

Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre Occidentale : processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis à la surexploitation

Hydrological and erosive behaviour of soils in the Western Sierra Madre. A study of slope processes in an environment under stress

David Viramontes*, Luc Descroix**, Arnaud Bollery***, Jérôme Poulenard****

Résumé

Le surpâturage et le déboisement modifient sensiblement les paysages de la Sierra Madre Occidentale (Mexique). On note une érosion aréolaire généralisée, une dégradation de la qualité des pâturages avec envahissement de ligneux non appétents et un net recul de la forêt de pins en altitude. Par ailleurs, le régime des cours d'eau a évolué ces dernières décennies. On assiste à une diminution des débits de base et des temps de réponse des bassins ; de plus, au niveau des parcelles expérimentales (1 m²), on a constaté une diminution des temps de ressuyage des sols. On présente ici les résultats de cinq années de mesures sur parcelles dans le nord de l'État de Durango. Les précipitations, les écoulements et les pertes en sol ont été mesurés sur vingt-huit micro-parcelles (1 m²) réparties sur trois sites. Il apparaît nettement que le piétinement du bétail et la dégradation de la strate végétale modifient la structure du sol (fermeture des pores, tassement, glaçage de la surface) et l'aspect des versants, en rendant plus aisé le ruissellement. En revanche, sur les versants les plus pentus, la dégradation de la végétation et des sols a produit une forte pierrosité de surface qui freine à présent le ruissellement et l'érosion, en dispersant l'énergie cinétique des pluies et en favorisant l'infiltration.

Mots clés : surpâturage, déboisement, taux d'érosion, ruissellement, états de surface, Sierra Madre Occidentale, Mexique.

Abstract

Overgrazing and deforestation in the western Sierra Madre (Mexico) are modifying the landscape. Areal erosion, degradation of pasture quality through recolonisation by trees, and recession of forest cover are clearly observable. In relation to this, the river regimes have changed in the last few decades. There is evidence of a decrease in baseflow and response times of the watersheds. At the plot scale (50 m²), a reduction in the time of soil moisture depletion has been noticed. This paper presents results of five years of measurements on plots in the North of Durango State. Rainfall, runoff and soil loss data were collected on 28 microplots (1 m²) located in three sites. Cattle trampling and the degradation of the herbaceous cover have significantly modified the soil surface structure and the pattern of the hillslopes. On lower-angle slopes, this results in an increase in runoff, soil surface sealing and packing being also due to splash. Meanwhile, on the steeper slopes, the degradation of soils and vegetation leads to an increase in stoniness, which reduces runoff and soil losses by dispersing the kinetic energy of raindrops and by increasing infiltration rates.

Key words: overgrazing, deforestation, erosion rates, runoff, soil surface features, Western Sierra Madre, Mexico.

Abridged English Version

The hydrodynamical behaviour of catchments depends on the physical properties of soils, such as storage capa-

city, hydraulic conductivity, sorptivity, etc. The spatial variability of these properties is high due to the variability of soil textural and structural characteristics as well as the porosity and content in organic matter. Human activities

* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnahuac, 8532, Jiutepec, Morelos, 62550, Mexique. E-mail : davidv@tlaloc.imta.mx

** LTHE Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement – IRD. UMR 5564, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9. E-mail : descroix@hmg.inpg.fr

*** Service de l'eau, Conseil général de l'Isère, BP 1096, 38022 Grenoble cedex 1.

**** Laboratoire des Sciences du Sol, CISM, université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex. E-mail : Jerome.Poulenard@univ-savoie.fr

modify the hydrodynamical behaviour of the slopes significantly.

The Western Sierra Madre (fig. 1) has a subtropical climate, with 80% of the annual rainfall occurring between June and September. Annual rainfall ranges from 450 mm in valleys to 900 mm on mountain crests. This mountain range is long (2000 km) and elevated (many summits exceed 3000 m). It is covered by savanna up to 2300 m a.s.l. and by oak and pine forest above this altitude. Soils are generally thin (10 to 50 cm), with a water storage capacity ranging typically between 100 and 125 mm.

The Sierra Madre is the main water supplying area for the whole of North-western Mexico (Descroix et al., 1994; Gonzalez and Descroix, 2000). However, the ongoing degradation of soils and vegetation (Poulenard et al., 1996; Rodriguez, 1997; Barral and Anaya, 1995; Descroix and Nouvelot, 1997; Viramontes and Descroix, 2000) has already modified the regimes of the rivers (Viramontes and Descroix, 2000; Viramontes, 2000) in the last three decades at least. A reduction of baseflows, an increase in flood flows, a decrease in basin response times, and an increase in soil moisture depletion rates have been observed extensively in the upper Nazas basin (North of Durango State).

The main aims of this paper are to highlight the causes and processes of runoff and soil loss in the upper Rio Nazas basin, and to analyse whether these processes are linked to the changes already observed in the hydrological response of rivers.

Some processes of land degradation are widespread throughout the entire Sierra Madre. Gully erosion is mitigated by the presence of resistant bedrock (rhyolite): although the network is fairly dense, gully depths are limited. Erosion is dominated by surface wash (Descroix et al., 2000) (fig. 2) and the stoniness of the slopes is a consequence of this areal erosion: fine particles are detached by splash and exported by overland flow. Terracettes due to cattle trampling are generalised when slope gradients exceed 20° (Serrate, 1978; Derruau, 1988) (fig. 3). When they are not protected by a stone pavement, soils are capped on almost all the slopes with a gradient lower than 20°. Grassland is overgrown with pine and juniper trees, which is an inconvenience to cattle grazing (Gentry, 1957; Boutrais, 1994; Poulenard, 1995; Viramontes, 1995) (see table 1); The pine forest is suffering severe deforestation due to the high level of wood consumption in Mexico (Durango state is the first supplier of wood to the nation).

Three experimental sites were selected to study the hydrodynamical behaviour of the soils (two on savanna: La Manga and El Aguaje; one under forest: La Rosilla). Thirteen plots (50 m²) and 28 microplots (1 m²) were installed to take into account the role of slope value, the presence of trees, and the litter, in the computation of runoff and sediment yield. Each site was equipped with at least one recording raingauge. Rainfall, runoff and soil losses were measured for each rainfall event during at least two years (Poulenard, 1995; Guedez, 1996; Henry, 1997; Bollery, 1998; Viramontes 2000).

Results are presented in tables 2 and 3. The correlation between, on the one hand, runoff and erosion, and on the

other hand, their explanatory variables are noticed in tables 4 and 5. The tables reveal that (i) runoff and soil loss values are significantly higher in wet years (1996) than in dry ones (1995); (ii) the presence of trees results in a strong reduction of erosion and runoff; (iii) oaks as well as oak litter seem to provide better protection to the soil than pine trees and their fallen needles; and (iv) slope gradients and the position of plots on the hillslope have no determining influence on runoff and sediment yield.

An Empirical Orthogonal Function (EOF analysis) was designed to determine the explanatory variables of both erosion and runoff for the forest site (fig. 2) and for grassland areas (fig. 3). The correlations are presented in tables 4 and 5. In the forest environment, runoff (CE) and erosion (ERO) are correlated (i) positively with soil surface crusting (CR) and apparent bulk density (DA); and (ii) negatively with litter cover (LIT), the coarse fraction (EG), organic matter, and silt content. Slope (PEN) and graminaceous cover (GRAM) are not correlated with erosion and runoff. In grassland areas, runoff (CE) is correlated (i) positively with crusting (CR), and (ii) negatively with the coarse fraction (EG) and stoniness (PIE). Erosion (ERO) is correlated positively with silt content (LIM) probably because this fraction of the soil texture is the more detachable. The soil loss is negatively correlated with the litter cover (LIT) and the poral space (EP), both variables increasing water infiltration and soil protection against the impact from raindrops.

The landscape and the physical properties of the soils explain the Hortonian behaviour of the hillslopes: (i) presence of bare soils subject to trampling by cattle and surface capping; (ii) widespread presence of crusts in forest as well as savanna; (iii) scarcity of baseflow and water-tables.

As is well known, trees and litter constitute good protection against the kinetic energy of raindrops (Fristch, 1990; Sorriso et al., 1994; Scott Munro and Huang, 1997; Croke et al., 1999). In the western Sierra Madre, oak trees remain small, and thus reduce erosion and runoff more effectively than pine trees. Runoff is inversely proportional to soil crusting: this is the key factor, as it has been demonstrated in other regions (Casenave and Valentin, 1989; Janeau and Ruiz, 1992; Tarin, 1992; Vandervaere, 1995; Janeau et al., 1999).

