

L'IMPACT DU SURPATURAGE ET DU DEBOISEMENT SUR L'EROSION DES SOLS DANS LA SIERRA MADRE OCCIDENTALE (Nord-ouest du Mexique)

Luc Descroix*, David Viramontes**, Eva Anaya***, Jérôme
Poulenard****, Jose Luis Gonzalez Barrios*****

* LTHE-IRD, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, descroix@hmg.inpg.fr

** IGA, UJF-Grenoble ; ***UJED, Gomez Palacio, Durango ; ****CNRS-CPB, Nancy ;

*****Cenid-Raspa, Gomez Palacio, Durango.

Résumé :

L'exploitation récente d'un milieu de montagne a conduit à sa dégradation par érosion aréolaire et à la perte de qualité des pâturages, ainsi qu'à une déforestation rapide. Pourtant la productivité est faible et l'émigration est de loin la principale source de revenus. La méthodologie et les principaux résultats ont déjà été exposés ici : données hydro-érosives de 4 campagnes de mesures dans le haut bassin du Rio Nazas, sur des parcelles de 1 à 50 m², et sur de petits B.V. de plusieurs km² ; des mesures ont été également réalisées à l'exutoire d'un B.V. de 5000 km², et des recoupements ont pu se faire avec le colmatage du barrage de Palmito, sur le Nazas (B.V. 19 000 km²). On insiste plus ici sur les problèmes de gestion de l'espace et sur les perspectives hydro-érosive de la dégradation constatée de cet espace.

L'érosion se manifeste rarement, comme dans les montagnes méditerranéennes, par des ravinements, mais bien plus généralement sous forme d'érosion aréolaire qui se traduit par le fait que "les cailloux poussent", et par la formation de "terrassettes" sur les pentes à partir de 15°. On assiste à une « dégradation verte des pâturages », qui risque d'accentuer la baisse de productivité des pâturages. Mais surtout à une dégradation de l'espace qui risque de menacer le rôle de château d'eau que joue la Sierra Madre Occidentale pour tout le Nord Ouest aride du pays.

Mots clés : érosion aréolaire, pierrosité, surpâturage, déboisement, Sierra Madre Occidentale

Abstract :

The recent exploitation of a mountainous environment led to its degradation by areal erosion and a decrease of pasture quality, as well as a strong deforestation. However, grassland productivity remains weak and the emigration is the most important income for the people. The methodology and the main results have been already shown in a previous issue: data of four measurement campaigns realised in the Nazas upper basin. Discharges and soil losses were measured on 1 and 50 m² plots, and on some small catchments; these data were compared with data obtained on 5000 km² order basins and with the sedimentation into the El Palmito dam (watershed area : 19 000 km²). This paper is focused on the spatial management problems and on its possible hydrologic and geomorphologic consequences on pasture and environment.

Erosion has sometimes a gullying pattern, such as the one observed in the Mediterranean basin. But it has more frequently an "areal" pattern and soil losses are quite important. On steep slope (above a 15° slope value), "terraces" due to cattle trampling can be noticed. A "green degradation of grassland is observable and leads to a degradation of pasture quality. The land degradation represent a threat for the whole Sierra Madre and its water balance; this is dangerous at long term because this mountainous range is the water supplying zone for the entire northwestern part of Mexico.

Key words : areal erosion, stoniness, overgrazing, deforestation, western Sierra Madre

INTRODUCTION : PROBLEMATIQUE

La formation du ruissellement et de l'érosion sur les versants de montagne, que ce soit en milieu tropical ou tempéré, relèvent des caractéristiques des précipitations (intensité, durée, fréquence, temps écoulé entre deux événements) et des propriétés du site (pente, couverture végétale et taux de recouvrement, présence de litière, types de sols, encroûtement éventuel, etc.).

Quand une certaine proportion de la surface est dénudée (ce qui est fréquent en milieu tropical sec, mais aussi, dans les reliefs jeunes du sud de l'Europe, là où l'érosion a déjà mis le sol et parfois la roche à nu) mais aussi sur terrains cultivés, il est devenu classique de définir des « états de surface » pour lesquels on connaît ou on définit des propriétés hydrodynamiques particulières (en termes d'infiltration, de ruissellement, d'érosion).

Mais pratiquement dans tous ces cas, on observe une évolution des réponses des versants et des bassins aux précipitations. Cette évolution intervient :

- au cours de la saison pluvieuse, parfois même au cours d'un événement : réorganisation des éléments de la surface, apparition d'annuelles, démantèlement ou consolidation de croûtes ;

- surtout à plus long terme, des interventions anthropiques peuvent modifier profondément le comportement hydrologique des sols : surpâturage et déboisement se traduisent par une évolution rapide des états de surface, qui a des impacts locaux (piétinement, départ des éléments fins du sol, augmentation de la pierrosité...) et régionaux (développement de formes d'érosion ou de dégradation généralisée des sols et des versants).

Les conséquences des modifications intervenant dans le bassin sur son régime hydrique ont été analysés par Viramontes (2000). Il a noté une réduction des temps de réponse des bassins, un accroissement du débit de crue (au détriment du débit de base) et une diminution de la contenance du réservoir « sol » à l'échelle de bassins de 5000 km².

Les travaux dont les résultats sont présentés ici s'inscrivent dans le cadre du projet « Gestion et Usages de l'eau dans un bassin versant du Nord-Mexique : la région Hydrologique n°36 (RH36) », projet de recherche IRD/Cenid Raspa (Centre Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relacion Agua Suelo Planta Atmosfera), basé à Gomez Palacio et animé en particulier par Jean François Nouvelot. Ils concernent plus particulièrement le haut bassin du rio Nazas (fig. 1), d'où proviennent l'essentiel des eaux de surface et des eaux souterraines du bassin endoréique qu'est le bassin des rios Nazas et Aguanaval (qui constituent la RH36).

