. de 15 años y m s con Educación Postmedia Básica
P26	Pob. de 18 años y m s sin Educación Media Superior
P27	Pob. de 18 años y m s con Instrucción Superior
P28	Pob. de 18 años y m s sin Instrucción Superior
P29	Pob. de 12 años y m s Soltera
P30	Pob. de 12 años y m s Casada
P31	Pob. Femenina de 12 años y m s
P32	Promedio de Hijos Nacidos Vivos
P33	Promedio de Hijos Sobrevivientes
P34	Pob. Económicamente Activa Ocupada
P35	Pob. Económicamente Activa Desocupada
P36	Pob. de 12 años y m s Estudiante
P37	Pob. de 12 años y m s Dedicada a Quehaceres del Hogar
P38	Pob. Ocupada en el Sector Secundario
P39	Pob. Ocupada en el Sector Terciario
P40	Pob. Ocupada como Empleado u Obrero
P41	Pob. Ocupada como Jornalero o Peón
P42	Pob. Trabajadora por Cuenta Propia
P43	Pob. Ocupada que Trabaja hasta 32 hrs. en la Semana
P44	Pob. Ocupada que Trabaja de 32-40 hrs. en la Semana
P45	Pob. Ocupada que Trabajó de 41-48 hrs. en la Semana
P46	Pob. Ocupada con menos de un S. M. Mens. de Ingreso
P47	Pob. Ocupada con m s de 1 y hasta 2 S. M. Mens. de Ingr.
P48	Pob. Ocupada con m s de 2 y hasta 5 S. M. Mens. de Ingr.
P49	Viviendas Particulares Habitadas
P50	Viv. Part. con Techo de Losa
P51	Viv. Part. con Techo de L. mina de Asbesto, Cartón o Met.
P52	Viv. Part. con Paredes de Tabique
P53	Viv. Part. con Paredes de Madera
P54	Viv. Part. con Paredes de Adobe
P55	Viv. Part. con Piso de Cemento
P56	Viv. Part. con Piso de Mosaico, Madera u otros Recubrim
P57	Viv. Part. con 1 Cuarto
P58	Viv. Part. con 2-5 Cuartos
P59	Viv. Part. con 1 Dormitorio
P60	Viv. Part. con 2-4 Dormitorios
P61	Viv. Part. con Cocina Exclusiva
P62	Viv. Part. con Cocina No Exclusiva
P63	Viv. Part. que usa Gas para Cocinar
P64	Viv. Part. con Drenaje Conectado a la Calle
P65	Viv. Part. con Drenaje Conectado a Suelo o Fosa
P66	Viv. Part. que Disponen de Energía Eléctrica
P67	Viv. Part. con Agua Entubada a la Vivienda
P68	Viv. Part. con Agua Entubada en el Predio
P69	Viv. Part. con Agua en Llave Pública
P70	Viv. Part. Propias
P71	Viv. Part. Rentadas

DESCRIPCION DEL INDICADOR

CLAVE

Porc. Pob. Menor de 15 años	B01
Prom. Hijos Nacidos Vivos por Mujer > 12 años (x10)	B02
Prom. Hijos Nacidos Vivos por Mujer < 30 años (x100)	B03
Porc. Hijos Fallecidos de Mujeres < 30 años (x10)	B04
Porc. Pob. Migrante (x10)	B05
Porc. Pob. de 5 años y m s Migrante (x10)	B06
Porc. Pob. de 15 años o m s Alfabeta	B07
Porc. Niños de 6 a 11 años que Asiste a la Escuela	B08
Porc. Niños de 12 a 14 años que Asiste a la Escuela	B09
Porc. Jóvenes de 15 a 19 años que Asiste a la Escuela	B10
Escolaridad Prom. de Pob. de 15 años y m s (x10)	B11
Porc. Pob. de 15 años y m s con Instrucción Postprim	B12
Número Medio de Dependientes Económicos (x10)	B13
Porc. Pob. Ocupada en el Sector Primario	B14
Porc. Pob. Ocupada en el Sector Secundario	B15
Porc. Pob. Ocupada en el Sector Terciario	B16
Porc. Pob. Ocupada en el Sector No Primario	B17
Porc. Trabajadores de Tiempo Parcial	B18
Porc. Pob. Ocupada con Ingresos menores al Sal. Mjn.	B19
Porc. Pob. Ocupada con Ingresos > a 5 Sal. Mjn. (x10)	B20
Porc. Pob. Ocupada que son Trabajadores por su Cuenta	B21
Porc. Viviendas con Drenaje	B22
Porc. Viviendas con Agua Entubada	B23
Porc. Viviendas con Electricidad	B24
Porc. Viviendas con un Cuarto	B26
Prom. Ocupantes por Cuarto (x10)	B27
Porc. Pob. Rural	B28
Porc. Pob. Semirural	B29
Porc. Pob. Urbana	B30
Porc. Trabajadores en Labores Agropecuarias	B31
Características de Urbanización	B32
Características Educativas	B33
Características de Ocupación	B34
Características de la Vivienda	B35
Desarrollo Socioeconómico	B36

Annexe 13: Données du recensement 1994 retenues et introduites dans le SIG.