The role of Graminaceae is complex due to their distribution pattern. It is obvious that they protect the soil and increase infiltration rates, but this occurs only in the small area at the base of the grass tufts. The tufts are furthermore commonly located several centimetres above the lowered soil surface, which is incrustated and allows high runoff coefficients.

The role of stoniness clearly depends on the slope angle: on steep slopes, cobbles and blocks are loose and protect the soil from rainsplash. They can increase infiltration rates because they increase the heterogeneity of the soil matrix. On gentle slopes or plateaux, pebbles are commonly embedded, are integrated in the crust (in these instances a "gravel-crust"), and their presence results in an increased runoff coefficient.

The degradation of soils and vegetation in the Western Sierra Madre has changed the hydrodynamical behaviour of

the slopes and consequently the regimes of rivers. This could have repercussions downstream on the water balance of the whole of northern Mexico, and could threaten the future of the vast irrigated districts which depend entirely on the water supplied by the Sierra Madre.

Introduction

Les sols interviennent sur le cycle de l'eau du fait de leurs propriétés hydrauliques (capacité de stockage, conductivité hydraulique, sorptivité, etc.) qui ont des relations directes avec leurs caractéristiques physico-chimiques (texture, structure, porosité, matière organique, etc.). Cependant, toutes ces propriétés et caractéristiques sont facilement modifiables par les activités humaines, ce qui implique aussi une modification de la réponse hydraulique des sols.

Les études sur des parcelles et des bassins versants expérimentaux dans différentes régions climatiques du globe montrent une augmentation des écoulements lors des coupes forestières et des compactages des sols, surtout s'ils ont lieu sur de grandes superficies. Les nombreuses études qui ont porté sur ces interactions ont démontré ces faits en climat tropical humide, (Fristch, 1990 ; Calder *et al.*, 1995 ; Woo *et al.*, 1997 ; Scott Munro et Huang, 1997), en climat méditerranéen (Kosmas *et al.*, 1997 ; Sorriso *et al.*, 1994), en climat tempéré (Cosandey *et al.*, 1990 ; Galea *et al.*, 1993 ; Hudson et Gilman, 1993 ; Croke *et al.*, 1999) et en climat semi-aride et aride (Snelder et Bryan, 1995 ; Bergkamp, 1998). Malgré cette uniformité des réponses, les chercheurs intéressés par les processus avancent une diversité importante d'explications (Ambroise, 1998) ; celles-ci évoquent la part de la végétation, des sols, et des modifications du milieu elles-mêmes, tous facteurs qui interagissent dans le milieu naturel. Le cheminement de l'eau peut suivre des voies différentes et les flux fonctionnent de façon diverse dans le temps et dans l'espace. Le simple couple entrée (pluie) et sortie (ruissellement) de l'eau dans le bassin versant ne montre pas la forte complexité du cheminement que l'eau parcourt dans le système.

Cet article présente un double objectif : d'une part, mettre en évidence les agents et les processus responsables du ruissellement et de l'érosion dans un secteur montagnard du haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidentale) ; et d'autre part, essayer de comprendre si ces agents et processus peuvent expliquer les modifications du régime hydrologique des rivières déjà observées dans cette zone.

L'aire d'étude

L'aire d'étude est le haut bassin du Rio Nazas, dans le nord de l'État de Durango (Mexique), situé dans la Sierra Madre Occidentale, une chaîne montagneuse massive culminant en de nombreux points à plus de 3 000 m d'altitude. Cette sierra est parallèle à la côte du Golfe de Californie et à l'Océan Pacifique depuis la frontière des États-Unis vers le sud, sur une longueur de plus de 2 000 km (fig. 1). Constituée surtout de roches volcaniques acides du Tertiaire, elle représente la couverture ignimbritique continue la plus grande du monde

(Demant et Robin, 1975 ; McDowell et Clabaugh, 1979). D'une manière générale, les sols sont peu à moyennement profonds (en général de 10 à 50 cm) et ont des capacités de stockage d'eau faibles, de 119 à 125 mm (Viramontes 1995).

Du fait de la latitude, le climat de la Sierra Madre Occidentale peut être rattaché à l'ensemble des climats subtropicaux secs ; cependant, la proximité du Pacifique et la position de la Convergence Intertropicale donnent à cette région un régime pluviométrique tropical, avec une saison des pluies en été qui représente plus de 80 % du total annuel et environ huit mois secs (Nouvelot et Descroix, 1996). L'altitude apporte des modifications propres aux climats de montagne : gel hivernal, amplitudes thermiques journalières fortes, pluviométrie bien plus abondante qu'en plaine. Le déplacement des masses d'air est typiquement subtropical mais présente de grandes variabilités régionales dues essentiellement à une topographie très contrastée.

La Sierra Madre Occidentale dans son ensemble est un véritable château d'eau pour tout le Nord-Ouest mexicain ; c'est une grande région d'élevage et la principale aire de production de bois du pays (Descroix *et al.*, 1994 ; Gonzalez Barrios et Descroix, 2000). Cependant, l'état de dégradation lié au surpâturage et à la déforestation est sévère (Poulenard *et al.*, 1996 ; Rodriguez, 1997 ; Barral et Anaya, 1995 ; Descroix et Nouvelot, 1997 ; Viramontes et Descroix, 2000). La situation se résume ainsi : d'une part, la charge de bétail est trois à quatre fois supérieure à la capacité réelle des terroirs (Barral et Anaya, 1995) ; et d'autre part, la demande en bois d'œuvre pour le marché est bien supérieure à la capacité renouvelable des forêts de la Sierra (Viramontes, 2000). Cette demande en ressources naturelles, supérieure aux possibilités du milieu, engendre une forte pression sur les pâturages et les forêts de la Sierra Madre Occidentale. Cette surexploitation ne représente-t-elle pas un danger pour l'équilibre du milieu et la pérennisation de ses ressources en eau ?

Les pâturages dominent les paysages jusqu'à 2 000 m d'altitude ; ils sont ensuite relayés par une savane d'altitude piquetée de chênes. Au-dessus de 2 400 mètres, les forêts de chênes se ferment, la proportion de pins augmente avec l'altitude et ce jusqu'à 2 700 mètres, altitude au-dessus de laquelle cette dernière espèce domine (parfois accompagnée de sapins) en formation plus serrée, du fait d'une pluviométrie supérieure (jusqu'à 1 000 mm sur les crêtes).

Des études de tendance sur le fonctionnement hydrodynamique des versants de cette partie de la Sierra Madre montrent que, malgré les changements physiques dus aux activités humaines, les coefficients d'écoulement des grands bassins versants semblent ne pas avoir été modifiés sensiblement. Néanmoins, on remarque une modification du régime hydrologique des rivières (Viramontes et Descroix, 2000 ; Viramontes, 2000) : la comparaison entre les coefficients d'écoulement de base et de crue montre une diminution de l'écoulement de base, et l'on constate également une diminution des temps de réponse des bassins ; par ailleurs, les temps de ressuyage des sols après les précipitations diminuent.

La problématique de cette recherche est de comprendre les processus qui lient la dégradation observée des pâturages