Dans le cadre des nouveaux programmes de l'IRD, le projet « Hydrologie des Versants Agricoles » (HVA) a prévu, toujours avec l'appui et les compétences du Cenid Raspa, de mener des travaux de recherche dans ce haut bassin, en particulier sur les liens entre les états de surface et leur évolution d'une part, l'hydraulique du ruissellement, les écoulements de sub-surface et les processus d'érosion de l'autre, cela en vue d'une modélisation des écoulements comme de l'érosion.

La méthodologie a déjà été exposée dans cette revue (Descroix *et al.*, 1997), nous insistons plutôt ici sur les observations de terrain et les enseignements qu'elles apportent quand à l'exploitation actuelle des terres et les risques que cela comporte pour la préservation des paysages et des sols de la Sierra Madre. C'est un massif montagneux entier en tant que château d'eau, qui est menacé par une gestion de l'espace peu productive mais très destructive.

I- Une observation : la dégradation de l'espace

Le haut bassin du rio Nazas est représentatif d'une grande partie de la zone axiale la plus élevée de la Sierra Madre Occidentale. Les altitudes maximales ne dépassent pas 3310 m mais aucun col ne franchit la Sierra à moins de 2500 mètres, ce qui traduit sa massivité. Les fonds de vallées sont compris entre 1700 et 2200 mètres, et c'est là que sont installés la plupart des villages (Descroix *et al.*, 1997). Cette chaîne de montagne volcanique de la fin du Tertiaire constitue le plus grand édifice ignimbritique connu au monde.

La pluviométrie est ici comprise entre 450 et 900 mm, soit moins que ce que reçoit le versant Ouest pacifique de la Sierra (certains postes reçoivent plus de 1500 mm par an), mais plus que ce que l'on observe dans le désert de Chihuahua par exemple dans la Laguna, exutoire naturel où viennent s'évaporer les eaux du Nazas (localement moins de 200 mm).

La végétation est constituée de savanes à xérophytes (yuccas, acacias, parfois genévriers) jusqu'à 2000 m, puis de savanes à chênes jusqu'à 2300 ou 2400 mètres; la savane arborée laisse alors la place à des forêts de chênes (jusqu'à 2600 mètres, puis de pins, jusqu'aux plus hauts sommets).

La région est relativement peu peuplée ; la densité moyenne est de 2 à 3 habitants par km². L'habitat est groupé en villages communautaires (les ejidos) de 50 à 500 habitants. L'émigration vers les Etats-Unis compense largement une très forte natalité, et la population décline très vite ; au niveau régional, elle a baissé de 10 % en 20 ans mais la population des petites villes continue à augmenter, et celle des ejidos s'effondre : certains ont perdu les trois quarts de leurs habitants entre 1990 et 2000, les maisons abandonnées sont de plus en plus nombreuses, des écoles ferment.

Un très fort surpâturage

L'élevage bovin est depuis plus d'un siècle l'activité principale de la Sierra Madre, sinon en terme de rentabilité (les mines de métaux rares et des cultures de stupéfiants sont d'un meilleur rapport), du moins en terme de main d'œuvre employée et surtout en ce qui concerne l'espace utilisé. Mais le surpâturage semble être la règle (voir tableau 1) depuis au moins un demi-siècle, ce qui se traduit bien sûr par une très forte dégradation des pâturages (Barral et Anaya, 195).

Tableau 1. Une très forte surcharge pastorale

Nom de l'ejido	Charge bovine observée, Ha/UGB, 1994	Charge bovine souhaitable, Ha/UGB, 1994	Charge bovine observée, Ha/UGB, 1997	Charge bovine souhaitable, Ha/UGB, 1997
Posta de Jihuites (5000 hectares)	2,25	10,50	3,75	9,67
Pilitas (17000 hectares)	3,95	19,40	5,26	17,14
Ensemble (22000 hectares)	3,38	16,34	4,83	14,64

Or la baisse de la population constatée depuis une vingtaine d'années ne se traduit pas par une diminution des troupeaux. Les paysans qui restent rachètent les vaches de ceux qui partent, les familles regroupent leurs troupeaux. On constate même une aggravation de la pression pastorale près des villages. En effet, certains émigrés achètent toujours du bétail pour

maintenir un lien avec leur village ou aider leur famille. Dans la mesure du possible, ils acquièrent des bêtes sélectionnées ; celles-ci offrent en principe de meilleurs rendements en viande, mais sont mauvaises marcheuses et se concentrent autour des rares points d'eau. Les pâturages ont été étendus au détriment des forêts depuis une vingtaine d'années (voir fig. 2 et 3) pour tenter de limiter le surpâturage.

Un déboisement rapide

L'exploitation forestière est plus récente dans la Sierra Madre Occidentale. Elle a commencé au début des années 70 en se surimposant aux activités existantes (agricoles et minières) sans faire travailler les habitants des ejidos, ni concurrencer l'activité pastorale. En effet, l'exploitation se fait au-dessus de 2500 mètres, là où la pluviométrie permet la pousse de pins de qualité suffisante pour en faire du bois d'œuvre. L'Etat de Durango est vite devenu le premier au Mexique pour la production de bois. Mais la diminution de la surface forestière est très rapide (tableau 2).

Tableau 2. Diminution de la surface forestière dans les Unités Administratives Forestières (UAF) de Tepehuanes et Guanacevi, entre 1972 et 1992.

	Surface en 1972		Surface en 1992		Dégradation %
	km ²	% du total	km ²	% du total	
Forêt de pin	662	9,3	222	3,1	66
Forêt pin/chêne	1537	21,6	672	9,5	54
Forêt de chêne	1967	27,7	1203	16,9	39

(d'après Rodriguez Camarillo, 1997)

Le déboisement est perceptible aussi à plus grande échelle sur les figures 2 et 3 qui concernent les ejidos pastoraux situés au Nord de la Sierra La Candela (voir fig.1); on constate que même dans les secteurs voués à l'élevage, la forêt recule, pour y être remplacée par des pâturages et parfois aussi parce que les ejidos vendent des coupes de bois aux bûcherons pour avoir des rentrées d'argent supplémentaires.

II- Les formes de dégradation de l'espace

On distingue très nettement une prédominance de l'érosion aréolaire sur l'érosion linéaire.