Partie touchant à l'Agriculture :

A02 - Superficie en terrain communal en ha.
A03 - Superficie en parcelles en ha
A06 - Superficie en terrain communal saisonnier en ha,
A07 - Superficie communale en prés naturels ou en estivage, en ha,
A22 - Existence de tracteurs fonctionnant pour les terrains communaux,
A27 - Superficies totales des unités de production rurales, en ha,
A31 - Superficie de terrains saisonniers, en ha,
A32 - Superficies de prés naturels ou estivages, en ha,
A34 - Superficie de bois avec pâtures pour l'estivage, en ha,
A40 - Existence de tracteurs fonctionnant,
R01 - rendement en carthame dans l'année agricole,
R02 - rendement en haricots dans l'année agricole,
R03 - Rendement en maïs en grain dans l'année agricole,
R04 - Rendement en sorgho en grain dans l'année agricole,
R05 - Rendement en soja dans l'année agricole,
R06 - Rendement en blé en grain dans l'année agricole,
R07 - Rendement en luzerne dans l'année agricole,
A67 - ha plantés en prés cultivés,
A85 - Existence totale de bovins,
A90 - Existence totale de porcins,
A95 - Existence totale de caprins,
A96 - Existence totale d'ovins.

Données du recensement économique général retenues :

E01 - nombre total d'établissements,
E29 - Unités productrices de bois et papier,
E30 - Personnel dans la manufacture de bois et papier,
E34 - Valeur de production de bois et papier.

Données concernant le niveau de bien être :

B04 - % d'enfants décédés de mère de moins de 30 ans,
B05 - % de population migrante,
B07 - % de population de 15 ans ou plus alphabète,
B11 - scolarité moyenne de la population de 15 ans et +,
B12 - % population de 15 ans et + avec une instruction post primaire,
B14 - % de population occupée dans le secteur primaire,
B17 - % de population occupée dans les secteurs non primaires,
B19 - % de population occupée avec des revenus < au salaire minimum,
B20 - % de population occupée avec des revenus > à 5 fois le salaire minimum,
B28 - % de population rurale,
B29 - % de population semi-rurale,
B30 - % de population urbaine,
B31 - % de travailleurs dans les labeurs agricoles,
B36 - Développement socio-économique.

Données sur la population :

P01 - Population totale,
P02 - Population féminine,
P07 - Population de 16 ans et +,
P09 - Population de 35 ans et +,
P10 - Population de 65 ans et +,
P18 - Population de 15 ans et + alphabétisée,
P34 - Population économiquement active occupée,
P35 - Population économiquement active inoccupée,
P41 - Population occupée comme journalier ou manoeuvre.

Annexe 14: Légende de la couverture géologique du SIG

GEOLOGIA		
Code INEGI	Full name	Code SIG
CRONOESTRATIGRAFIA		
C	CENOZOICO	150
Q	Cuaternario	151
T	TERCIARIO	152
Ts	TERCIARIO SUPERIOR	153
Tpl	Plioceno	154
Tm	Mioceno	155
Ti	TERCIARIO INFERIOR	156
To	Oligoceno	157
Te	Eoceno	158
Tpal	Paleoceno	159
Tpl-Q	Combinaciones	215
M	MESOZOICO	160
K	CRETACICO	161
Ks	CRETACICO SUPERIOR	162
Ki	CRETACICO INFERIOR	163
J	JURASICO	164
Js	JURASICO SUPERIOR	165
Jm	JURASICO MEDIO	166
Ji	JURASICO INFERIOR	167
Tr	TRIASICO	168
P	PALEOZOICO	169
Ps	PALEOZOICO SUPERIOR	170
Pi	PALEOZOICO INFERIOR	171
pE	PRECAMBRICO	172
LITOLOGIA		
ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS		
Gr	Granito	173
Gd	Granodiorita	174
Gr-Gd	Combinaciones	221
Tn	Tonalita	175
Si	Sienita	176
Mz	Monzonita	177
D	Diorita	178
Ga	Gabro	179
Um	Ultramafica	180

ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS		
R	Riolita	181
Rd	Riodacita	182
Da	Dacita	183
Tq	Traquita	184
La	Latita	185
A	Andesita	186
B	Basalto	187
Ta	Toba acida	188
Ti	Toba intermedia	189
Tb	Toba basica	190
Bva	Brecha volcanica acida	191
Bvi	Brecha volcanica intermedia	192
Bvb	Brecha volcanica basica	193
A-Ti	Combinaciones	216
B-Bvb	Combinaciones	217
Tb-Bvb	Combinaciones	226
Da-Ta	Combinaciones	225
B-Tb	Combinaciones	224
R-Bva	Combinaciones	227
Bva-Ta	Combinaciones	222
Ta-Bva	Combinaciones	223
R-Ta	Combinaciones	218
Da-Bva	Combinaciones	219
A-Bvi	Combinaciones	228
Ti-Bvi	Combinaciones	230
Volcanoclastico		231
Metavolcanica intermedia		233
metavolcanica		234
intermedia		235
vidrio		237
ROCAS SEDIMENTARIAS		
cz	Caliza	194
tr	Travertino	195
y	Yeso	196
cg	Conglomerado	197
bs	Brecha sedimentaria	198
ar	Arenisca	199
lm	Limonita	200
lu	Lutita	201
lm-ar	Combinaciones	232
ROCAS METAMORFICAS		
C	Cuarcita	202
M	Marmol	203
Pz	Pizarra	204
F	Filita	205
E	Esquisto	206
Gn	Gneis	207
C.met.	Complejo metamorfico	208
SUELOS		
re	Residual	209
al	Aluvial	210
la	Lacustre	211
pa	Palustre	212
li	Litoral	213
eo	Eolico	214
OTROS		
agua		147
ciudad		148
Jales	?	236

