

Un encroûtement des sols limitant l'infiltration

Jérôme Poulenard

pédologue

José Luis Gonzalez Barrios

hydro-pédologue

David Viramontes

éco-pédologue

Luc Descroix

géographe-hydrologue

Jean-Louis Janeau

pédologue

Les sols interviennent sur le cycle de l'eau du fait de leurs propriétés hydriques (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 parcelles et 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. Ces interactions ont fait l'objet de nombreuses études : 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 ; et SORRISO-VALVO *et al.*, 1994), en climat tempéré (COSANDEY *et al.*, 1990 ; GALEA *et al.*, 1993 ; HUDSON et GILMAN, 1993 ; CROKE *et al.*, 1999) ; en climat semi-aride et aride (SNELDER et BRYAN, 1995 ; BERGKAMP, 1998).

Malgré l'uniformité de leurs réponses, les chercheurs intéressés par les processus avancent diverses 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 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 de l'eau dans le système.

Introduction

Présentation des sols de la Sierra Madre

Parmi les caractéristiques du sol impliquées dans le transport et le stockage de l'eau on peut citer celles ayant peu de variabilité spatio-temporelle dans la Sierra Madre occidentale comme : la texture, la présence d'horizons argileux, le type de végétation et de litière. Néanmoins, d'autres caractéristiques ayant une forte variabilité spatio-temporelle sont aussi importantes à considérer dans les études de transferts d'eau dans le sol comme : la structure, l'état de la surface, c'est-à-dire la présence de croûtes, les éléments grossiers, la rugosité, l'abondance de litière, ainsi que le degré de couverture végétale. De plus, d'autres facteurs externes au sol joueront parfois un rôle important dans le transfert et le stockage de l'eau dans les bassins versants de la Sierra Madre. Tel est le cas de : l'intensité des pluies, la topographie et la pente, la taille des impluviums, la taille des aires déforestées, l'intensité du piétinement par le bétail et le surpâturage. On s'appuiera ici sur des données collectées sur les bassins versants expérimentaux (fig. 26).

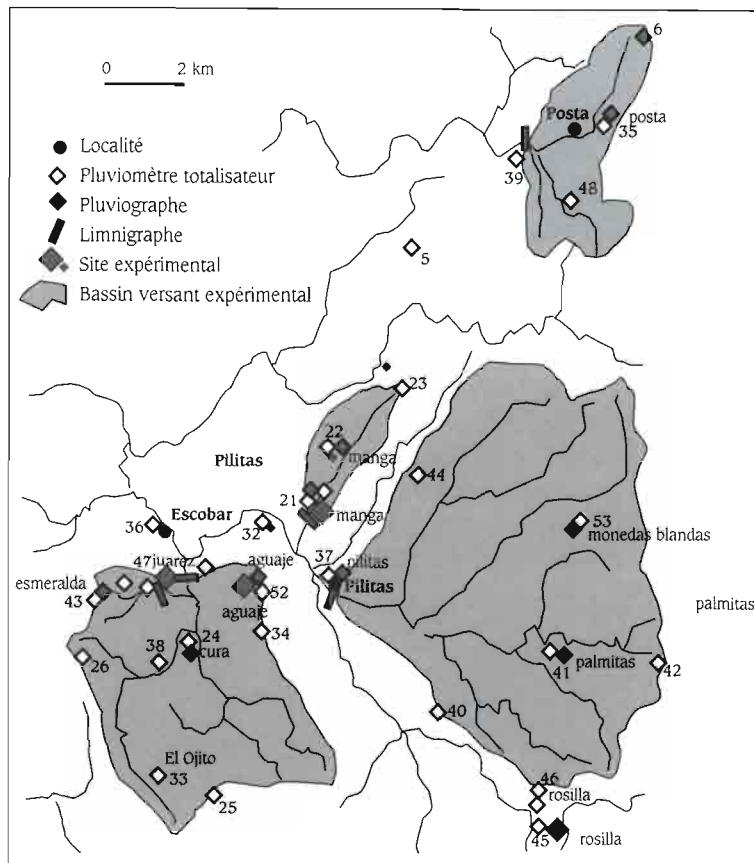


Fig. 26 – Les bassins versants expérimentaux de la Sierra Madre occidentale et le réseau de mesure hydro-météorologique.

De ce fait, les sols de la sierra ont une forte variabilité dans leur réponse hydrologique, et parfois une susceptibilité accrue aux processus d'érosion. Le cheminement de l'eau dans la Sierra Madre occidentale est régulé par les caractéristiques biophysiques du milieu modulées par l'impact de l'activité humaine qu'il faut mieux appréhender.