* Les formes d'érosion aréolaire

La principale forme d'érosion est aréolaire et correspond à une dégradation générale de l'espace et des pâturages. Elle a été mise en évidence par Viramontes (2000) à partir de travaux antérieurs et se traduit par l'apparition de pierres sur les versants (fig.4), due à l'entraînement des particules fines du sol par le splash et le ruissellement sur des surfaces de moins en moins protégées par l'herbe et de plus en plus piétinées du fait de la pression pastorale.

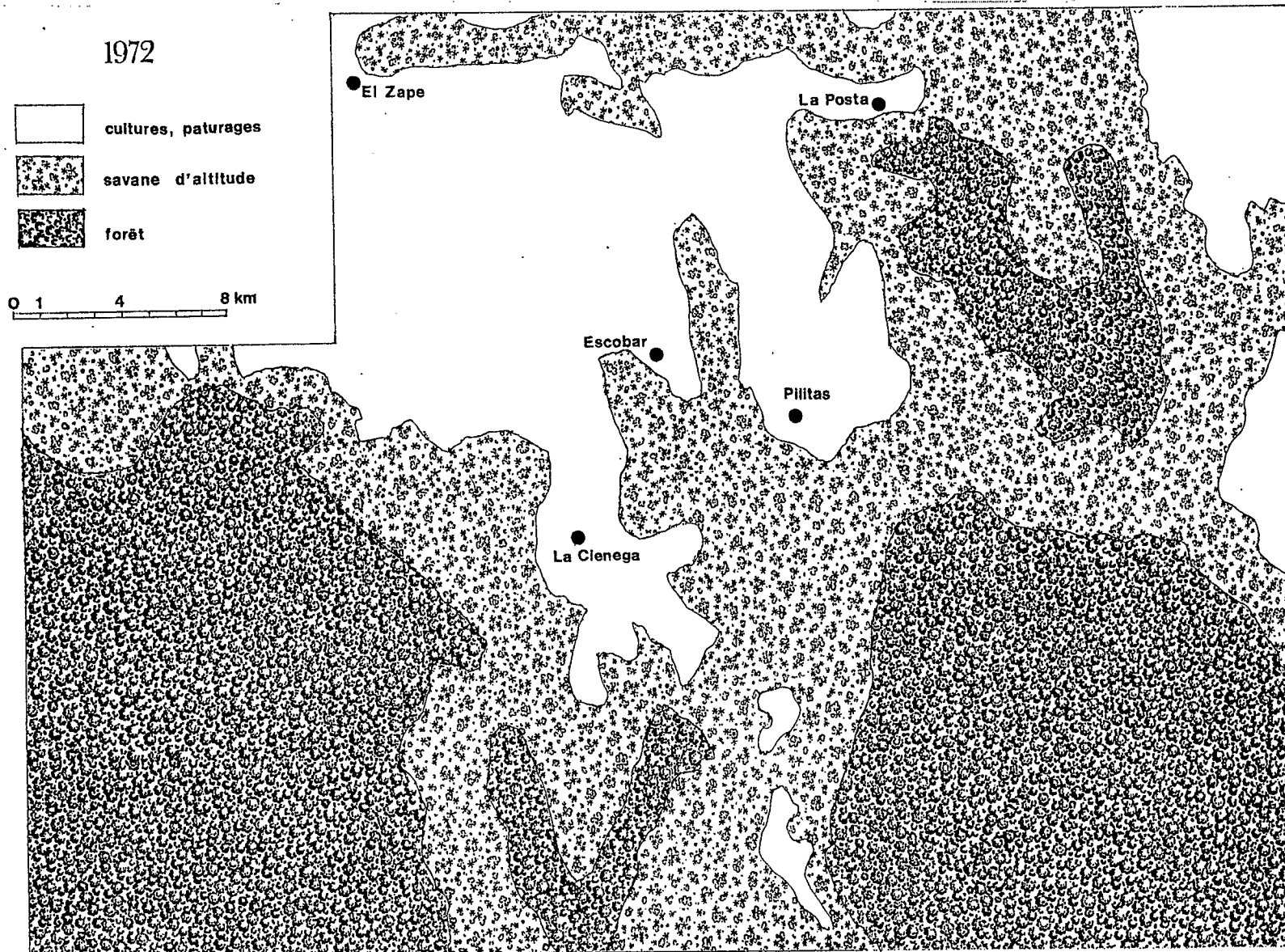


Fig. 2. Extension des forêts dans le Nord du massif de la Candela, en 1972

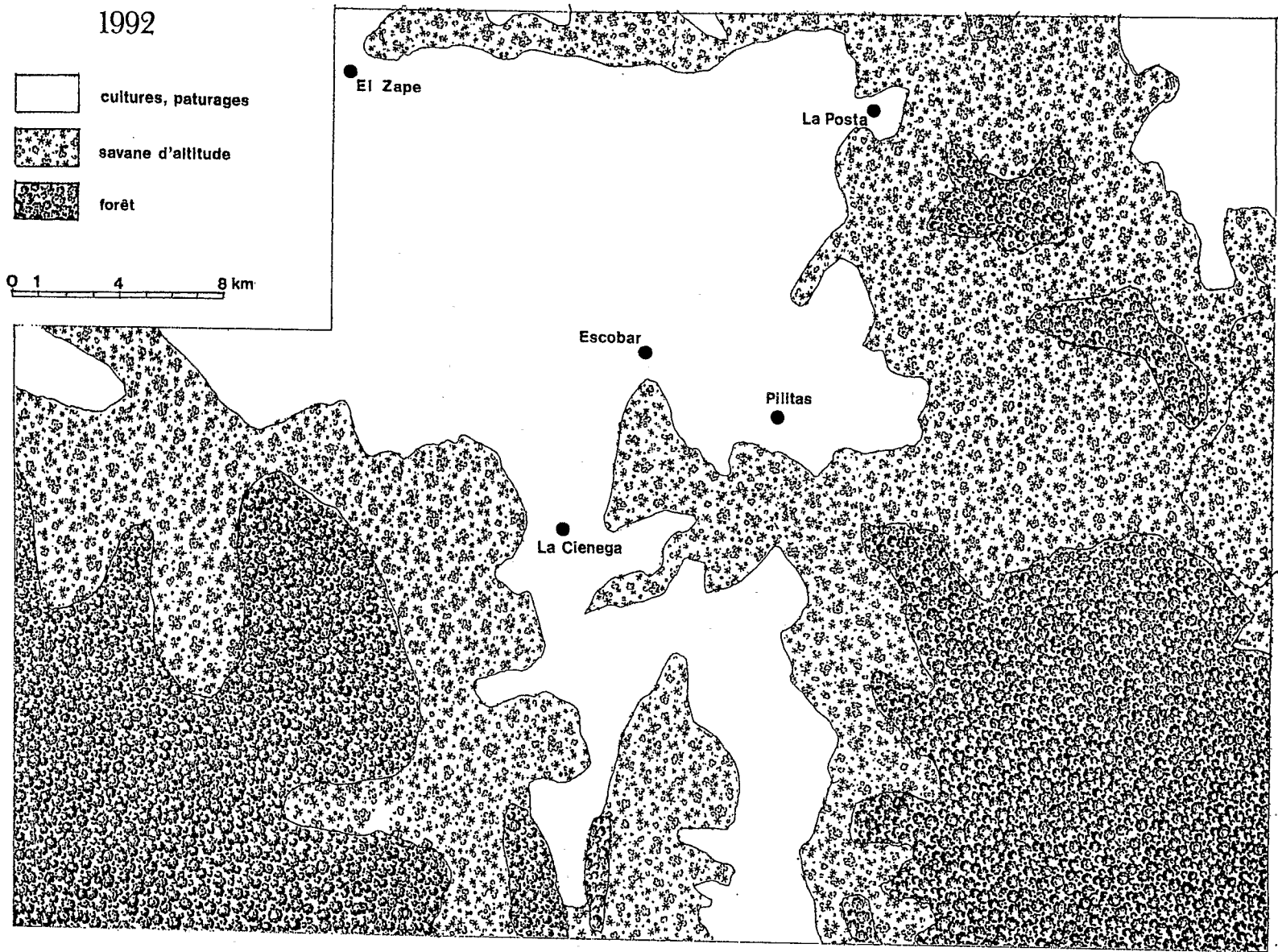


Fig. 3. Extension des forêts dans le Nord du massif de la Candela, en 1992

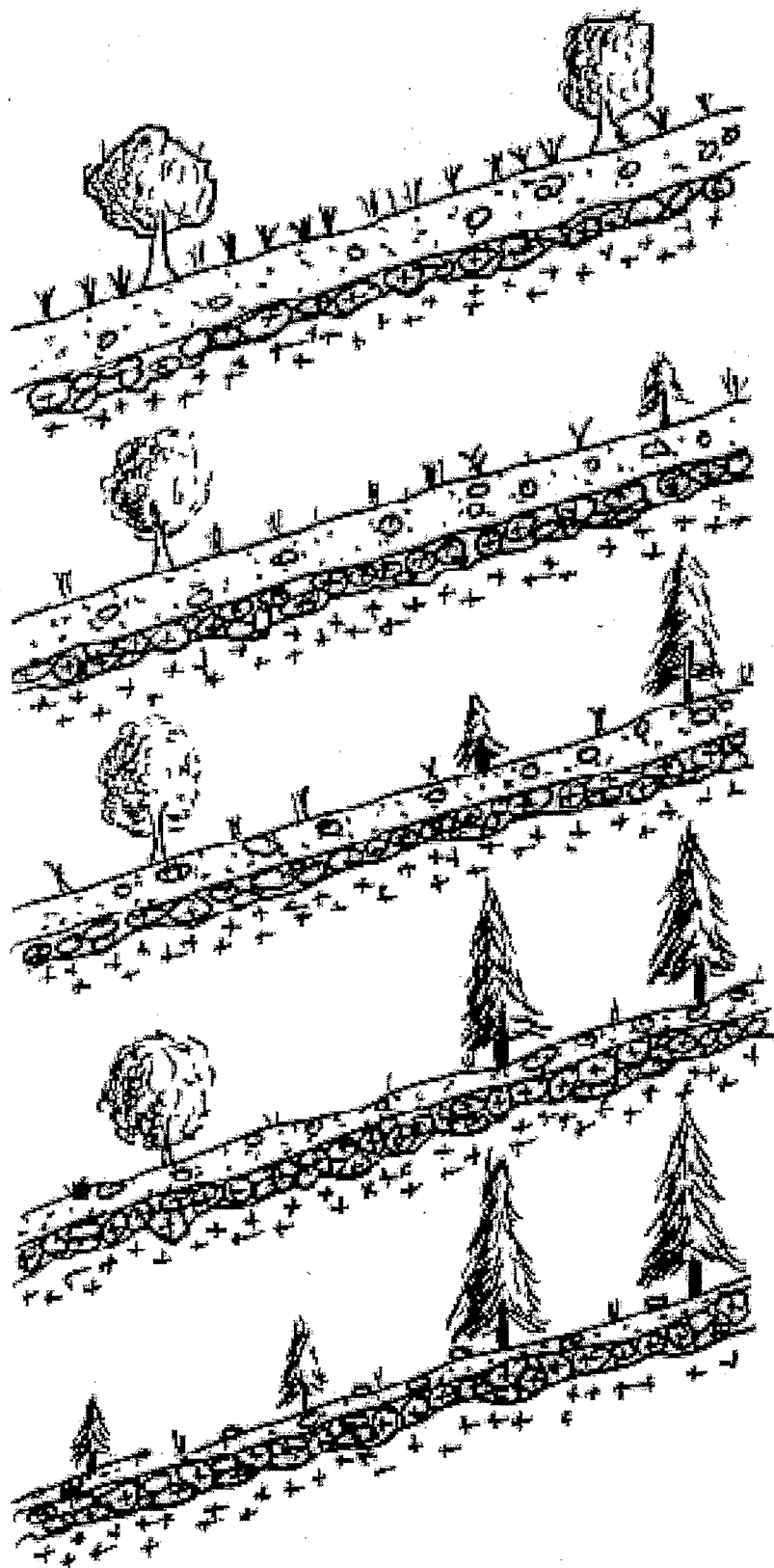


Fig. 4. Processus de dégradation des versants par surpâturage

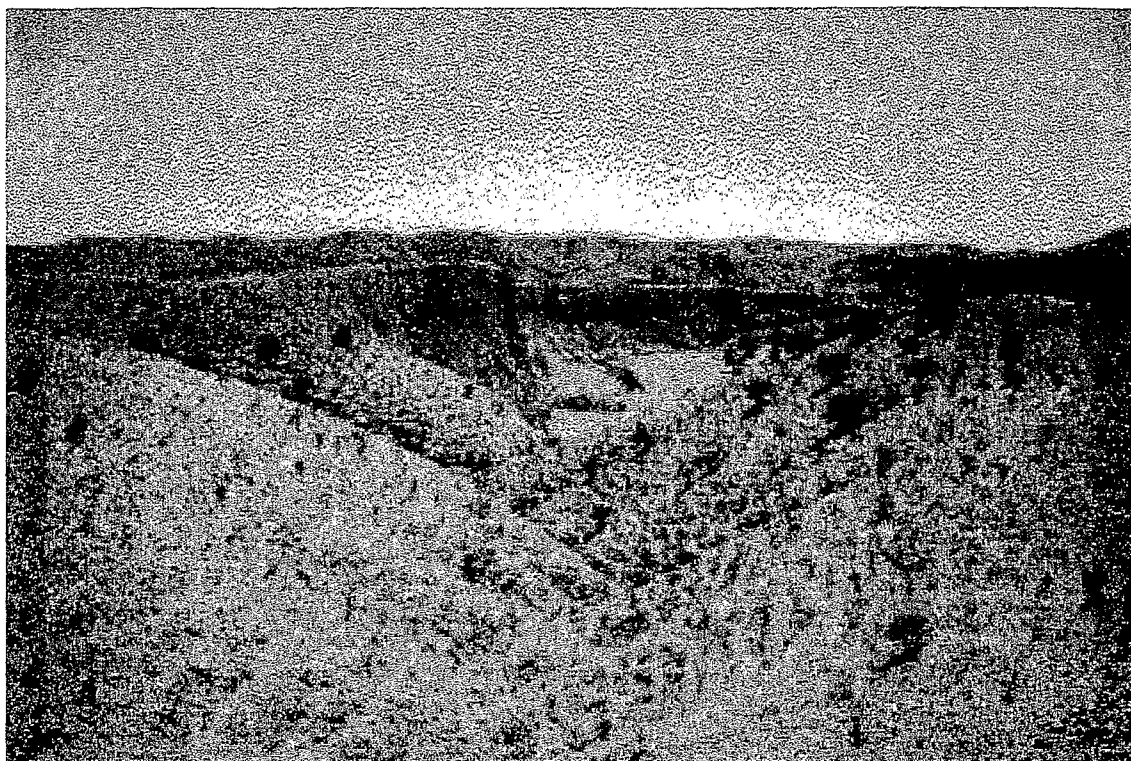