Annexe 15: Légende de la couverture pédologique du SIG

EDAFOLOGIA		
Abreviation INEGI	Signification	Code SIG
A	ACRISOL	4
Af	Ferriico	5
Ag	Gleyico	6
Ah	Humico	7
Ao	Ortico	8
Ap	Plintico	9
T	ANDOSOL	10
Th	Humico	11
Tm	Molico	12
To	Ocrico	13
Tv	Vitrlico	14
O	ARENOSOL	15
Oa	Albico	16
Oc	Cambico	17
Of	Ferralico	18
Ol	Luvico	19
B	CAMBISOL	20
Bk	Calrico	21
Bc	Cromico	22
Bd	Districo	23
Be	Eutrico	24
Bf	Ferralico	25
Bx	Gelico	26
Bg	Gleyico	27
Bh	Humico	28
Bv	Vertico	29
K	CASTANOZEM	30
Kk	Calrico	31
Kh	Haplico	32
Kl	Luvico	33
C	CHEPNOM	34
Cx	Calrico	35
Ch	Haplico	36
Cl	Luvico	37
H	FEOZEM	38
Hc	Calcarico	39
Hg	Gleyico	40
Hh	Haplico	41
Hi	Luvico	42
F	FERRALSOL	43
Fa	Acrico	44
Fh	Humico	45
Fo	Ortico	46
Fp	Plintico	47
Fr	Rodico	48
Fx	Xantico	49
J	FLUVIOSOL	50
Jc	Calcarico	51
Jd	Districo	52
Je	Eutrico	53
Jg	Gleyico	54
Jl	Tionico	55
G	GLEYSOL	56
Gc	Calcarico	57
Gd	Districo	58
Go	Eutrico	59
Gh	Humico	60
Gm	Molico	61
Gp	Plintico	62
Gv	Vertico	63
O	HISTOSOL	64
Od	Districo	65
Oe	Eutrico	66
I	LITOSOL	67
L	LUVIOSOL	68
La	Albico	69
Lk	Calrico	70
Lc	Cromico	71
Lf	Ferriico	72
Lg	Gleyico	73
Lo	Ortico	74
Lp	Plintico	75
Lv	Vertico	76
N	INTOSOL	77
Nd	IDistrico	78

Ne	Eutrico	79
Nh	Humico	80
W	PLANOSOL	81
Wd	Districo	82
We	Eutrico	83
Wh	Humico	84
Wm	Molico	85
Ws	Solodico	86
P	PODZOL	87
Pg	Gleyico	88
Ph	Humico	89
Po	Ortico	90
Pp	Placico	91
D	PODZOLLUVISOL	92
Dd	Districo	93
De	Eutrico	94
Dg	Gleyico	95
U	RANKER	96
R	REGOSOL	97
Rc	Calcarico	98
Rd	Districo	99
Ro	Eutrico	100
Rx	Gelico	101
E	RENDZINA	102
Z	SOLONCHAK	103
Zg	Gleyico	104
Zm	Molico	105
Zo	Ortico	106
Zt	Takirico	107
S	SOLONCHETZ	108
Sa	Albico	109
Sg	Gleyico	110
Sm	Molico	111
So	Ortico	112
V	VERTISOL	113
Vc	Cromico	114
Vp	Pelico	115
X	XEROSOL	116
Xk	Calrico	117
Xg	Gypsico	118
Xh	Haplico	119
Xl	Luvico	120
Y	YERMOSOL	121
Yk	Calrico	122
Yg	Gypsico	123
Yh	Haplico	124
Yl	Luvico	125
Yt	Takirico	126
FASES FISICAS		
1er code	Nombre	code SIG
a	Concrecionaria	127
b	Durica	128
c	Durica Profunda	129
d	Fragica	130
e	Gravosa	131
f	Litica	132
g	Litica Profunda	133
h	Pedregosa	134
i	Petrocalcica	135
j	Petrocalcica Profunda	136
k	Petrogypsica	137
l	Petrogypsica Profunda	138
FASES QUIMICAS		
1er code	Nombre	code SIG
m	Salina	139
n	Fuertemente Salina	140
o	Sodica	141
p	Fuertemente Sodica	142
q	Salina Sodica	143
r	Salina Fuertemente Sodica	144
s	Fuertemente Salina Sodica	145
t	Fuertemente salina Fuertemente	146
TEXTURA		
1	Grueso	1
2	Medio	2
3	Fina	3
OTROS		
agua		147
ciudad		148