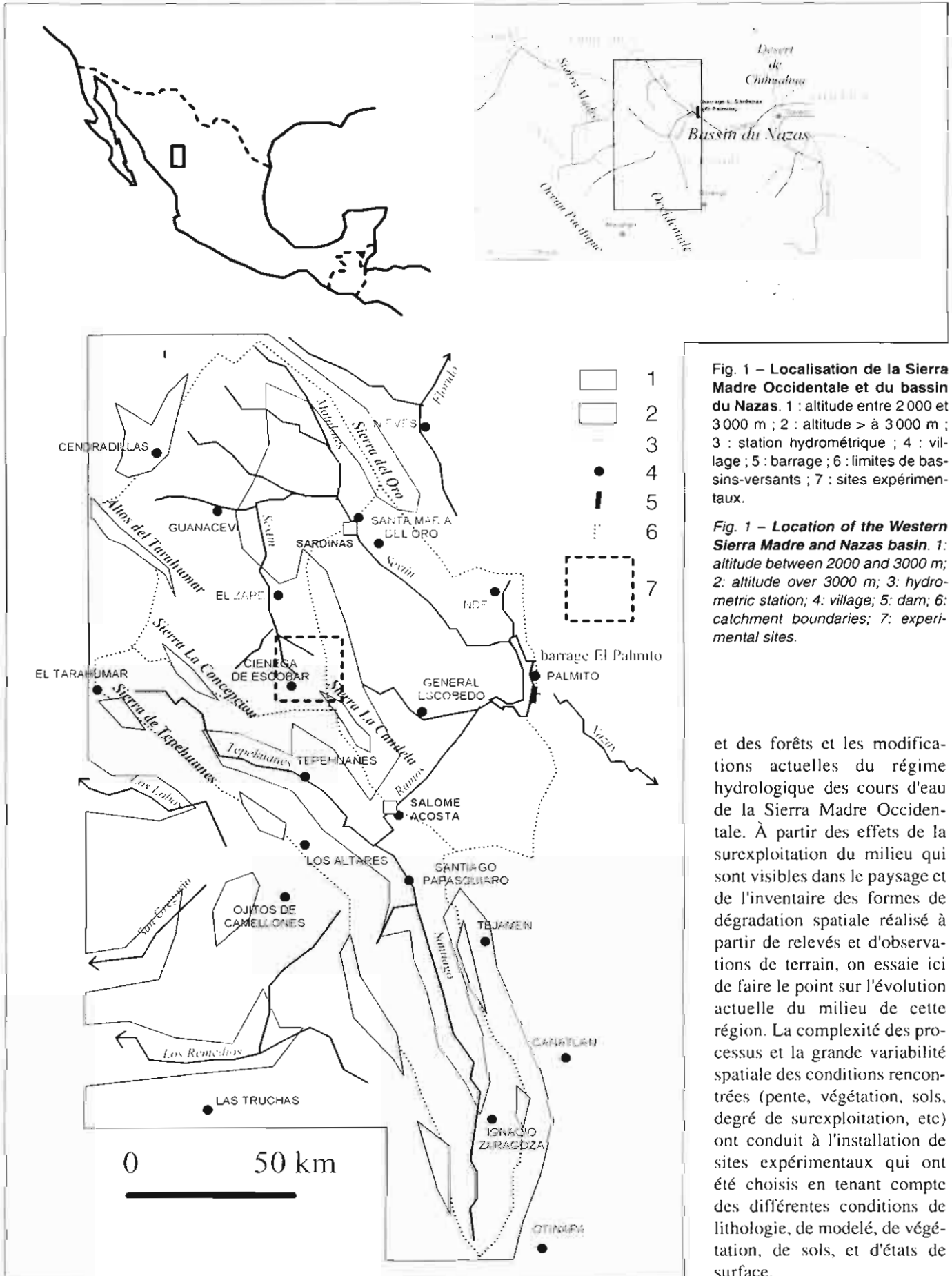


Fig. 1 – Localisation de la Sierra Madre Occidentale et du bassin du Nazas. 1 : altitude entre 2 000 et 3 000 m ; 2 : altitude > à 3 000 m ; 3 : station hydrométrique ; 4 : village ; 5 : barrage ; 6 : limites de bassins-versants ; 7 : sites expérimentaux.

Fig. 1 – Location of the Western Sierra Madre and Nazas basin. 1: altitude between 2000 and 3000 m; 2: altitude over 3000 m; 3: hydro-metric station; 4: village; 5: dam; 6: catchment boundaries; 7: experimental sites.

et des forêts et les modifications actuelles du régime hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre Occidentale. À partir des effets de la surexploitation du milieu qui sont visibles dans le paysage et de l'inventaire des formes de dégradation spatiale réalisé à partir de relevés et d'observations de terrain, on essaie ici de faire le point sur l'évolution actuelle du milieu de cette région. La complexité des processus et la grande variabilité spatiale des conditions rencontrées (pente, végétation, sols, degré de surexploitation, etc) ont conduit à l'installation de sites expérimentaux qui ont été choisis en tenant compte des différentes conditions de lithologie, de modelé, de végétation, de sols, et d'états de surface.



Photo 1 – Ravines sur les versants dénudés par le surpâturage, près d'un village de la Sierra Madre. Le creusement est bloqué à 30 ou 50 cm, dès que la roche mère est atteinte (rhyolite).

Photo 1 – Gullies close to a village in the Western Sierra Madre. Their depth is limited (30 to 50 cm) by the underlying bedrock (rhyolite).

Les marques de la dégradation du milieu dans le paysage

Les marques de dégradation du milieu se manifestent sous différentes formes. Les traces d'incision et d'érosion linéaire (rigoles, ravines) sont localisées aux alentours des villages actuels et des anciens villages abandonnés, ainsi que dans certaines zones de culture. Les principaux ravinements se trouvent dans les zones plates à sol profond comme dans la dépression de la Cienega de Escobar. Dans ce cas, les ravines ont une longueur de plusieurs centaines de mètres et peuvent avoir une profondeur de plus de 5 mètres (Descroix *et al.*, 2000). Dans les zones pentues, la roche mère est vite atteinte, ce qui y freine le creusement et explique la faible extension du ravinement superficiel (photo 1). Les ravines témoignent d'une activité érosive ancienne mais persistante bien que très localisée.

Du fait des substratums résistants dans l'ensemble de la région (ignimbrites rhyolitiques et tufs conglomératiques) et

voient les touffes s'espacer, les plantes annuelles remplacer les graminées, la proportion de pierres croître en surface. Dans les zones habitées et surpâturées, les versants entièrement caillouteux et dénudés, sont dépourvus de végétation. Sur les pentes fortes apparaissent des "terrassettes" liées au piétinement du bétail, tels les "pieds de vaches", ainsi que d'autres formes liées au surpâturage que l'on observe dans d'autres régions de montagne comme les Alpes et les Andes (Serrate, 1978 ; Derruau, 1988, De Noni *et al.*, 2001). Un versant à terrassettes est donc un versant présentant sur toute ou partie de son étendue une série de replats de petite taille (photo 2) correspondant aux chemins empruntés par le bétail et se présentant sous forme d'un ensemble de marches. L'analyse des résultats de quatre versants représentatifs de la région étudiée permet de considérer le facteur pente comme l'élément essentiel responsable de la disposition et des formes de ces terrassettes (Poulenard *et al.*, 1996). La lithologie a une influence sur les pentes limites, maximales et minimales sur lesquelles on rencontre ces formes ; sur les

ignimbrites rhyolitiques, les terrassettes se forment sur des pentes de 21 à 45°, sur les tufs conglomératiques, on les trouve sur des pentes de 15 à 37°.

L'évolution de la végétation est un autre élément essentiel pour comprendre et analyser les phénomènes de dégradation du milieu. D'après J. Boutrais (1994), "mieux que les sols, l'état de la végétation signe l'ampleur des perturbations



Photo 2 – Terrassettes de surpâturage dans les parcours sous chênes. Au premier plan, un versant caillouteux envahi par des pins et des genévriers

Photo 2 – Terraces due to overgrazing under "oak savanna". In the foreground, a stony slope overgrown with pines and junipers.

de l'environnement par l'élevage". Les inventaires de végétation des zones dégradées effectués sur photographie aérienne (1974) et sur le terrain (1994), présentés par J. Poulenard (1995) apparaissent dans le tableau 1. On observe une augmentation importante du nombre d'arbres (surtout des pins de petite taille) sur les sites sélectionnés. Cette "reforestation naturelle" semble bien être ici le signe d'une dégradation des pâturages, telle la "dégradation verte" décrite par J. Boutrais (1994). L'explication présentée par D. Viramontes (1995) dans cette zone a aussi été développée dans d'autres régions par H. S. Gentry (1957) et J. Boutrais (1994) ; ce dernier la décrit ainsi : "à des grandes graminées très recherchées par le bétail succèdent d'abord d'autres graminées de grande taille moins appréciées. Si la pression pastorale se poursuit, les grandes graminées se raréfient, au profit de graminées basses ou de petites plantes non consommées. Du côté des ligneux, l'évolution est inverse, avec une multiplication d'arbustes, à mesure que les herbes se raréfient et que la pâture s'accroît. La prolifération d'arbustes nouveaux ne représente qu'un stade transitoire vers l'installation d'arbres issus de la zone forestière : dès lors le pâturage a disparu...". La pression pastorale exerce une action de sélection des espèces par diminution de la concurrence naturelle entre les espèces appétentes et celles qui ne le sont pas. La surcharge pastorale dans les prairies et les savanes favorise ainsi le développement des jeunes pins qui n'ont plus de concurrence, ne sont pas broustés et qui sont les indicateurs biologiques de la dégradation du milieu. Inversement on ne trouve que très peu de jeunes chênes (espèce climacique), ceux-ci étant mangés par le bétail.

Dans les zones forestières, éloignées des villages et à des altitudes plus élevées, le déboisement montre une situation contraire à celle des zones de pâturage excessif : les arbres se raréfient. D'après le travail réalisé par M.G. Rodriguez (1997), à partir des images satellitales sur les Unités d'Administration Forestières (UAF) de Tepehuanes et Guanacevi (fig. 1), la déforestation est rapide. Entre 1972 à 1992, la superficie couverte par la forêt a diminué de 60 % et les formations de savane ouverte voire les espaces dépourvus de végétation gagnent du terrain.