Fig. 5. Terrassettes dues au piétinement du bétail sur les versants dominant le rio Sextin.

Ce processus général de dégradation lié au surpâturage conduit à deux autres types d'évolution qui se traduisent aussi sur les paysages :

- une « dégradation verte des pâturages » (Boutrais, 1994) due à l'envahissement des prairies surchargées par de petits pins, espèce conquérante qui envahit l'espace quand les graminées sont suffisamment dégradées ou rares pour qu'elles n'opposent plus de concurrence à la pousse des ligneux

- l'apparition de « terrassettes » sur les versants, dues au piétinement du bétail bovin et à la formation de réseaux de cheminements qui se croisent et quadrillent les versants (Fig.5). Cette formation, déjà observée dans les Alpes et les Andes (Serrate, 1978), a été décrite dans cette région par Descroix et Poulenard (1995) et Poulenard *et al.* (1996) et intéresse déjà une grande partie des versants où la pente a une valeur supérieure à 17°.

*** les ravinelements**

Ils sont beaucoup plus localisés, et a priori bien peu présents pour une montagne sous climat sub-tropical à longue saison sèche et de surcroît dans un milieu qui est, on l'a vu, surexploité. Cela peut paraître surprenant à première vue. En fait, on est effectivement dans un contexte qui favorise l'écoulement en nappe et les formes d'érosion aréolaire. Ceci tient essentiellement à :

- principalement une lithologie très résistante (rhyolite et ignimbrites) qui empêche le décapage des versants au delà de la mince couche des sols (des phaeozems rarement épais de plus de 60 cm) ;

- des intensités de précipitations en deçà de ce que l'on observe dans d'autres régions tropicales, même de plaine (Sahel, Nordeste du Brésil, littoral équatorien) (Nouvelot et Descroix, 1996 ; Descroix *et al.*, 2000) ;