Développés sur des matériaux d'origine volcanique mis en place au Tertiaire, allant des basaltes aux rhyolites, les sols de la Sierra Madre occidentale sont le principal siège des processus de transfert et de stockage de l'eau destinée aux activités économiques du Nord mexicain.

Les sols témoignent d'une pédogenèse distinctive en milieu **fersiallitique** modelée par les caractéristiques géologiques, notamment la présence d'épaisseurs puissantes de tufs et d'ignimbrites miocènes ainsi que de **conglomérats**, soumis aux influences anciennes et récentes du climat.

Distribués le long de la chaîne montagneuse massive entre 1 500 et 3 000 m d'altitude, les sols de la Sierra Madre occidentale sont généralement peu profonds et riches en éléments grossiers : graviers, cailloux et pierres (POULENARD, 1995). Ils forment une couverture discontinue avec trois grands types de sols dominants : les Leptosols, les Cambisols et les Phaeozems (ISSS *et al.*, 1998 ; GONZALEZ BARRIOS, 2000).

Ils regroupent les anciens Lithosols et Regosols, ils sont les plus répandus dans la Sierra Madre. Ce sont des sols très peu profonds (moins de 0,3 m) se distribuant sur tous les reliefs massifs et sur la plupart des collines et versants de la Sierra Madre occidentale.

On trouve leur grande extension dans les secteurs les plus pentus où ils sont soumis à une forte érosion qui compense largement la vitesse d'approfondissement des profils, forcément assez lente dans cette région soumise aux froids hivernaux et aussi à huit mois de saison sèche. Ce sont donc des sols peu évolués.

De faible profondeur (0,6 à 2 m), mais avec un profil bien développé, ils donnent à la superficie du sol une couleur beige, jaune, rouge, violette ou verte, selon le type de matériel d'origine et son degré d'altération ; ils se distribuent sur la plupart des collines et versants de la Sierra Madre. Les principales sub-unités représentées sont :

- les Cambisols chromiques, ayant un **chroma** élevé ;
- les Cambisols vertiques, riches en argiles, avec horizons de structure massive et fissurés à sec ;

Les Leptosols

Les Cambisols

– les Cambisols **gleyiques**, ayant des horizons soumis à l'influence d'une nappe.

Ce sont les sols bruns de la classification française. Il s'agit de sols caractérisés par l'existence d'un horizon d'altération Bw bien marqué. Ce sont les sols zonaux des milieux tempérés et leur présence ici est assez typique de milieux tropicaux tempérés par l'altitude. L'observation de variantes à caractères vertiques est sans doute à mettre en relation avec un climat tempéré chaud à saison sèche marquée, qui, n'était l'inversion des saisons sèches et humides, rappellerait les climats méditerranéens.

Il en résulte :

- i) des processus de rubéfaction, c'est-à-dire une cristallisation rapide des oxydes de fer en hématite qui a un pouvoir chromatique très fort (rouge) ;
- ii) des phyllosilicates II dominants de type 2/1 (vermiculite, smectites...) qui peuvent peut-être expliquer localement un début de caractère vertique. On se rapproche donc d'une pédogenèse de type fersiallitique.

Le caractère gleyique doit évidemment être mis en relation avec des sols de bas-fonds à proximité des nappes.

Les Phaeozems

Ce sont les sols les plus profonds (plus de 2 m), et ils se localisent sur les plaines et bas-fonds des versants. Ils montrent une couleur brun foncé avec un profil bien structuré et développé, riche en matière organique. On a donc des sols riches en MO (importance des apports endogènes de MO reliés à la végétation herbacée), notamment dans un horizon de surface sombre. Ceci reflète une genèse avec un climat typiquement contrasté et suffisamment d'eau pour qu'il y ait percolation dans le profil (les Phaeozems sont des sols qui subissent une certaine lixiviation des bases, mais pas au point d'être désaturés en surface) avec une saison sèche également marquée. Au bilan, un sol qui correspond bien au climat actuel, notamment dans les zones pas trop érodées, couverts d'une végétation graminéenne importante et connaissant un bon fonctionnement biologique.

Quoi qu'il en soit, on observe une pédogenèse globalement typique de régions de montagnes tropicales avec saisons contrastées, humide et sèche. L'abondance de Leptosols dans ce contexte montre cependant l'intensité des phénomènes érosifs. Certains des Cambisols et Phaeozems présentent ainsi des caractères vertiques en présence d'argiles abondantes, sans développer pour autant des surfaces de frottement dans le profil, ni des reliefs de **gilgai** en surface.