Le paysage de la Sierra Madre Occidentale évolue vers une dégradation et une diminution de la capacité de production en fourrages et en bois. Cette évolution modifie les caractéristiques physiques des sols et de la végétation, ce qui pourrait avoir des conséquences hydriques au niveau local et régional.

Ruissellement et pertes en sol sur parcelles expérimentales

Trois sites de mesures expérimentales ont été choisis en fonction de leur représentativité du milieu : le site "La Rosilla" sur les ignimbrites rhyolitiques en milieu forestier, les sites "El Aguaje" (sur ignimbrites rhyolitiques) et "La Manga" (sur tufs conglomératiques) correspondant à des milieux de pâturages. Dans chacun de ces sites ont été installées des parcelles expérimentales de 1 m² en nombre suffisant pour pouvoir connaître l'influence d'un certain nombre de variables. Chaque parcelle est équipée d'un collecteur rassemblant toute l'eau écoulée et sa charge solide dans un récipient de 50 litres. Après chaque précipitation, le volume total ruisselé ainsi que le poids de matériaux solides arrachés à la parcelle ont été notés, et ce pendant au moins deux ans, soit l'enregistrement d'un minimum de 50 événements pluvieux par parcelle. Vingt-huit parcelles ont été installées : 14 en milieu forestier et sur substrat ignimbritique (site La Rosilla), et 14 en zone de pâturages, 7 d'entre elles sur ignimbrites (site El Aguaje) et les 7 autres sur des conglomérats et des tufs interstratifiés (site La Manga).

Dans la zone de forêt, les microparcelles vont par paires. Chaque fois, l'une est installée sous un arbre, son homologue est à quelques mètres, dans des conditions similaires de pente et de litière, mais sans être située sous un arbre. On a profité de l'existence de clairières et de coupes dans cette forêt relativement dense malgré les huit mois de saison sèche. Les deux types d'arbres considérés sont les pins et les chênes. Trois classes de pente ont été prises en compte, ce qui correspond à douze parcelles. Par ailleurs, deux microparcelles de référence ont été mises en place, l'une est près d'un pin, l'autre d'un chêne mais sans la protection d'un arbre et en l'absence de litière. Le suivi des mesures expérimentales a été effectué pendant la saison des pluies de 1995 (Guedez, 1996) et 1996 (Henry, 1997). Dans la zone de pâturages, les microparcelles ont été installées sur des sites représentatifs des versants et bien dégagés des zones arborées afin de ne pas perturber la mesure de la pluviométrie ; ces parcelles ont été suivies en 1996 et 1997. Les tableaux 2 et 3 montrent les résultats annuels du ruissellement et de l'érosion selon le type de milieu. Globalement, on remarque que les valeurs de ruissellement et l'érosion ont nettement augmenté en 1996 (une année légèrement excédentaire avec une pluviométrie de 510 mm) par rapport à 1995 (année fortement déficitaire, avec 285 mm de précipitations). Les valeurs de coefficient de ruissellement sont comprises entre 1,25 et 11,3 % en 1995 contre

Site	Lithologie	Exposition	Nombre d'arbres (1974)	Nombre d'arbres (1994)	Dont arbres jeunes (1994)*
La Manga	Tufs	Ouest	427	1139	475
Boleras	Tufs	Nord	139	467	71
Escobar	Ignimbrites	Sud	175	740	270
El Aguila	Ignimbrites	Est	144	212	23

* jeunes arbres de taille inférieure à 2 mètres. *Young trees up to 2 metres height.*

Tableau 1 – Évolution du nombre d'arbres sur quatre versants entre 1974 et 1994 (d'après Poulenard, 1995).

Table 1 – Evolution of numbers of trees on four slopes between 1974 and 1994 (after Poulenard, 1995).

Facteur		Nombre de parcelles	Coefficient de ruissellement en %		Taux d'érosion en g/m ²	
			1995	1996	1995	1996
Arbre	Arboré	6	1,25	4,52	17,57	108,3
	Sans	6	7,09	12,13	29,37	204,72
Type d'arbre	Pin	7	7,08	11,34	79,57	140,37
	Chêne	7	1,89	5,56	41,77	94,55
Litière	Mince	3	11,27	14,33	157,4	265,96
	Moyenne	3	3,33	8,36	73,07	163,59
	Épaisse	8	2,38	6,28	19,75	44,47
Pente	Faible	6	3,86	9,17	22,77	76,95
	Moyenne	4	7,38	10,69	119,7	199,57
	Forte	4	2,53	6,64	58,5	96,12

Tableau 2 – Ruissellement (mm), coefficient de ruissellement (%) et érosion (g/m²) par groupe de parcelles de la zone forestière.

Table 2 – Runoff depth (mm), runoff coefficient (%) and erosion rate (g/m²) for the pool of plots in the forested areas.

Tableau 3 – Ruissellement et érosion selon certaines variables en zone de pâturages.

Table 3 – Runoff and erosion depending on several factors in the grassland areas.

4,5 à 14,3 % en 1996 ; les pertes en sol vont de 17,5 à 157 g/m² en 1995 et de 44 à 266 g/m² en 1996. Par ailleurs, la présence des arbres permet une forte réduction de l'écoulement superficiel et de l'érosion. Le type d'arbre joue également un rôle important : contre le ruissellement et l'érosion la protection du chêne est meilleure que celle du pin. Enfin, la litière de chêne assure une meilleure protection contre l'érosion que celle du pin. Les zones dépourvues de litière sont les plus favorables au ruissellement, surtout sous la pinède. Concernant la lithologie, les versants inscrits dans les ignimbrites sont plus sensibles au ruissellement et à l'érosion que les versants dans les tufs. Enfin, ni la valeur de la pente ni la position de la parcelle sur le versant ne jouent un rôle évident vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion, à l'échelle de 1 m².

À partir de là on s'intéresse plus particulièrement aux facteurs et aux processus hydrodynamiques du sol responsables directs du ruissellement et de l'érosion. Il s'agit de bien comprendre le fonctionnement hydrologique des sols et de leur surface, de comparer les résultats des différents sites entre eux, et de les confronter aux conclusions d'autres auteurs. Ainsi, à partir d'observations sur le terrain et d'analyses de laboratoire, une caractérisation physique des sols des micro-parcelles a été réalisée. Compte tenu des résultats de J. Poulé (1995) et P.Y. Guedez (1996) sur cette zone et de ceux qui sont tirés de la bibliographie spécialisée (Casenave et Valentin, 1989 ; Poesen *et al.*, 1994), l'étude des états de surface du sol a été privilégiée, car c'est elle qui s'est avérée être la plus synthétique pour exprimer les conditions de ruissellement et de départ des particules.

L'ensemble des variables considérées se trouve dans les tableaux 4 et 5. On a tenu compte de tout ce qui est mesurable en surface (pente, végétation, litière, encroûtement, pierrosité) et des paramètres mesurés en laboratoire (densité réelle et apparente, texture, espace poral, matière organique). Dans le cas des pâturages, du fait de leur état de dégradation, on a distingué les graminées des plantes

Type de milieu		Nombre de parcelles	Coefficient de ruissellement (%)	Érosion (g/m ²)
Lithologie	Tufs	7	31,66	256,10
	Ignimbrites	7	40,91	320,07
Position dans le versant	Haut	5	37,98	259,50
	Mi-	5	38,27	267,98
	Bas	4	31,69	348,96
Pente	Faible	3	33,82	179,42
	Moyenne	7	39,52	329,60
	Forte	4	32,58	296,94

annuelles, de plus en plus dominantes dans les secteurs dégradés. Pour chacune des deux zones expérimentales (forêt et pâturages), on a réalisé une analyse en composantes principales (ACP) des caractéristiques spatiales des parcelles dans laquelle on a introduit le ruissellement et l'érosion (données totales annuelles).

Dans la zone de forêt, les trois premiers axes expliquent 84 % de la variance des paramètres des micro-parcelles (fig. 2). Dans la zone de pâturages (sites El Aguaje et La Manga), on observe que les trois premières composantes de l'ACP expliquent 69 % de la variance (fig. 3).

Dans la forêt, les facteurs fortement corrélés sont le ruissellement (CE), l'érosion (ERO), l'encroûtement (CR) et la densité apparente (DA) ; ils forment un nuage dans l'espace des variables de l'ACP (fig. 2). Dans la direction opposée, on observe le groupe formé par les paramètres que sont la litière (LIT) et la matière organique (MO). Ces paramètres sont corrélés de manière inverse par rapport au ruissellement et à l'érosion ce qui montre leurs propriétés anti-érosives. Le taux de matière organique est corrélé positivement avec la litière et inversement corrélé avec la croûte gravillonnaire et la densité apparente. La pente (PEN), les graminées (GRAM), ainsi que les éléments texturaux (argile, limon et sable) ne jouent pas un rôle primordial sur l'écoulement ou l'érosion.