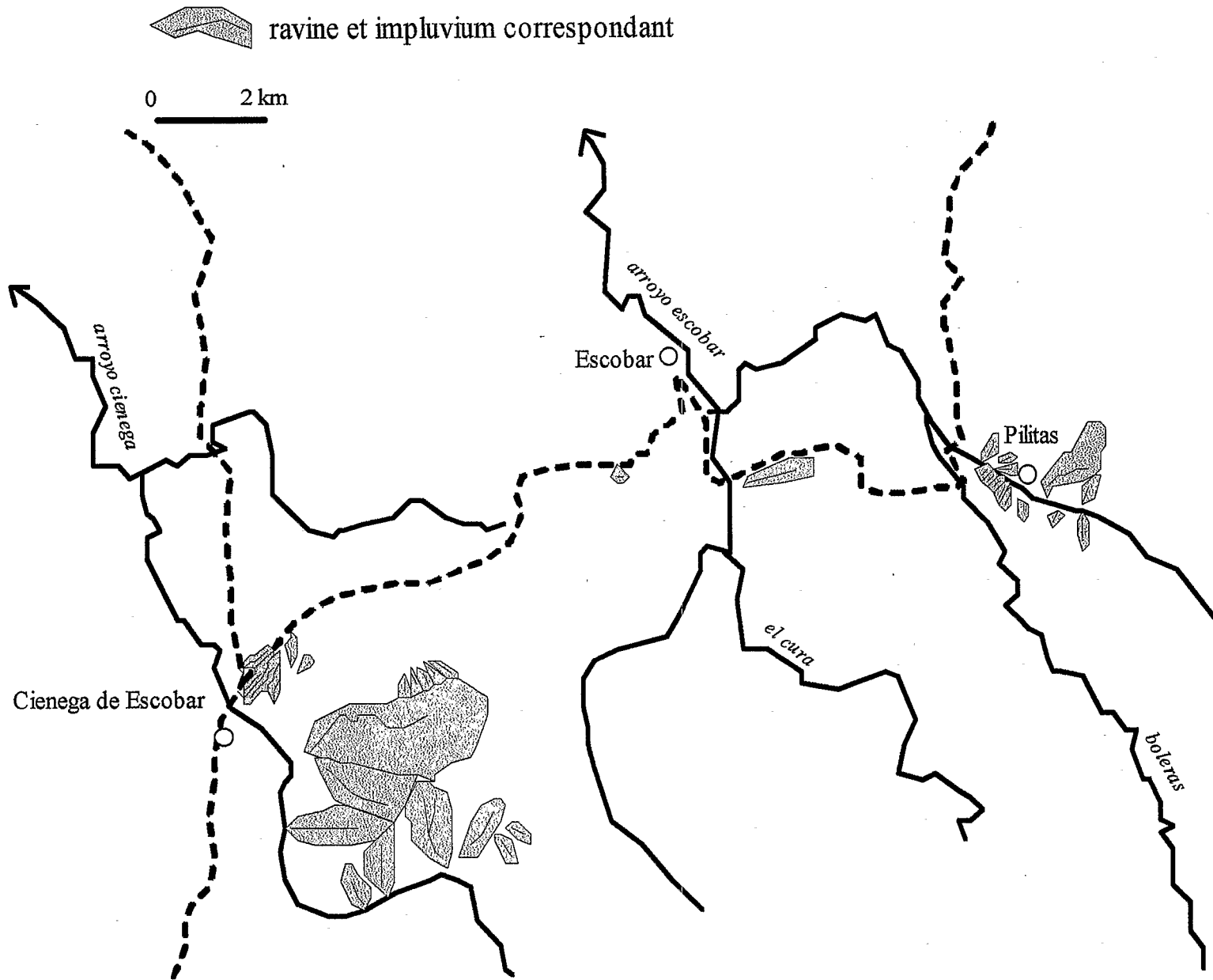


Fig. 6. Localisation des principales ravines du secteur étudié.

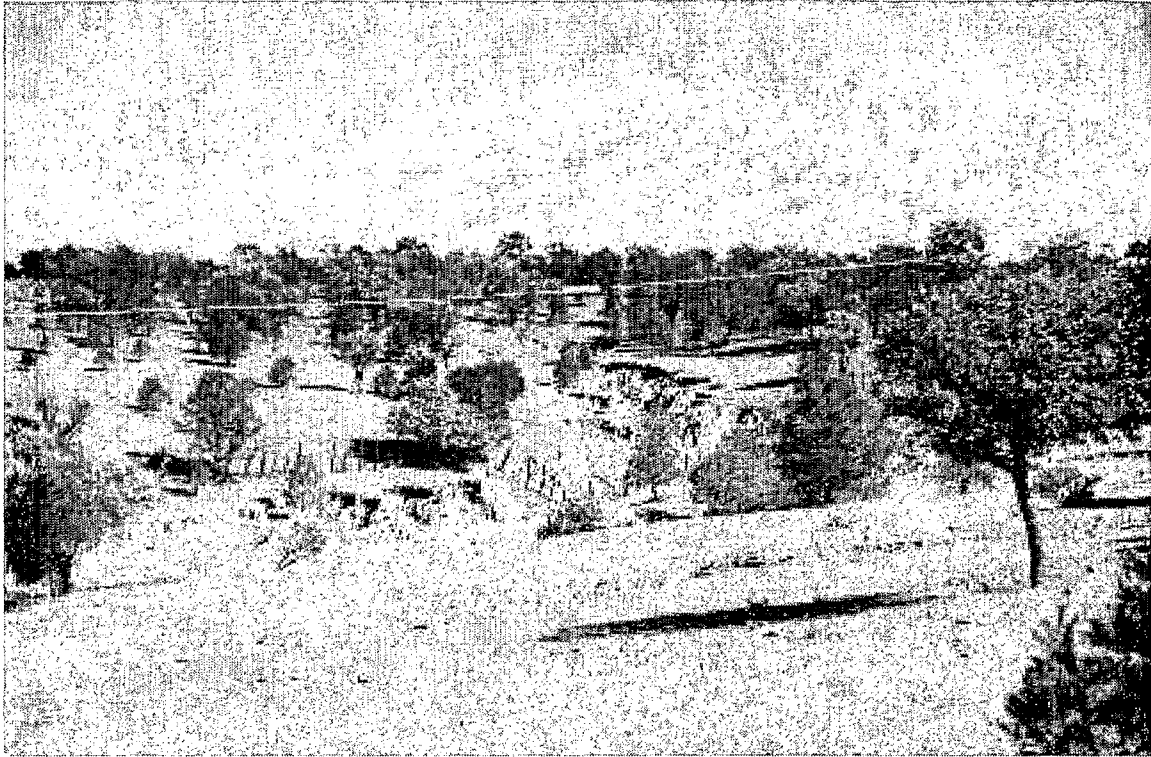


Fig. 7. Ravine dans la dépression de la Cienega : sols profonds, pentes faibles, impluviums importants.