Annexe 16: Légende du couvert forestier introduit dans le SIG

TIPO DE VEGETACION	FUENTE	CLAVE X E	CLAVE CAMPO	CLAVE X D	CLAVE	SÍMBOLO
Bosque Mesófilo de Montaña	INEGI	54		1010	Me	1
Bosque Mesófilo de Montaña abierto	INT	34	1	5011	Me(a)	1
Bosque Mesófilo de Montaña cerrado	INT	29	2	5012	Me(c)	1
Bosque de Encino	INEGI	58		1020	Q	2
Bosque de Encino abierto	INT	22	3	5021	Q(a)	2
Bosque de Encino cerrado	INT	28	4	5022	Q(c)	2
Bosque de Pino	INEGI	55		1030	P	4
Bosque de Pino abierto	INT	70	7	5031	P(a)	4
Bosque de Pino cerrado	INT	31	8	5032	P(c)	4
Bosque de Pino y Encino	INEGI	56		1040	PQ	3
Bosque de Pino y Encino abierto	INT	25	5	5041	PQ(a)	3
Bosque de Pino y Encino cerrado	INT	32	6	5042	PQ(c)	3
Bosque de Oyamel	INEGI	51		1050	A	5
Bosque de Oyamel abierto	INT	35	9	5051	A(a)	5
Bosque de Oyamel cerrado	INT	30	10	5052	A(c)	5
Bosque de otras coníferas	INEGI	52		1060	C	6
Bosque de otras coníferas abierto	INT	24	11	5061	C(a)	6
Bosque de otras coníferas cerrado	INT	33	12	5062	C(c)	6
Selva Alta y Mediana	INEGI	64	13	1110	AM	7
Selva Alta y Mediana	INT	26	13	5110	AM	7
Selva Baja	INEGI	65	14	1120	B	8
Selva Baja	INT	21	14	5120	B	8
Bosque Fragmentado	INT	19	15	5210	BF	9
Selva Fragmentada	INT	17	16	5220	SF	10
Mezquital y Huizachal	INEGI	45	17	1310	Ar(m)	17
Chaparral	INEGI	44	18	1320	Ar(c)	17
Matorral Subtropical	INEGI	41	19	1410	M(st)	12
Matorral Submontano	INEGI	42	20	1420	M(sm)	12
Matorral Xerófito	INEGI	43	21	1430	M(xe)	12
Matorral Espinoso Tamaulipeco	INEGI	63	22	1440	M(la)	12
Manglar	INEGI	66	23	1510	Ma	13
Manglar	INT	18	23	5510	Ma	13
Otros tipos de vegetación Hidrófila	INEGI	47	24	1520	Vh	14
Sabana	INEGI	20	25	1610	Sa	15
Palmar	INEGI	40	26	1620	Pm	16
Vegetación de Galería	INEGI	67	27	1630	Vg	19
Vegetación de Galería	INT	23	27	5630	Vg	19
Vegetación Halófila	INEGI	11	28	1640	Ha	
Vegetación de Desiertos Arenosos	INEGI	48	29	1650	Vd	18
Vegetación de Dunas Costeras	INEGI	50	30	1660	Vc	21
Áreas Perturbadas	INT	13	31	5620	Ap	24
Agricultura de Riego	INEGI	2	32	1711	Ag(r)	
Agricultura de Temporal	INEGI	3	33	1712	Ag(t)	
Pastizal	INEGI	4	34	1721	Pz	22
Plantación Forestal	INEGI	62	35	1731	Pl(f)	11
Plantaciones Forestales	INT	15	35	5731	Pl(f)	11
Plantaciones Agrícolas	INT	14	36	5732	Pl(a)	11
Áreas sin Vegetación Aparente	INEGI	68	37	1810	Ad	23
Áreas sin Vegetación Aparente	INT	6	37	5810	Ad	23
Cuerpos de Agua	INEGI	126	38	1820	Ca	25
Cuerpo de Agua	INT	12	38	5820	Ca	25
Zonas Urbanas	INEGI	1	39	1830	Zu	26
Zonas Urbanas	INT		39	5830	Zu	26
Frontera	INEGI	1000		1900		27

Annexe 17: Légende des zones d'irrigation introduites dans le SIG

Zonas de Riego		
Cod carta	Significación	Cod SIG
RIEGO		
R	Agricultura de Riego	1
Re	Agricultura de Riego eventual	2
H	Agricultura de Humedad	3
N	Zona sin Riego	4
Frecuencia		
A	Cultivos Anuales	5
S	Cultivos Semipermanentes	6
P	Cultivos Permanentes	7
AS	Cultivos Anuales y Semipermanentes	8
SA	Cultivos Semipermanentes y Anuales	9
AP	Cultivos Anuales y Permanentes	10
PA	Cultivos Permanentes y Anuales	11
SP	Cultivos Semipermanentes y Permanentes	12
PS	Cultivos Permanentes y Semipermanentes	13
ASP	Cultivos Anuales, Semipermanentes y Permanentes	14

Annexe 18: Légende de la couverture des précipitations en saison des pluies

CLIMAT mai/oct.	
fourchette de pp.	cod SIG
0.50	1
50 -	2
50 +	3
50.100	4
100 -	5
100 +	6
100.175	7
175 -	8
175 +	9
175.250	10
250 -	11
250 +	12
250.325	13
325 -	14
325 +	15
325.400	16
400 -	17
400 +	18
400.475	19
475 -	20
475 +	21
475.550	22
550 -	23
550 +	24
550.625	25
625 -	26
625 +	27
625.700	28
700 -	29
700 +	30
700.800	31
800 -	32
800 +	33
800.900	34
900 -	35
900 +	36
900.1000	37
1000 -	38
1000 +	39
1000.1200	40
1200 -	41
1200 +	42
1200.1400	43
1400 -	44
1400 +	45
1400.1700	46
1700 -	47
1700 +	48
1700.2000	49
2000 -	50
2000 +	51
2000.2300	52
2300 +	53
2300.2600	54
2600 -	55
2600 +	56
2600.3000	57
3000 -	58
3000 +	59

Annexe 19: Charge croissante en UGB pour chaque municipale à partir du nombre de bovins et d'ovins