Variable (cf. fig. 3)	Unité	Méthode de mesure	Coeff. ruissellement (CE)		Érosion (ERO)	
			N = 14		N = 14	
			r	r ²	r	r ²
Pente (PEN)	Degré °	Clisimètre	-0,23	0,05	0,27	0,08
Graminées (GRAM)	%	Points quadrats	0,02	0,00	-0,18	0,03
Annuelles (ANN)		Points quadrats	0,29	0,09	0,28	0,08
Litière (LIT)	%	Points quadrats	-0,53	0,28	-0,71	0,50
Encroûtement (CR)	%	Points quadrats	0,72	0,51	0,36	0,13
Éléments gross. (EG)	%	Points quadrats	-0,39	0,15	0,24	0,06
Densité App. (DA)	g/cm ³	Piscine	-0,46	0,21	0,12	0,01
Densité Réelle (DR)	%	Pycnomètre	-0,50	0,25	-0,22	0,05
Espace Poral (EP)		(DR - DA)/DR*100	-0,09	0,01	-0,26	0,07
Mat. Organique (MO)	%	Méth. Walkley Black*	0,28	0,08	0,08	0,01
Pierres (PIE)	%	Granulométrie	-0,58	0,33	0,14	0,02
Sable (SAB)	%	Méth. Bouyoucos*	-0,20	0,04	-0,20	0,04
Argile (ARG)	%	Méth. Bouyoucos*	0,21	0,05	0,13	0,02
Limon (LIM)	%	Méth. Bouyoucos*	0,09	0,01	0,31	0,09

* In Plenecassagne *et al.* (1997)
Les valeurs de r (coefficient de corrélation) supérieures à 0,5 sont signalées en gras.

Tableau 4 – Matrice des corrélations entre les caractéristiques des parcelles de la zone forestière.

Table 4 – Correlation coefficients of plots characteristics in the forested areas.

Variable (cf. fig. 2)	Unité	Méthode de mesure	Coeff. ruissellement (CE)		Érosion (ERO)	
			N = 14		N = 14	
			r	r ²	r	r ²
Pente (PEN)	Degré °	Clisimètre	-0,11	0,01	0,03	0,0009
Graminées (GRAM)	%	Points quadrats	-0,35	0,12	-0,44	0,19
Litière (LIT)	%	Points quadrats	-0,61	0,37	-0,69	0,48
Encroûtement (CR)	%	Points quadrats	0,83	0,69	0,97	0,94
Éléments gross. (EG)	%	Points quadrats	0,80	0,64	0,7	0,49
Densité App. (DA)	g/cm ³	Piscine	0,71	0,5	0,67	0,45
Mat. Organique (MO)	%	Méth. Walkley Black*	-0,54	0,29	-0,54	0,29
Sable (SAB)	%	Méth. Bouyoucos*	0,18	0,03	0,34	0,12
Argile (ARG)	%	Méth. Bouyoucos*	0,15	0,02	-0,02	0,004
Limon (LIM)	%	Méth. Bouyoucos*	-0,44	0,19	-0,43	0,18

* In Plenecassagne *et al.* (1997).
Les valeurs de r (coefficient de corrélation) supérieures à 0,5 sont signalées en gras.

Tableau 5 – Matrice des corrélations entre les caractéristiques des parcelles installées dans des pâturages.

Table 5 – Correlation coefficients of plot characteristics in the grassland areas.

L'espace des variables de l'ACP de la zone de pâturages (fig. 3) permet de constater que le coefficient de ruissellement (CE) est toujours à côté de l'encroûtement (CR). Le groupe formé par les paramètres d'éléments grossiers, pierrosité et pente se trouve dans le secteur opposé au ruissellement, c'est-à-dire que les surfaces du sol encroûtées sont nettement plus sujettes au ruissellement, alors que l'infiltration domine dans les zones caillouteuses. L'érosion (ERO) se trouve isolée sur les graphiques, mais elle est opposée à la litière (LIT) et l'espace poral (EP). Ce qui confirme le caractère anti-érosif de la litière. Les sols comportant une forte litière présentent en général d'importants espaces poraux, ce qui explique la présence de ces deux paramètres toujours ensemble dans l'espace des variables. Les pourcentages de pierres contenues dans la matrice du sol sont aussi très bien corrélés avec les éléments grossiers superficiels ($r^2 = 0,7$) ; ils sont aussi toujours

ensemble dans l'espace des variables de l'ACP, ce qui montre que les zones caillouteuses en surface le sont aussi en profondeur. Les pierres superficielles et les pierres des horizons sous jacents forment un ensemble homogène très filtrant. La pente ne montre de corrélation ni avec le ruissellement ni avec l'érosion. Cependant, elle est bien corrélée avec la pierrosité et les éléments grossiers, à savoir que les zones à forte pente sont caillouteuses, et donc plus perméables. À l'exception des pierres mêlées à la matrice du sol, les paramètres granulométriques ne se corrélaient ni avec le ruissellement ni avec l'érosion, ce qui laisse à penser que bien plus que les éléments physiques du sol, c'est leur disposition qui conditionne le ruissellement. Pour le déclenchement du ruissellement, la structure du sol, synthétisée ici par les valeurs de la densité apparente, et sa teneur en matière organique ainsi que la litière sont donc bien plus déterminantes que la texture du sol.

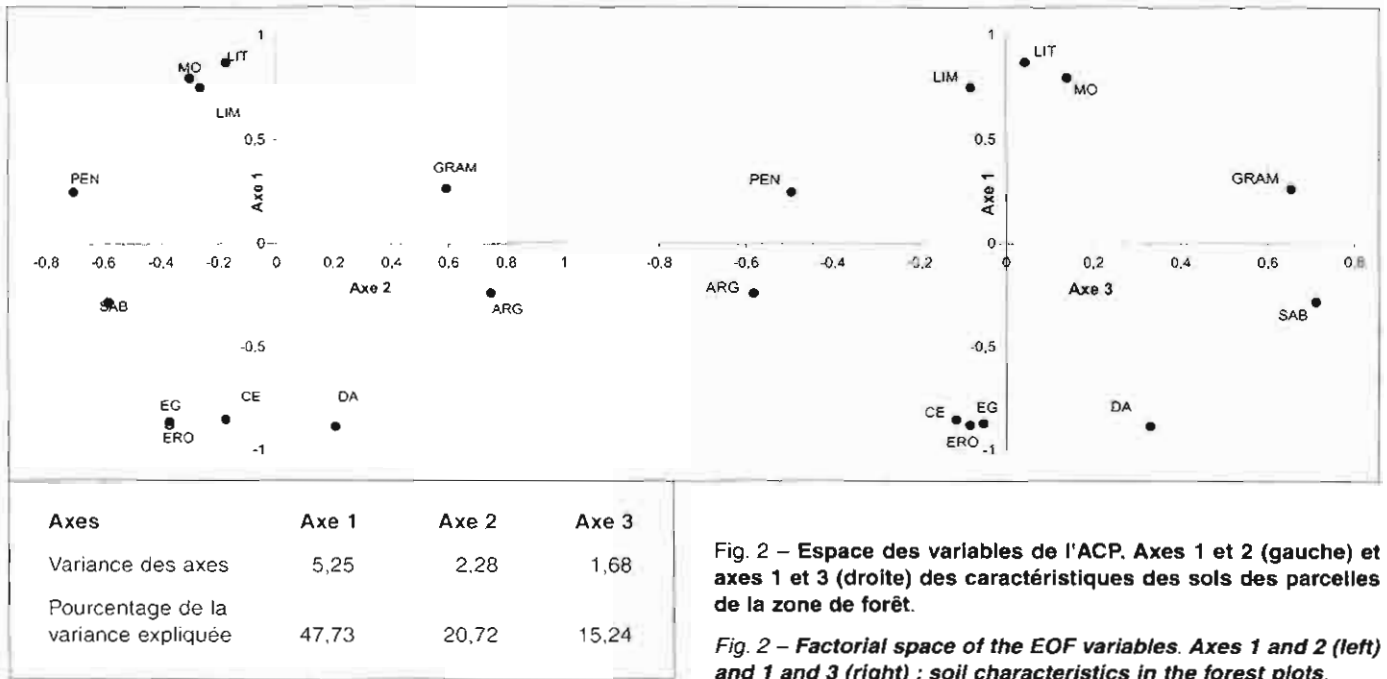


Fig. 2 – Espace des variables de l'ACP. Axes 1 et 2 (gauche) et axes 1 et 3 (droite) des caractéristiques des sols des parcelles de la zone de forêt.