- les versants de la région sont en général pentus et courts, ce qui fait que les impluviums sont réduits, rendant difficile la concentration des écoulements ;
- une végétation assez protectrice quand elle n'est pas dégradée, avec des touffes de graminées assez densément réparties, et une strate arboré couvrant 10 à 20 % de l'espace.

On observe néanmoins quelques ravines (fig. 6 et 7), les plus importantes s'étant creusées dans le bassin de la Cienega de Escobar (certaines mesurent plusieurs kilomètres de long), le seul endroit où des sols profonds ont pu se former et se conserver

III- L'impact du surpâturage et du déboisement sur l'érosion des sols

Les résultats des mesures faites tant à l'échelle de la parcelle qu'à celle du bassin-versant sont résumés ci-après :

* à l'échelle de la parcelle, il a déjà été démontré (comme partout dans le Monde) (voir Descroix *et al.*, 1997) que le déboisement accroissait considérablement l'érosion et le ruissellement ; ici on constate une augmentation d'un ordre de grandeur du ruissellement et de deux ordres de grandeur de la perte en sol pour des parcelles sous forêt (tableau 3).

Dans les zones de savane arborée, on a constaté de grosses différences de comportement des zones surpâturées en fonction de leur position à l'abri ou pas d'un arbre. La canopée de l'arbre (rarement située à plus de 10 mètres et avec de nombreuses branches basses) protège le sol du splash (ce qui est très important quand le surpâturage laisse de grandes zones de sol à nu) et entraîne la création d'une litière qui à son tour protège

également le sol. Ceci a pu être observé sur des parcelles de 50 m², où l'érosion est de 2 à 4 fois plus faible sous arbre (l'écoulement n'est réduit, lui, que de 50 à 60 % par rapport à une parcelle sans arbre).

Tableau 3. Influence de la coupe des arbres sur le ruissellement et l'érosion en forêt

Parcelles de 50 m ²	sans arbre	sans arbre mais avec litière	sous l'arbre
Coefficient de ruissellement en %	23	8,5	2,8
Erosion en g/m ² (1 g/m ² = 0,01 t/ha = 1 t/km ²)	133	30,5	1,11

Mais l'élevage étant l'activité la plus importante ici, c'est bien sûr le surpâturage qui dégrade le plus vraisemblablement le plus d'espace. On a pu comparer ici, sur des parcelles de 1 m², érosion et ruissellement, ainsi que deux caractéristiques hydrodynamiques dont le rôle est majeur dans le déclenchement de l'érosion : la conductivité hydraulique et la densité apparente du sol.

On constate (tableau 4) que l'érosion est d'un ordre de grandeur supérieure dans les zones piétinées par le bétail à ce qu'elle est en zone protégée (ici on a enclos des secteurs identiques pour éviter le piétinement des bovins, mais les pâturages sont déjà dégradés y compris sur les parcelles « non-piétinées »). De même on remarque que le ruissellement est 5 fois plus fort sur les zones piétinées. Cela s'explique, outre la raréfaction de la végétation, par les deux dernières caractéristiques qui apparaissent dans le tableau 4 (et qui ont été bien mises en évidence par Poulenard *et al.*, 1996). La densité apparente des sols est très sensiblement plus élevée en cas de piétinement (phénomène classique du tassement par les sabots) et en conséquence la conductivité hydraulique du sol est plus de 2 fois plus faible.

Tableau 4. Influence du piétinement du bétail sur le ruissellement et l'érosion en zone de pâturages (Poulenard *et al.*, 1996)

Micro-parcelles de 1 m ²	piétinées (8 parc.)	non-piétinées (8 parc.)
Coefficient de ruissellement en %	43	8,3
Erosion en g/m ²	90	7
Densité apparente en g/cm ³	1,38	1,31
Conductivité hydraulique en mm/s (en mm/h)	0,0035 (12,6)	0,008 (28,8)

On notera que rapportées à l'hectare, les valeurs d'érosion observées tant en forêt (1,3 t/ha/an) qu'en zone de savane (0,9 t/ha/an) sont somme toute modérées. Elles ont été dans un cas comme dans l'autre mesurées sur une année « normale » et une année « sèche » (déficit pluviométrique de 40 %). Cependant, des mesures effectuées sur des 10 parcelles de 50 m² plus dégradées en savane ont donné des valeurs moyennes annuelles bien plus élevées que celles relevées par Poulenard *et al.* (1996): de 5 à 47 t/ha/an pour deux années de mesure, avec également une année sèche et une année « normale ». La dégradation est donc bien plus élevée en zone de pâturages qu'en forêt (Descroix et Nouvelot, 1997).

Des mesures ont pu être faites en 1997 et 1998 sur le bassin du Sextin (4660 km²) et en 1998 sur celui du Ramos (7130 km²). Dans les deux cas, on a mesuré des transports en suspension au cours de toute la saison, de l'ordre de 1 à 2 millions de tonnes par an ; rapportées à la superficie du bassin-versant, on obtient une dégradation spécifique de l'ordre de 1,5 à 4 t/ha/an. Ces données ont été obtenues lors de deux années fortement déficitaires (de 40 % environ dans les deux cas).

Les eaux du haut Nazas étant retenues, avant l'entrée dans la plaine, par le barrage d'El Palmito, mis en eau en 1946 (capacité 4.10⁹ m³), les données bathymétriques donnent une idée des transports solides piégés et indirectement, un ordre de grandeur des pertes en sol connues par le bassin-versant. On obtient une valeur moyenne de 5,42 t/ha/an de volume solide stocké entre 1946 et 1971, et de 5,01 t/ha/an entre 1971 et 1991. Soit d'une part des valeurs très modérées pour une zone de montagne (l'atterrissement dans le barrage de Serre Ponçon, sur la Durance, Alpes françaises du Sud, correspond à 8,5 t/ha/an) et surtout pas d'augmentation (la diminution n'est pas significative) entre les deux bathymétries, de l'apport de charge solide au lac de retenue.