Municipe	Bovins/ha	Ovins/ha	Charge/ha
PAPALOTLA	0.00	0.00	0.0
GUSTAVO A. MADERO	0.00	0.00	0.0
NAHACAMILPA DE MARIANO ARISTA	0.00	0.00	0.0
AZCAPOTZALCO	0.00	0.00	0.0
MIGUEL HIDALGO	0.00	0.00	0.0
VENUSTIANO CARRANZA	0.00	0.00	0.0
BENITO JUAREZ	0.00	0.00	0.0
TLAHUAC	0.00	0.00	0.0
XOCHIMILCO	0.00	0.00	0.0
JALATLACO	0.00	0.00	0.0
MILPA ALTA	0.00	0.00	0.0
PAPALOTLA DE XICOTENCATL	0.00	0.00	0.0
SAN JERONIMO TECUANIPAN	0.01	0.01	0.0
SAN MATIAS TLALANCALECA	0.04	0.04	0.0
CALPAN	0.05	0.03	0.1
NAUPAN	0.08	0.03	0.1
AMEALCO DE BONFIL	0.11	0.03	0.1
HUEJOTZINGO	0.13	0.00	0.1
SAN MIGUEL XOXTLA	0.13	0.00	0.1
TOTOLAC	0.13	0.06	0.1
TEXCOCO	0.11	0.18	0.1
SAN SALVADOR	0.11	0.21	0.2
TLAHUELILPAN	0.09	0.32	0.2
TOLCAYUCA	0.14	0.07	0.2
ACAJETE	0.16	0.00	0.2
MINERAL DEL MONTE	0.15	0.06	0.2
ALVARO OBREGON	0.12	0.24	0.2
AMOZOC	0.09	0.41	0.2
TLAHUAPAN	0.02	0.79	0.2
APETATITLAN DE ANTONIO CARVAJAL	0.15	0.21	0.2
HUAUCHINANGO	0.11	0.43	0.2
SANTA ISABEL CHOLULA	0.15	0.24	0.2
SAN FELIPE TEOTILALCINGO	0.18	0.10	0.2
ATOTONILCO EL GRANDE	0.14	0.50	0.2
CUAUTLANCINGO	0.24	0.01	0.2
LERMA	0.22	0.26	0.3
ACTOPAN	0.26	0.07	0.3
XALTAPAN	0.18	0.48	0.3
TIANGUISTENCO	0.18	0.51	0.3
CUAUTPEC DE HINOJOSA	0.27	0.12	0.3
TULA DE ALLENDE	0.28	0.11	0.3
TEPETITLAN	0.31	0.00	0.3
NOPALA DE VILLAGRAN	0.20	0.58	0.3
CALIMAYA	0.32	0.02	0.3
TULANCINGO DE BRAVO	0.09	1.20	0.3
CHILCUAUTLA	0.32	0.07	0.3
TLAOLA	0.33	0.03	0.3
CHILA HONEY	0.34	0.01	0.3
TECAMAC	0.31	0.21	0.4
DOMINGO ARENAS	0.23	0.63	0.4
VALLE DE BRAVO	0.29	0.33	0.4
METEPEC	0.22	0.70	0.4
AHUAZOTEPEC	0.36	0.01	0.4
PUEBLA	0.37	0.01	0.4
TOTOLAPAN	0.37	0.01	0.4
ZACATLAN	0.21	0.89	0.4
TEPEPANGO	0.38	0.04	0.4
IXTACAMAXITITLAN	0.33	0.31	0.4
CUERNAVACA	0.38	0.07	0.4
COATEPEC HARINAS	0.24	1.08	0.5
TLAXCALA	0.37	0.54	0.5
SAN SALVADOR EL VERDE	0.38	0.50	0.5
CONTLA DE JUAN CUAMATZI	0.41	0.38	0.5
CUAUTINCHAN	0.40	0.49	0.5
TLANALAPA	0.31	0.95	0.5
TEPEAPULCO	0.47	0.15	0.5
PROGRESO DE OBREGON	0.30	1.07	0.5
ARENAL EL	0.46	0.27	0.5
ECATEPEC	0.35	0.83	0.5
SANTIAGO TULANTEPEC DE LUG	0.37	0.76	0.5
EMILIANO ZAPATA	0.52	0.04	0.5
JUAN C. BONILLA	0.48	0.25	0.5
ESPANITA	0.46	0.37	0.5
SAN GREGORIO ATZOMPA	0.54	0.05	0.6
TIANGUISMANALCO	0.18	1.88	0.6
TEXCALTITLAN	0.50	0.31	0.6
ZAPOTLAN DE JUAREZ	0.32	1.22	0.6
MINERAL DEL CHICO	0.35	1.10	0.6
OCOYUCAN	0.53	0.21	0.6
ALMOLOYA	0.28	1.50	0.6
SAN FELIPE DEL PROGRESO	0.51	0.35	0.6
TLALNEPANTLA	0.57	0.05	0.6
TEPETITLA DE LARDIZABAL	0.33	1.34	0.6
ATLAUTLA	0.46	0.71	0.6
SINGUILUCAN	0.53	0.80	0.7
ZEMPOALA	0.39	1.31	0.7
TLALTENANGO	0.64	0.06	0.7
SAN ANTONIO LA ISLA	0.36	1.47	0.7
TOCATLAN	0.38	1.37	0.7
TULTITLAN	0.66	0.01	0.7
TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO	0.38	1.43	0.7
XALOZTOC	0.47	1.10	0.7
NATIVITAS	0.38	1.59	0.7
ZUMPANGO	0.71	0.02	0.7
CHIGNAHUAPAN	0.52	1.01	0.7
MAINALCO	0.71	0.07	0.7
PACHUCA DE SOTO	0.72	0.02	0.7
COCOTITLAN	0.67	0.37	0.7
AMANALCO	0.53	1.13	0.8
ZACATELCO	0.38	1.96	0.8
TEMASCALCINGO	0.76	0.11	0.8
SAN MARTIN TEXMELUCAN	0.77	0.14	0.8
ACAXOCHITLAN	0.56	1.25	0.8
JIQUEPILCO	0.67	0.70	0.8
MINERAL DE LA REFORMA	0.81	0.02	0.8
ALMOLOYA DE JUAREZ	0.68	0.73	0.8
PAZ LA	0.84	0.01	0.8
HUASCA DE OCAMPO	0.83	0.08	0.8
CHICONCUAC	0.67	0.96	0.9
ATLACOMULCO	0.72	0.75	0.9
SAN AGUSTIN TLAXIACA	0.88	0.03	0.9
SAN ANDRES CHOLULA	0.87	0.09	0.9
OTZOLOTEPEC	0.59	1.54	0.9
TEOTIHUACAN	0.79	0.65	0.9
ATITLANQUIA	0.77	0.80	0.9
TEZONTEPEC DE ALDAMA	0.93	0.05	0.9
MELCHOR OCAMPO	0.91	0.16	0.9
SAN PEDRO CHOLULA	0.74	1.03	0.9
CORONANGO	0.97	0.05	1.0
HUITZILAC	0.98	0.02	1.0
TEPOZTLAN	0.99	0.12	1.0
ALMOLOYA DEL RIO	0.55	2.37	1.0
AMECAMECA	0.77	1.27	1.0
AYAPANGO	0.94	0.43	1.0
TETELA DEL VOLCAN	1.01	0.12	1.0