De nombreuses analyses de sol, *in situ* (mesures physiques à faire sur place) ou en laboratoire (analyses physico-chimiques), ont été réalisées sur les sols des bassins expérimentaux de la Sierra Madre occidentale et leurs environs. Plus de 400 points ont fait l'objet de mesures systématiques de la conductivité hydraulique (au simple cylindre et à l'infiltromètre à disques et à succion contrôlée), de la **densité apparente**, de la porosité et de la **granulométrie**. Ces éléments ont permis de mieux caractériser le fonctionnement hydro-dynamique des sols de la région, et ce à diverses échelles.

L'eau dans les sols de la Sierra Madre

Comme on l'a vu plus haut, les sols de la Sierra Madre occidentale sont caractérisés par une abondance d'éléments grossiers. On constate une distribution bi-modale avec un mode vers 25 % massique et un mode vers 50 % massique.

Les éléments grossiers

Cette présence d'éléments grossiers a d'importantes répercussions sur la dynamique de l'eau dans la zone. Sur les pentes inférieures à 20°, les pierres sont le plus souvent enchâssées dans la matrice et contribuent à rendre le sol peu perméable. Sur les pentes plus fortes, les pierres sont le plus souvent libres (pour les raisons citées plus haut) et contribuent au contraire à favoriser l'infiltration ; dans ces conditions, lorsqu'on soulève une pierre, on constate souvent que le sol est bien plus meuble dessous, et on note une forte activité faunique ; ce qui n'est pas le cas sur les versants peu pentus où les pierres sont scellées dans les croûtes superficielles.

Cette forte pierrosité est bien sûr liée à la présence de sols peu épais (Leptosols notamment) et donc à la proximité de la roche mère conduisant à une abondance de cailloux, pierres et blocs. On peut aussi dans certaines zones la concevoir comme la résultante de phénomènes érosifs actifs ayant fait migré les particules fines : accumulation relative d'éléments grossiers (EG) par départ des particules fines.

Si on raisonne par zone d'étude, on constate trois caractères remarquables des sols :

- une relation entre teneur en argile et teneur en éléments grossiers pour le site CUR (bassin d'El Cura) ;
- une relation entre la pente et la teneur en éléments grossiers pour les sites ESM (bassin Esmeralda) (fig. 27), et pour les sites PIL (bassin du Pilitas) jusqu'à des pentes de l'ordre de 20 %. On interprète évidemment cette relation comme une observation de la relation :
Pente → érosion → départ préférentiel des fines → teneur relative en éléments grossiers plus forte.

– on remarque en revanche que les quelques sites situés sur les plus fortes pentes (au-dessus de 25°) présentent des teneurs en éléments grossiers plus faibles. Ceci illustrerait-il la plus faible érosion sur des pentes très fortes ?

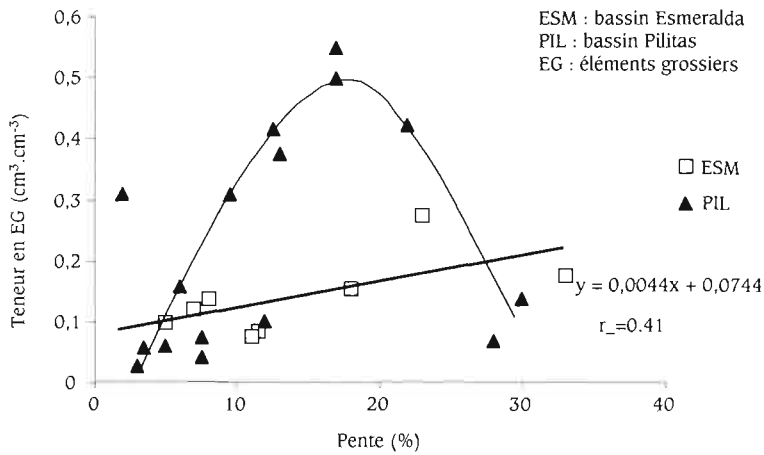


Fig. 27 – Relation entre la pente et la teneur en éléments grossiers, bassins de Esmeralda et Pilitas.



Station hydrométrique du bassin de Pilitas, située au centre du village de Boleras, entre Santa María del Oro et Tepehuanes.

Texture et carbone

On constate que les différents essais d'infiltration sont réalisés sur des sols présentant des textures très variées et notamment de très fortes variations des teneurs en argile (de 8 à plus de 40 %). Les variations de teneurs en carbone organique dans l'horizon 0-10 cm sont en revanche beaucoup plus faibles (de 0,5 à 2,5 %) (fig. 28).

Le bassin du Cura présente des sols avec des teneurs en argile statistiquement plus élevées que celles des trois autres sites. Cependant la variation principale est une variation au sein des sites, à mettre en lien avec le degré d'évolution des sols et/ou le contexte érosif (zone de départ préférentiel versus zone de dépôt préférentiel). Il est à noter qu'aucune relation simple n'a pu être établie pour expliquer la variabilité spatiale des teneurs en carbone des sols.