Il est connu et évident que dans le cas des mesures réalisées à partir des matières en suspension exportées à l'exutoire du bassin, on ne tient pas compte du stockage des matériaux dans le bassin et dans le lit des cours d'eau. Les valeurs citées de dégradation spécifique dans les zones de pâturage mesurées sur parcelle sont quoiqu'il en soit égales ou sensiblement supérieures à celles mesurées sur bassin versant. Le « déficit » obtenu sur les bassins intermédiaires (Sextin et Ramos) sur deux ans par rapport aux données du bassin total sur 45 ans sont liées au fort déficit pluviométrique et hydrique des deux années connues à cette échelle.

La surexploitation du milieu conduit à l'érosion des sols, et si ici, elle n'a pas l'aspect spectaculaire que peuvent avoir les bad-lands du pourtour méditerranéen ou de l'Ouest américain, elle n'en est pas moins inquiétante pour l'avenir de la vie rurale de la Sierra Madre. De plus, cette dégradation touche indirectement les zones arides situées en aval (tant coté Pacifique que coté Altiplano central du Nord Mexique), car celles-ci sont alimentées par les eaux exogènes venues de la Sierra. Viramontes *et al.* (1999), Viramontes et Descroix (2000), Viramontes (2000) ainsi que Gonzalez Barrios et Descroix (2000) ont montré que l'incidence en terme d'approvisionnement en eau était déjà clairement établie : diminution des temps de réponse et des débits de base des cours d'eau, ainsi que de la capacité de stockage en eau des sols.

On n'a pas encore remarqué de tendance nette à l'augmentation des coefficients d'écoulement au niveau bassin, comme cela a pu être mesuré dans les zones plus humides où les volumes concernés sont plus importants (Nord-Ouest des Etats Unis, Pays de Galles, Cévennes, forêts tropicales humides).

CONCLUSION

L'érosion est globalement modérée dans la Sierra Madre Occidentale. C'est surprenant a priori dans une zone de montagne où la saison sèche dure 8 mois. Mais on s'aperçoit que plus que les ravinements, ce sont les formes d'érosion aréolaire qui dominent. Ceci est inquiétant, car bien plus difficile à corriger (sauf à empêcher la surexploitation actuelle de l'espace).

Le déboisement, massif, mais dont les effets sont vite atténués par la repousse naturelle de broussailles protectrices, est bien moins en cause que le surpâturage, qui s'exerce partout et de manière aiguë. On a pu démontrer que ce surpâturage avait un effet très important sur l'érosion et le ruissellement au niveau parcelle (1 et 50 m²). Par contre, au niveau de grands

bassins versants (de l'ordre de 5000 km²), si on a pu démontrer que les régimes hydrologiques étaient déjà modifiés par l'évolution du milieu et des états de surface du bassin, en revanche, on manque de données pour savoir si l'érosion est aggravée par la surexploitation du milieu.

BIBLIOGRAPHIE

- BARRAL H. et ANAYA E., 1995. « Etudes des pâturages dans la RH36 du Nord-Mexique ». *Projet Cenid Raspa-ORSTOM, rapport technique*, Gomez Palacio, 45 pp.
- BOUTRAIS J., 1994. Eleveurs, bétail et environnement. *A la croisée des parcours, Orstom-Centre d'études africaines*, Paris, pp. 303-319.
- DESCROIX L. et POULENARD J., 1995. Les formes d'érosion dans la Sierra Madre Occidentale (Nord Ouest du Mexique). *Bull. Labo. Rhod. Géomorph.*, 33-34, pp.1-19, Lyon.
- DESCROIX L., GUEDEZ P.Y. et POULENARD J., 1997. Méthodes de mesure de l'érosion actuelle : applications dans les Préalpes du Sud (France) et la Sierra Madre Occidentale (Mexique). *Bulletin du Réseau Erosion n°17* : 239-254.
- DESCROIX L., DIGONNET S., GONZALEZ BARRIOS J.L., VIRAMONTES D. et BOLLERY A., 2000. Local factors controlling gully or areal erosion in the Western Sierra Madre (Northern Mexico). *International Symposium « Gully erosion under global change », Leuven*, 15-19/4/2000.
- GONZALEZ BARRIOS J. L. et DESCROIX L., 2000. Bilan et perspectives de la ressource en eau dans la Région Hydrologique n°36 (Nord Mexique). *RGA, n° 2-2000, t.88*, pp.2115-128.
- NOUVELOT J.F. et DESCROIX L., 1996 - Aridité et sécheresse du Nord-Mexique. *Revue Trace. México, déc. 96 n° 30*, pp 9-25.
- POULENARD J., DESCROIX L. et JANEAU J.L., 1996 : « Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale ». *RGA, Revue de Géographie Alpine, N°2, t.84*, Grenoble.
- RODRIGUEZ CAMARILLO M.G., 1997. Determinación de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental para su calibración por percepción remota. *Tesis de licenciatura, Universidad Juarez del estado de Durango*, 60 p.
- SERRATE C., 1978. Dynamique des versants de haute montagne : Andes centrales péruviennes, Alpes briançonnaises. *Thèse de 3^{ème} cycle, Université Paris VII*, 380 P ;
- VIRAMONTES D., DESCROIX L., NOUVELOT J.F. et GONZALEZ BARRIOS J.L., 1999. Variabilité des apports liquides et solides dans un grand bassin endoréique du Nord-Mexique : le bassin Nazas-Aguanaval (92 000 km²). *Comm. au symposium international Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus, nov. 1999*.
- VIRAMONTES D. et DESCROIX L., 2000. Dégradation progressive du milieu et conséquences hydrologiques : étude de cas dans la Sierra Madre Occidentale (Nord Mexique). *RGA, n° 2-2000, t.88*, pp.27-42.
- VIRAMONTES D., 2000. Comportement hydrodynamique des milieux dans la Sierra Madre Occidentale : causes et conséquences de leur évolution. *Thèse de géographie de l'Université Joseph Fourier, Grenoble*, 300 p. .