APAXCO	0.59	2.40	1.1
SANCTORUM DE LAZARO CARDENAS	0.94	0.68	1.1
SANTA CRUZ TLAXCALA	0.94	0.72	1.1
CHAPANTONGO	0.56	2.62	1.1
ZINACANTEPEC	0.90	0.94	1.1
SAN MARTIN DE LAS PIRAMIDE	0.86	1.19	1.1
CHIMALHUACAN	1.04	0.33	1.1
NEALTICAN	0.97	0.74	1.1
TEMASCALAPA	0.94	1.02	1.1
VILLA VICTORIA	0.76	1.95	1.2
CUAJIMALPA DE MORELOS	1.07	0.44	1.2
APAN	1.00	0.81	1.2
MORELOS	0.98	1.06	1.2
TEPETLIXPA	1.22	0.00	1.2
FRANCISCO I. MADERO	1.21	0.15	1.2
OMITLAN DE JUAREZ	1.05	1.02	1.3
VILLA GUERRERO	1.23	0.21	1.3
JLOTZINGO	1.30	0.03	1.3
VILLA DE ALLENDE	1.31	0.03	1.3
CHICONCUAUTLA	1.29	0.19	1.3
POLOTLITAN	1.05	1.75	1.4
TEQUIXQUIAC	1.29	0.68	1.4
SAN NICOLAS DE LOS RANCHOS	0.97	2.54	1.5
TLAMANALCO	0.93	2.98	1.5
CHAPULTEPEC	1.32	1.06	1.5
CHIAUTEMPAN	1.41	0.80	1.6
XICOTZINGO	0.99	3.13	1.6
COYOTEPEC	1.30	1.97	1.7
TEMASCALTEPEC	1.44	1.36	1.7
CHIAUTZINGO	1.68	0.39	1.8
TENANGO DEL AIRE	1.34	2.10	1.8
JUAN GALINDO	1.65	0.59	1.8
IXTACUXTLA DE MARIANO MATAMORO	1.60	1.01	1.8
TULTEPEC	1.63	1.03	1.8
JUCHITEPEC	1.53	1.57	1.8
ACAMBAY	1.70	1.13	1.9
IXTAPALUCA	1.89	0.19	1.9
TLAXCOAPAN	1.69	1.41	2.0
JOCOTITLAN	1.63	1.14	2.1
OCOTYACAC	0.86	6.06	2.1
HUEHUETOCA	1.61	2.51	2.1
TEPEYANCO	1.92	1.02	2.1
TEXCALYACAC	2.04	0.47	2.1
XONACATLAN	1.70	2.40	2.2
HUEYPOXTLA	1.77	2.23	2.2
ATLANGATEPEC	1.47	3.83	2.2
TOLUCA	2.11	0.74	2.3
TLALNEPANTLA	2.11	1.18	2.3
TEOLOCHOLCO	2.01	1.72	2.4
IZTAPALAPA	1.93	2.33	2.4
AMAXAC DE GUERRERO	2.08	1.58	2.4
MUNOZ DE DOMINGO ARENAS	2.26	0.73	2.4
TEPETLAOXTOC	2.24	1.18	2.5
CAPULHUAC	1.72	4.14	2.5
SOYANIQUELPAN DE JUAREZ	2.12	2.24	2.6
ORO EL	2.24	1.96	2.6
TERRENATE	1.01	8.89	2.8
TEOLOYUCAN	2.55	1.55	2.9
COACALCO	2.79	0.47	2.9
SAN MATEO ATENCO	1.56	6.68	2.9
YAUHQUEMEHCAN	1.41	7.50	2.9
TIMILPAN	2.74	1.22	3.0
ATENCO	2.36	3.77	3.1
JALTENCO	2.30	4.23	3.1
EPAZOYUCAN	2.26	5.07	3.3
ATIZAPAN	2.57	3.74	3.3
APIZACO	2.97	1.96	3.4
TOCHIMILCO	3.34	0.37	3.4
ACOLMAN	2.53	4.48	3.4
OZUMBA	3.36	0.44	3.4
CHIAUTLA	2.08	7.18	3.5
VILLA DEL CARBON	2.37	1.78	3.5
ACATLAN	2.37	6.41	3.7
PANOTLA	2.68	4.92	3.7
CUAUTITLAN	3.49	1.41	3.8
ACULCO	2.74	5.25	3.8
AJACUBA	2.61	5.97	3.8
TEPOTZOTLAN	3.12	3.76	3.9
MIXQUIAHUALA DE JUAREZ	2.78	5.87	4.0
TEMAMATLA	3.71	2.26	4.2
NICOLAS ROMERO	3.87	1.76	4.2
AXAPUSCO	3.59	3.83	4.4
IZTACALCO	4.44	0.74	4.6
METEPEC	4.42	2.24	4.9
MEXICALCINGO	3.22	8.26	4.9
HUICUILUCAN	3.97	4.84	4.9
TENANCINGO	3.38	8.05	5.0
NEXTLALPAN	3.97	5.82	5.1
TIZAYUCA	3.60	8.71	5.3
CALPULALPAN	4.78	3.02	5.4
TETLATLAHUACA	5.28	1.40	5.6
OTUMBA	4.53	5.82	5.7
OCUILAN	5.35	2.51	5.9
JILOTEPEC	4.60	6.60	5.9
CHICOLAPAN	5.59	3.18	6.2
HUEYOTLIPAN	6.23	2.68	6.8
ACUAMANALA DE MIGUEL HIDALGO	6.30	4.83	7.3
NOPALTEPEC	6.54	4.31	7.4
CUAUTITLAN IZCALLI	7.27	2.82	7.8
TENANGO DEL VALLE	7.23	6.92	8.6
HUAMANTLA	7.96	4.57	8.9
TZOMPANTEPEC	8.37	4.52	9.3
TEMOAYA	8.51	6.29	9.8
CHAPA DE MOTA	8.30	7.85	9.9
NEZAHUALCOYOTL	8.15	11.49	10.4
TEZOYUCA	9.69	6.01	10.9
IXTLAHUACA	0.00	55.30	11.1
ATIZAPAN DE ZARAGOZA	0.00	62.00	12.4
CHALCO	10.98	7.69	12.5
RAYON	11.63	13.12	14.3
MAGDALENA CONTRERAS LA	8.17	30.87	14.3
NAUCALPAN	12.25	17.02	15.7
TENANCINGO	14.26	8.57	16.0
VILLA DE TEZONTEPEC	16.34	2.45	16.8
SAN PABLO DEL MONTE	17.14	2.26	17.6
TLALPAN	16.68	10.31	18.7
ZITLALTEPEC DE TRINIDAD SANCHEZ S	16.48	11.86	18.9
SAN SIMON DE GUERRERO	20.01	3.56	20.7
TLAXCO	19.12	16.49	22.4
TETLA	20.00	20.00	24.0
MAZATECOCHCO DE JOSE MARIA	22.88	20.57	27.0
JOQUICINGO	25.03	9.84	27.0
CUAUHTEMOC	22.94	55.56	34.1
CUAXOMULCO	47.95	4.97	48.9
ISIDRO FABELA	44.21	24.14	49.0
COYOACAN	75.81	78.74	91.6