Fig. 2 – Factorial space of the EOF variables. Axes 1 and 2 (left) and 1 and 3 (right) : soil characteristics in the forest plots.

Le rôle des différents paramètres du sol dans la formation du ruissellement

En général, l'ensemble des caractéristiques physiques et des observations expérimentales expriment un comportement typiquement hortonien (Horton, 1933). Cela signifie que le ruissellement se produit quand l'intensité de la pluie dépasse les capacités d'infiltration du sol. À l'échelle des bassins versants, les secteurs de pâturages de la Sierra Madre présentent la plupart des caractéristiques des milieux soumis à ce comportement hydrologique, c'est-à-

dire un milieu au sol en partie découvert, soumis au piétinement du bétail et à l'encroûtement, un encroûtement des sols sur tous les milieux (de la forêt et de la zone de pâturage), des cours d'eau secondaires intermittents ; on observe peu d'écoulement de base sur les principaux cours d'eau, de même qu'une certaine indigence des écoulements de sub-surface et des nappes perchées. Cependant, le comportement hortonien pourrait ne pas être la seule forme d'écoulement. A. Bollery (2000) a remarqué certains flux de sub-surface dans la zone d'étude lors de périodes pluvieuses prolongées. L'importante variation spatio-temporelle des

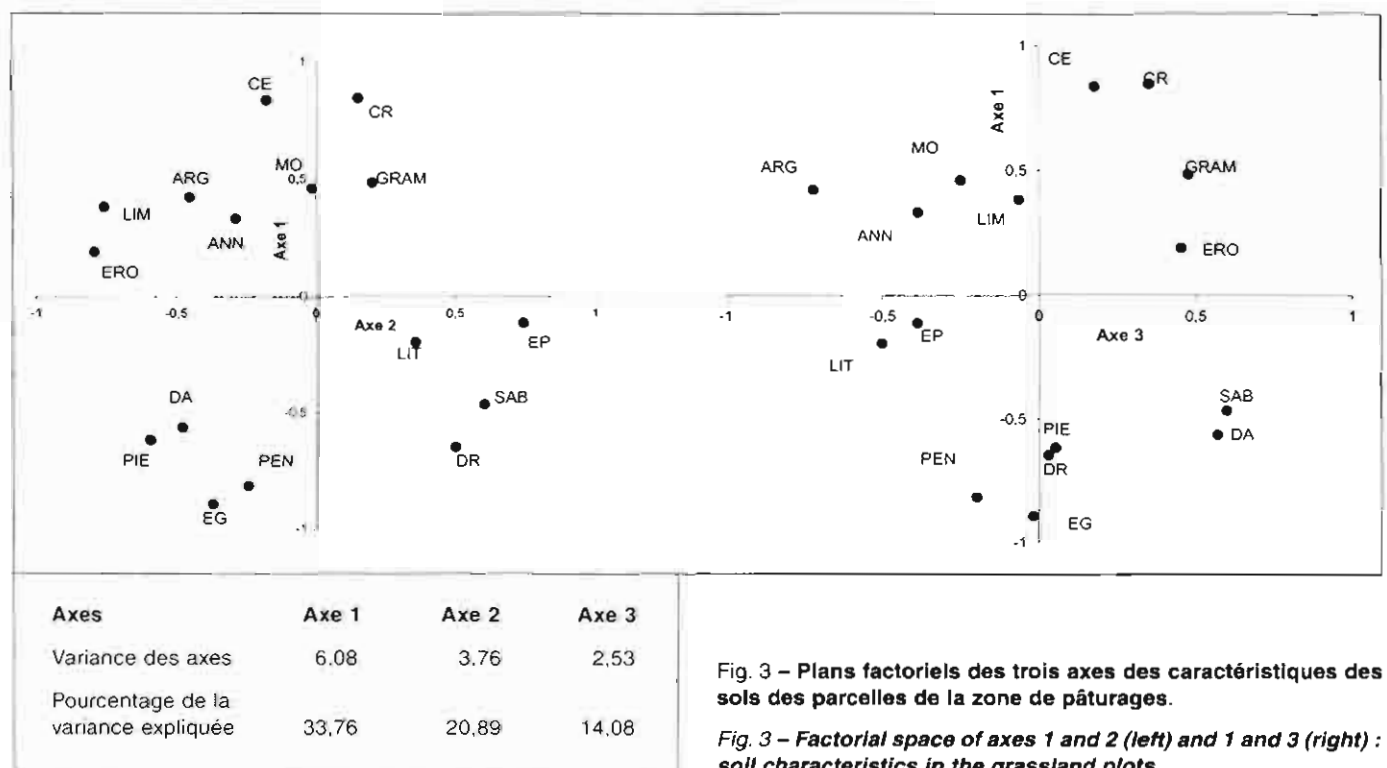


Fig. 3 – Plans factoriels des trois axes des caractéristiques des sols des parcelles de la zone de pâturages.

Fig. 3 – Factorial space of axes 1 and 2 (left) and 1 and 3 (right) : soil characteristics in the grassland plots.

pluies et la diversité des sols de la zone pourrait les expliquer.

À l'échelle de la parcelle expérimentale, comme plusieurs auteurs qui ont travaillé sur des parcelles expérimentales en différentes forêts du globe (Fristch, 1990 ; Sorriso *et al.*, 1994 ; Scott Munro et Huang, 1997 ; Croke *et al.*, 1999), on a constaté que les arbres et la litière constituent un régulateur des écoulements et un écran protecteur contre l'impact des gouttes de pluies sur la surface du sol. L'eau de la pluie qui arrive au sol, après avoir traversé la frondaison des arbres hauts de 4 à 15 m dans la Sierra Madre, présente une énergie cinétique beaucoup plus faible que la pluie qui tombe directement sur le sol. Les chênes de la zone d'étude sont plus petits, par conséquent les gouttes d'eau n'ont pas la hauteur de chute requise pour acquérir une nouvelle énergie cinétique importante ; en outre durant la période des pluies, leur feuillage présente une surface d'interception plus grande que celui des pins. Pour cette raison, les parcelles expérimentales ont démontré que la protection des chênes est meilleure que celle des pins.

La litière agit comme une couche protectrice contre le ruissellement et l'érosion. Cette couche présente la protection maximale car elle absorbe l'énergie cinétique qu'ont pu acquérir les gouttes d'eau. En outre, en absorbant une partie de l'eau, la litière permet que la capacité d'absorption du sol ne soit pas dépassée rapidement ; elle agit donc comme un régulateur de l'humectation du sol. Les nombreux micro-barrages qu'elle peut contribuer à former sur le micro-relief permettent aussi de diminuer la vitesse du ruissellement. La litière empêche également la formation d'une croûte superficielle. De plus, lorsqu'elle est en cours de décomposition, elle facilite la formation d'une couche de matière organique dans les premiers horizons du sol. L'activité biologique engendre une bonne structure qui facilite l'infiltration.

Contrairement à la litière, l'encroûtement des sols détermine en grande partie l'ampleur du ruissellement. Cela concorde avec les observations déjà faites dans le monde sur l'effet des croûtes superficielles (Casenave et Valentin, 1989 ; Janeau et Ruiz, 1992 ; Tarin, 1992 ; Vandervaere, 1995 ; Janeau *et al.*, 1999). Dans la forêt comme dans les pâturages de la zone d'étude, la présence d'une croûte en surface ou d'un sol induré contribue au déclenchement du ruissellement. Dans la forêt, l'encroûtement se forme sur les zones dépourvues de végétation et de litière, là où la roche mère n'est pas atteinte par l'érosion. Dans la zone de pâturages, les touffes de graminée de quelques dizaines de centimètres de diamètre n'assurent qu'une faible perméabilité du sol ; de ce fait, les sols encroûtés sont bien plus répandus, surtout sur les zones plates en haut et en bas des versants. Ils sont dus à l'extension des secteurs dénudés du fait du piétinement du bétail et du surpâturage (qui accroît l'effet du splash). Les plages de sols nus entre les touffes de graminées sont de plus en plus vastes, et peu protégées (seulement en fin de saison des pluies) par les plantes annuelles. Toutefois, le rôle joué par les croûtes dans les processus érosifs n'est pas toujours évident à déterminer dans la zone de pâturages. En effet, la grande cohésion des particules ne permet pas leur détachement, mais la très faible perméabilité auto-

rise le développement rapide du ruissellement qui peut acquérir une capacité érosive importante (effets de vitesse, turbulence, charge) qu'il peut exercer à l'aval sur des surfaces plus fragiles.