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Photo 1 : Profil de tepetates	7
Photo 2: Grand ravin taillé dans un replat de piémont.	13
Photo 3: Ravines sillonnant le piémont, Santa Catarina del Monte.	13
Photo 4: Ravin au milieu d'un champ.	14
Photo 5: tepetates discontinus et érosion régressive.	15
Photo 6: Unité paysagère aux tepetates.	15
Photo 7: tepetates discontinus.	17
Photo 8: Comme des pelures d'oignon.	17
Figure 1 : L'axe néo-volcanique trans-mexicain.	3
Figure 2 : Localisation des tepetates au Mexique (Peña y Zebrowski 1992)	4
Figure 3: Vue reconstituée en trois dimensions de la vallée de Mexico	9
Figure 4 : Climatoposéquence de sols et tepetates du versant occidental de la Sierra Nevada	11
Figure 5 : Vue en trois dimensions du mont Tlaloc Telapon	12
Figure 6 : Principaux glyphes correspondants aux tepetates	21
Figure 7: Zone d'étude avec découpage des cartes INEGI	33
Figure 8: Scène 26-47 (Landsat TM) avec localisation des trois secteurs d'étude préliminaire	35
Figure 9: Extraction 1 : "Sierra Nevada occidentale"	36
Figure 10 : a - b - c : Extraction 2 "Tlaxcala"	38
Figure 11: a - b - c : Extraction 3 : "Ixtlahuaca"	40
Figure 12: Vue en trois dimensions de cerro la Guadalupeana	42
Figure 13: Schéma de succession des étapes dans l'utilisation de masques dans les classifications	49
Figure 14: Légende des classifications	51
Figure 15: Classification finale sur "Sierra Nevada occidentale"	52
Figure 16 : Classification finale sur Tlaxcala	53
Figure 17: Classification finale sur Ixtlahuaca	54
Figure 18: tepetates affleurants, discontinus et sous-jacents sur l'extraction n°1 : Sierra Nevada Occidentale	55
Figure 19: tepetates affleurants, discontinus et sous-jacents sur l'extraction n°2 : Tlaxcala	57
Figure 20: tepetates affleurants, discontinus et sous-jacents sur l'extraction n°3 : Ixtlahuaca	58
Figure 21 : Sélection de quatre fourchettes altitudinales.	63
Figure 22: Elimination des précipitations moyennes supérieures à 800 mm	63
Figure 23: Elimination des précipitations moyennes supérieures à 900 mm	63
Figure 24: Carte des sélections sur critères géologiques	65
Figure 25 : Carte des sélections sur les phases physiques des sols retenues	66
Figure 26 : Carte des tepetates à partir de l'ensemble des requêtes sélectives	68
Figure 27 : Rendements céréaliers : a - Maïs ; b - Blé.	70
Figure 28 : Nombre d'UGB par ha de pâtures	71
Figure 29: Unités productrices de bois et de papier	72
Figure 30 : Population rurale	73
Figure 31: Revenus inférieurs au salaire minimum	74