Les graminées sont localisées de manière espacée sur des sols encroûtés et le seul site perméable est le sol situé directement en dessous des touffes. Ce site est suffisamment poreux pour permettre l'infiltration de l'eau de pluie qui tombe directement sur la touffe ou de l'eau qui ruisselle depuis le haut de la parcelle et qui aurait atteint une épaisseur suffisante pour accéder à cette zone poreuse. Le système racinaire des graminées et l'activité faunique de cette zone sont les éléments responsables de cette porosité. En revanche, la faible couverture des feuilles des graminées, même durant la période pluvieuse, n'assure pas une bonne protection des sols. Les graminées de la zone ne développent pas une couverture végétale épaisse mais de longues feuilles très fines à travers lesquelles on peut toujours voir le sol. La diminution de l'impact des gouttes de pluie est faible et lors de l'apparition du ruissellement en nappe, la protection est réduite, car le ruissellement prend place comme agent érosif principal. En effet, même si la végétation s'est développée avec les précipitations, la seule zone bien protégée contre l'érosion est la touffe elle-même.

Le rôle tenu par les plantes annuelles est plus complexe (tab. 5 et fig. 3). Le développement des plantes saisonnières est associé à un système racinaire très superficiel (de 1 à 3 cm) s'étendant horizontalement plus que verticalement. Les plantes annuelles se développent de manière isolée et aléatoire, mais on sait qu'elles sont un indicateur du surpâturage car elles prennent la place des graminées pérennes (Casenave et Valentin, 1989). Sur les sols organiques à litière importante (près des arbres surtout), la couverture végétale annuelle contribue à la protection du sol en tenant le rôle initial de la litière. Cependant, sur des sols plus minéraux et encroûtés, les plantes annuelles n'assurent pas la pénétration de l'eau dans le sol (Bollery, 1999 ; Boyer, 1999). De plus, les plantes développées sur des sols minéraux ne protègent pas le sol de l'érosion du fait de leur faible couverture foliaire.

Les sols à surface caillouteuse ont un impact ambivalent (Ruiz Figueroa et Valentin, 1983). D'une part, les pierres empêchent l'infiltration directe des gouttes de pluie et d'autre part, elles peuvent aussi augmenter les valeurs d'infiltration car elles absorbent l'énergie cinétique de la pluie (Poesen et Lavee, 1994 ; Valentin, 1994). Les pierres à la surface du sol absorbent l'impact des gouttes de précipitations et permettent une diminution de l'effet de splash sur les sols en protégeant la matrice. De plus, l'ensemble des éléments grossiers de la matrice du sol permet l'infiltration de l'eau tombant directement ou provenant d'une lame d'eau ruisselée du haut du versant. Nous avons pu observer que les zones caillouteuses ont en général, une macroporosité importante et une activité faunistique développée sous les cailloux, qui peut assurer l'infiltration et la conductivité hydraulique. Enfin, pendant la pluie, on observe l'éclatement des gouttes sur les pierres et le ruissellement de l'eau sur celles-ci jusqu'aux secteurs plus perméables situés dessous.

D'autres études sur ces sites expérimentaux avec des parcelles de 50 m² ont montré qu'il n'y avait pas de relations entre la pente et les coefficients de ruissellement et l'érosion (Descroix et Nouvelot, 1997 ; Descroix *et al.*, 2001). La pente ne joue pas un rôle clair sur le ruissellement et l'érosion, mais elle permet de mieux comprendre le rôle de la pierrosité. En effet, les versants en forte pente sont aussi les secteurs les plus caillouteux et donc les plus perméables. Si ces zones caillouteuses ne sont pas aujourd'hui affectées par un ruissellement important, elles pourraient résulter d'un héritage. Sous des climats aux précipitations plus copieuses, l'activité érosive ancienne a pu contribuer à la mise à nu des éléments grossiers, favorables à l'infiltration actuelle. Les éléments fins du sol ont contribué à la formation des sols profonds à la base des versants (plus de 1 m de profondeur), et dans les vallées (plus de 2 m de profondeur localement). Les éléments grossiers plus lourds sont restés sur place et ils ont formé les sols caillouteux des pentes de la Sierra Madre. C'est donc un processus qui s'auto-limite : sur les pentes fortes le ruissellement et l'érosion ont engendré des sols caillouteux plus filtrants qui limitent maintenant le ruissellement et les effets du splash.

La texture du sol n'est pas un facteur explicatif net du ruissellement et de l'érosion. En revanche, la disposition des particules du sol devrait être un des facteurs importants. Par exemple, la disposition horizontale des éléments constituant les sols encroûtés empêche l'infiltration de l'eau. En l'absence de cailloux, il suffit d'une mince croûte d'un millimètre d'épaisseur pour bloquer l'infiltration ; en outre localement il existe aussi des croûtes algales, ou "biodermes", qui sont également hydrophobes. Cependant, cet effet superficiel n'existe plus à partir du moment où l'eau réussit à transpercer les premiers millimètres, et qu'une lame d'eau importante ruisselle sur le sol. La structure de la matrice du sol peut dès lors jouer un rôle plus important que les éléments physiques du sol.

Conclusion

Les observations effectuées dans cette étude doivent permettre de déterminer les répercussions possibles de la sur-exploitation du milieu sur le comportement hydrique des bassins versants de la Sierra Madre Occidentale.

La déforestation est la cause d'une augmentation des coefficients de ruissellement et des taux d'érosion. La comparaison entre les parcelles boisées et non boisées le met en évidence. Les valeurs d'érosion sont deux à cinq fois plus élevées et celles de ruissellement quatre à cinq fois plus fortes dans les pâturages que sous les forêts. Dans les forêts, le ruissellement et les pertes en sol sont trois à six fois plus faibles sous les arbres qu'en terrain découvert entre les arbres, deux à cinq fois plus faibles là où la litière est épaisse que là où elle est absente ; enfin, que ce soit dans les pâturages ou dans les forêts, la pente ne joue aucun rôle sur la formation du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de 1 m². P. Y. Guedez (1996) a également observé sur deux bassins versants comparatifs de 500 m² (l'un boisé et l'autre déboisé) dans la même région, une augmentation de 60 % des coeffi-

cients de ruissellement dans le bassin déboisé. Or, la suppression des arbres favorise aussi la disparition de la litière et par conséquent, l'augmentation des espaces caillouteux et encroûtés.

De même, le surpâturage, qui se traduit par l'appauvrissement en graminées et la pierrosité des sols, ainsi que le piétinement du bétail, peuvent contribuer à augmenter les écoulements superficiels. La perte de la végétation et des premiers horizons organiques ainsi que le compactage des sols sont des facteurs qui empêchent l'infiltration et facilitent la formation des écoulements superficiels (Poulenard *et al.*, 1996 ; Bergkamp, 1998).

Les activités forestières et l'élevage de cette région s'accompagnent en outre de travaux qui modifient aussi les conditions de circulation de l'eau. L'aménagement des pistes pour le passage des engins forestiers et d'autres véhicules motorisés compactent les sols et préparent des chemements préférentiels aux écoulements ; ceci est très visible pendant les pluies. D'après P. Bernard-Allée et C. Cosandey (1991), C. Cosandey (1992), J.M. Fristch (1995), B.P. Mohanty *et al.* (1994), J. Croke *et al.* (1999), C. Cosandey et M. Robinson (2000), le compactage des sols peut être la raison principale de l'augmentation de l'écoulement dans les milieux forestiers dégradés et les prairies surpâturées.

Ces observations expérimentales portent à croire que les activités humaines actuelles dans le haut bassin du Nazas y favorisent le ruissellement. Cependant, la grande variabilité spatiale et temporelle de la pluie (Nouvelot et Descroix, 1996) et de la conductivité hydraulique des sols de la région (Descroix *et al.*, 2001) peuvent empêcher de distinguer les conséquences directes sur les valeurs d'écoulement des rivières. Ainsi, la réponse à l'échelle du mètre carré diffère de celle à l'échelle de plusieurs kilomètres carrés. L'augmentation du ruissellement sur les parcelles expérimentales peut ne pas être perceptible à l'échelle des bassins et au niveau régional. Ainsi D. Viramontes (2000) a montré qu'à l'échelle de bassins de 5 000 km², il y avait depuis 30 ans diminution des écoulements de base et des temps de réponse des bassins.

Références

- Ambroise B. (1998)** – Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1 - Processus et facteurs. *Revue de sciences de l'eau*, 4, 471-495.
- Barral H. et Anaya E. (1995)** – *La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México*. Publicaciones ORSTOM-INIFAP, Gómez Palacio, México, 5, 78 p.
- Bergkamp G. (1998)** – A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena*, 33, 201-220.
- Bernard-Allée P. et Cosandey C. (1991)** – Conséquences d'une coupe forestière sur les bilans hydrologique et sédimentaire : le bassin versant de la Latte, Mont Lozère. *Physio-Géo*, 221, 79-94
- Bollery A. (1999)** – *Comportement hydrodynamique des sols de deux versants dans la Sierra Madre Occidentale (Mexique)*. Mémoire de maîtrise, Institut de Géographie Alpine, université Joseph Fourier, Grenoble, 131 p.

- Bollery A. (2000)** – *Fonctionnement hydrodynamique des versants de la Sierra Madre Occidentale, Mexique*. Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, université Joseph Fourier, Grenoble, 160 p.
- Boutrais J. (1994)** – *Éleveurs, bétail et environnement. À la croisée des parcours*. ORSTOM, Centre d'études africaines, Paris, 303-319.
- Boyer C. (1999)** – *Variabilité spatiale du comportement hydrodynamique de la Sierra Madre Occidentale (Mexique)*. Mémoire de maîtrise, Institut de Géographie Alpine, université Joseph Fourier, Grenoble, 124 p.
- Calder I.R., Hall L.R., Bastable H.G., Gunston H.M., Shela O., Chirwa A. and Kafundu R. (1995)** – The impact of land use change on the water resources in sub-Saharan Africa: a modelling study of lake Malawi. *Journal of Hydrology*, 170, 123-135.
- Casenave A. et Valentin C. (1989)** – *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Coll. Didactique. Éd. ORSTOM, Paris, 229 p.
- Cosandey C., Boudjemline D., Roose E. et Lelong F. (1990)** – Étude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 34, 61-73.
- Cosandey C. (1992)** – Influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Conséquences d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel. *Hydrologie continentale*, 7, 13-22.
- Cosandey, C. et Robinson, M. (2000)** – *Hydrologie continentale*. A. Colin, Paris, coll. U, 360 p.
- Croke J., Hairsine P. et Fogarty P. (1999)** – Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 216, 56-77.
- Demant A. y Robin C. (1975)** – Las fases del vulcanismo en México ; una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el cretácico. *Revista del Instituto de Geología*, UNAM, México, 75, 70-83.
- De Noni G., Viennot M., Asseline J. et Trujillo G. (2001)** – Terres d'altitude, terres de risques. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. *Latitudes 23, Éd. IRD*, Paris, 224 p.
- Descroix L., Estrada A.J. et Bouvier C. (1994)** – Hidrometría. In "*Estudio de los Factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36*". Ed. INIFAP – CENID RASPA et ORSTOM – DEC, Gómez Palacio, Dgo., México, 63-117.
- Descroix L., Digonnet S., Gonzalez Barrios J.L., Viramontes D. and Bollery A. (2000)** – Local factors controlling gully or areal erosion in the Western Sierra Madre (Northern Mexico). *International Symposium on gully erosion under global change*. Leuven, Belgium, book of abstracts, p. 53.
- Descroix L., Viramontes D., Vauclin M., Gonzalez Barrios J.L., Esteves, M. (2001)** – Influence of surface features and vegetation on runoff and soil erosion in the western Sierra Madre (Durango, North West Mexico). *Catena*, 43, 115-135.
- Descroix L., Nouvelot, J.F. (1997)** – *Escurrecimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental*. Publication ORSTOM-INIFAP, Gómez Palacio, Dgo. México. 7, 50 p.
- Fritsch J. M. (1990)** – *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants*. Thèse université de Montpellier II, 390 p.
- Fritsch J.-M. (1995)** – Occupation des sols et régimes hydrologiques : les enseignements de bassins versants guyanais. *Annales de Géographie*, 581/582, 27-61.
- Galea G., Breil P., Ahmad A. (1993)** – Influence du couvert végétal sur l'hydrologie des crues, modélisation à validations multiples. *Hydrologie continentale*, 8, 17-33.
- Gentry H. S. (1957)** – *Los pastizales de Durango. Estudio ecológico, fisiográfico y florístico*. Ediciones del Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, Mexico, 361 p.
- Gonzalez Barrios J.L. et Descroix L. (2000)** – Bilan et perspectives de la ressource en eau dans le bassin du Nazas-Aguanaval (Nord-Mexique). *Revue de Géographie Alpine*, 88, 115-128.
- Guedez P.-Y. (1996)** – *Déforestation et érosion dans la Sierra Madre Occidentale*. Mémoire de fin d'études ISTOM-ORSTOM, Cergy-Pontoise, 98 p.
- Henry O. (1997)** – *Étude de l'impact de la déforestation et des pluies dans la Sierra Madre mexicaine*. Mémoire de fin d'études ISTOM-ORSTOM, Cergy-Pontoise, 80 p.
- Horton R.E. (1933)** – The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14: 446-460.
- Hudson J.A., Gilman K. (1993)** – Long term variability in the water balances of the Plynilimon cathments. *Journal of Hydrology*, 143, 355-380.
- Janeau J.-L., Ruiz de Esparza R. (1992)** – Cartographie des états de surface d'une toposéquence représentative du bassin versant de San Ignacio. In *Actas del Seminario Mapimi*. Instituto de Ecología – ORSTOM – CEMCA. México, 161-176.
- Janeau J.L., Mauchamp A., Tarin G. (1999)** – The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern Mexico and their influences on the system hydrodynamics. *Catena*, 37, 165-173.
- Kosmas C. et 22 autres auteurs (1997)** – The effects of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29, 45-59.
- McDowell F.W., Clabaugh R.P. (1979)** – Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlan, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 1479-1487.
- Mohanty B.P., Ankeny M.D., Horton R., Kanwar, R.S. (1994)** – Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using infiltrometers. *Water Resources Research*, 30, 9, 2489-2498.
- Nouvelot J.F., Descroix L. (1996)** – Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. *Trace*, CEMCA, México, 30, 9-25.
- Plenecassagne A., Romero E., Lopez C. (1997)** – *Manual de laboratorio : metodos de analisis*. Ed. Orstom-Cenid-Raspa, Gomez Palacio, Mexique, 173 p.
- Poesen J., Lavee H. (1994)** – Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23, 1-28.
- Poesen J., Torri D., Bunte K. (1994)** – Effects of rock fragments on soil erosion by water at different scales: a review. *Catena*, 23, 141-166.
- Poulenard J. (1995)** – *Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre Occidentale*. Mémoire de fin d'études ISTOM-ORSTOM. Cergy-Pontoise, 82 p.
- Poulenard J., Descroix L., Janeau J.L. (1996)** – Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale (Nord-Ouest du Mexique). *Revue de Géographie Alpine*, 2, 77-86.

- Rodriguez M. G. (1997)** – *Determinación de la vegetación en la Sierra Madre Occidental para la calibración de imágenes satélites*. Mémoire de maîtrise Escuela de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Mexique, 60 p.
- Ruiz Figueroa, J.F. et Valentin, C. (1983)** – Effects of various types of cover on soil detachment by rainfall. Éd. Orstom, Abidjan, 17 p.
- Scott Munro D., Huang L.J. (1997)** – Rainfall, evaporation and runoff responses to hillslope aspects in the Shenchong Basin. *Catena*, 29, 131-144.
- Serrate C. (1978)** – *Dynamique des versants de haute montagne : Andes Centrales péruviennes, Alpes briançonnaises*. Thèse, université Paris VII, 400 p.
- Snelder D.J., Bryan R.B. (1995)** – The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya, *Catena*, 25, 105-116.
- Sorriso-Valvo M., Bryan R.B., Yair A., Lovino F., Antronico L. (1994)** – Impact of afforestation on hydrological response and sediment production in a small Calabrian catchment. *Catena*, 25, 89-104.
- Tarin G. (1992)** – *Caracterización hidrodinámica de suelo a nivel de una formación en mogote, utilizando un simulador de lluvia en la Reserva de la Biósfera de Mapimí, Durango*. Tesis profesional, Biología, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, Mexique, 125 p.
- Valentin C. (1994)** – Surface sealing as affected by various rock fragment cover in West Africa. *Catena*, 23, 87-98.
- Vandervaere J.P. (1995)** – *Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques : analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés*. Thèse université Joseph Fourier, Grenoble, 329 p.
- Viramontes D. (1995)** – *Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas*. Publicación ORS-TOM-INIFAP, Gómez Palacio, Dgo. Mexique, 45 p.
- Viramontes D., Descroix L. (2000)** – Degradation progressive du milieu sur le bilan hydrique des bassins versants dans la Sierra Madre Occidentale. *Revue de Géographie Alpine*, 88, 27-41.
- Viramontes D. (2000)** – Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidentale, Mexique). Causes et conséquences de son évolution. Thèse université Joseph Fourier, Grenoble, Spécialité Géographie Physique, 449 p.
- Woo Ming-Ko, Fang Guoxiang, DiCenzo P. D. (1997)** – The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena*, 29, 145-149.

Article reçu le 3 septembre 2001, accepté le 6 septembre 2002