<i>Tableau 1 : Rendements obtenus sur des tepetates cultivés comparés aux moyennes régionales</i>	26
<i>Tableau 2 : Surfaces classées en tepetates dans les trois extractions</i>	56
<i>Tableau 3 : Surfaces susceptibles d'être en tepetates</i>	67
<i>Tableau 4 : Récapitulatif des résultats sur Sierra Nevada Occidentale</i>	75
<i>Tableau 5 : Récapitulatif des résultats sur Tlaxcala</i>	75
<i>Tableau 6 : Récapitulatif des résultats sur Ixtlahuaca</i>	75
<i>Tableau 7 : Résultats obtenus par Peña y Zebrowski (1992) sur Ssierra Nevada Occidentale</i>	75

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS GENERAUX	1
1^{ERE} PARTIE : CARACTERISATION D'ENSEMBLE DES TEPETATES ET PROBLEMATIQUE GENERALE DE LA RECHERCHE	3
1. - LES TEPETATES : SOLS INDURES IMPROPRES A L'AGRICULTURE	3
1.1. - <i>Les tepetates sur l'axe néo-volcanique mexicain</i>	3
1.2. - <i>Caractéristiques générales de ces sols</i>	5
2. - LES GRANDS TRAITS DU CADRE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE DES TEPETATES.....	7
2.1. - <i>Les hautes terres volcaniques tropicales</i>	7
2.2. - <i>Les tepetates dans l'organisation géosystémique régionale</i>	10
2.2.1. - <i>L'échelle des massifs</i>	10
2.2.2. - <i>L'échelle des versants</i>	11
2.3. - <i>L'origine des tepetates</i>	18
2.3.1. - <i>Substrat géologique favorable à la genèse des tepetates</i>	18
2.3.2. - <i>La dynamique pédogénétique propre aux tepetates</i>	19
2.3.3. - <i>La mise à l'affleurement des tepetates</i>	19
3. - PLACE DES TEPETATES DANS L'HISTOIRE ET LA SOCIETE MEXICAINE	20
3.1. - <i>L'époque précolombienne</i>	21
3.2. - <i>La conquête espagnole</i>	22
3.3. - <i>De l'indépendance à la révolution</i>	22
3.4. - <i>De la révolution institutionnalisée à aujourd'hui</i>	23
3.5. - <i>La politique agricole actuelle</i>	24
4 - REHABILITATION DES TEPETATES : UNE NECESSITE ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE.....	25
4.1. - <i>Restauration des milieux "naturels" et des paysages</i>	25
4.2. - <i>Caractérisation de l'agriculture sur les zones de tepetates</i>	26
4.3. - <i>Dépendance des communautés paysannes face au milieu</i>	26
4.4. - <i>Les programmes de mise en valeur</i>	27
5. - CONCLUSION.....	28
2^{EME} PARTIE : OBJECTIFS ET METHODES.....	30
1 - LES OBJECTIFS A ATTEINDRE.....	30
1.1. - <i>Faire l'état des lieux des surfaces en tepetates</i>	30
1.2. - <i>Spatialiser les risques d'extension d'affleurement des tepetates</i>	30
1.3. - <i>Cartographie des tepetates à réhabiliter a priori</i>	31
2 - LES DONNEES ET MOYENS.....	31
2.1. - <i>Landsat TM</i>	32
2.2. - <i>Documents cartographiques à la base du SIG</i>	32
2.3. - <i>Systèmes et moyens de traitement des données</i>	33
3 - LES SECTEURS D'ETUDE PRELIMINAIRE	34
3.1. - <i>La Sierra Nevada occidentale</i>	37
3.2. - <i>Tlaxcala</i>	37
3.3. - <i>Ixtlahuaca</i>	37
4. - LES ECHELLES DE TRAVAIL.....	39
3^{EME} PARTIE : CARTOGRAPHIE DES PAYSAGES DE TEPETATES PAR TELEDETECTION	41
1. - PRETRAITEMENTS	41
1.1. - <i>Réalisation de compositions colorées</i>	43
1.2. - <i>Les indices</i>	44
1.3. - <i>Les composantes principales</i>	44
1.4. - <i>Mise en superposition du MNT</i>	44
2. - CLASSIFICATIONS.....	45
2.1. - <i>Interprétation visuelle et prise de parcelles d'entraînement</i>	45
2.2. - <i>Seuillages radiométriques</i>	46
2.3. - <i>Création de masques</i>	47
3. - COMBINAISON ET SUCCESSION DES ETAPES	50
4. - RESULTATS ET DISCUSSION.....	50

4^{EME} PARTIE : CARTOGRAPHIE DES SECTEURS SENSIBLES ET DES <i>TEPETATES</i> A REHABILITER	
PAR SIG	59
1. - CREATION DE LA BASE DE DONNEES	59
1.1. - <i>Le milieu physique</i>	59
1.2. - <i>Le milieu humain</i>	60
2. - REQUETES	61
2.1. - <i>Requêtes sur les données du milieu physique</i>	61
2.1.1. - Altitude	62
2.1.2. - Pentes	62
2.1.3. - Climat.....	62
2.1.4. - Géologie.....	64
2.1.5. - Sols.....	64
2.2. - <i>Résultat des requêtes sur le milieu physique</i>	67
2.2. - <i>Utilisation des données socio-économiques</i>	69
2.2.1. - Les rendements céréaliers	69
2.2.2. - L'élevage	71
2.2.3. - L'exploitation des forêts	72
2.2.4. - L'économie.....	73
2.2.5. - Résultats des données socio-économiques	74
3. - RESULTATS GENERAUX ET DISCUSSION.....	75
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	77
BILAN SUR LES TRAVAUX DE SPATIALISATION	77
DE NOUVEAUX HORIZONS	78
PERSPECTIVES D'ETUDE DOCTORALE	79
BIBLIOGRAPHIE	80
ANNEXES.....	86
LISTE DES ILLUSTRATIONS	87
TABLE DES MATIERES.....	89