Il est surtout remarquable que l'on observe une extrême variabilité de toutes les propriétés physiques du sol (DESCROIX *et al.*, 2002), tant en termes de conductivité, de densité apparente, de porosité, que de granulométrie (dans le cas présent), en particulier de teneur en argile et en éléments grossiers. Difficile donc de faire une classification des sols

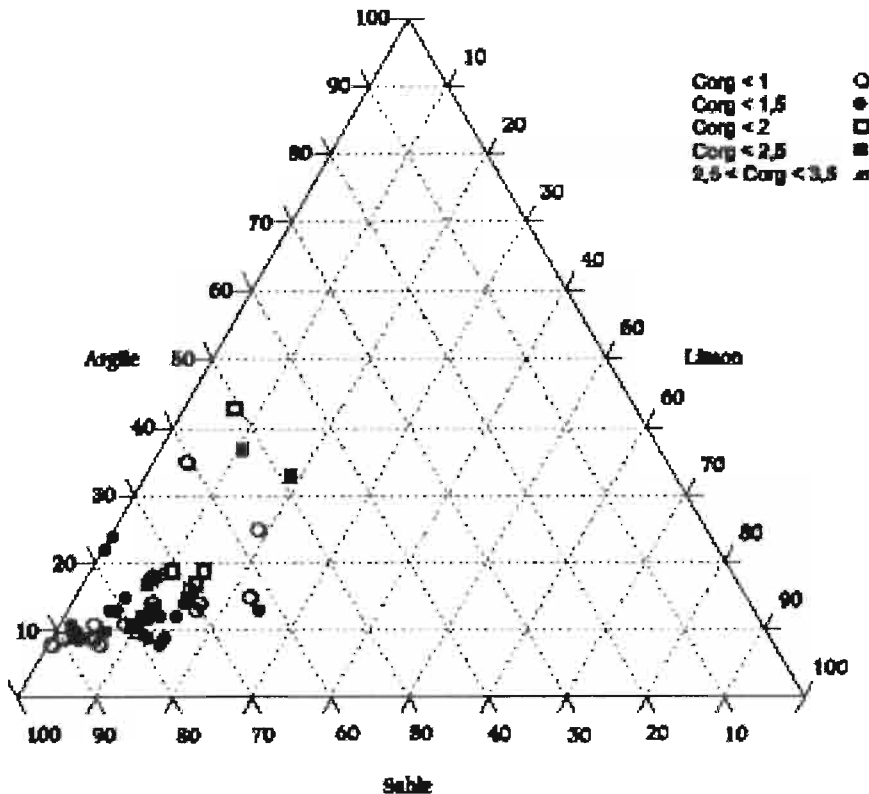


Fig. 28 – Répartition des sols sur le diagramme des textures, en fonction de leur teneur en matière organique.

d'après leur texture. Ceci se reflète bien sûr par une extrême variabilité des capacités d'infiltration des sols. La variabilité des teneurs en carbone (et du stock total de carbone) est à mettre en relation avec la dynamique actuelle des surfaces, les mises à nu activant fortement la minéralisation du carbone des sols (Podwojewski *et al.*, 2002) et de la végétation (surpâturage, remplacement des chênes par les pins...). Les teneurs en carbone (en g.kg^{-1} de terre fine, c'est à dire $< 2 \text{ mm}$) sont assez élevées alors que les stocks calculés sur 10 cm sont plutôt faibles, ce qui est lié à l'abondance des éléments grossiers. Cela illustre le problème d'une expression pondérale sur la terre fine alors qu'il y a beaucoup d'éléments grossiers, et l'intérêt de revenir à une expression volumique des teneurs. En effet, la richesse en carbone de la terre fine n'a pas de sens, si elle ne représente qu'une très faible partie du volume.

Porosité

Comme on l'a déjà remarqué préalablement, il est délicat d'analyser la porosité de la terre fine quand celle-ci ne représente que 30 à 60 % du volume total du sol, du fait de l'énorme volume des éléments grossiers. Cette porosité de la terre fine peut naturellement être subdivisée en fonction des résultats des mesures de capacité de rétention en eau à différentes succions. En appliquant la loi de Jurin Laplace on peut dissocier :

- la porosité correspondant à des pores de rayons $< 0,2 \mu\text{m}$ (capables de retenir de l'eau à $pF 4,2$) (pF étant le point de flétrissement) ;
- la porosité correspondant à des pores de rayons compris entre 10 et $0,2 \mu\text{m}$ (pores pleins d'eau à $pF 2,5$ et vides à $pF 4,2$) ;
- la porosité totale (issue du simple calcul $1 - \text{datf}/\text{dr}$).

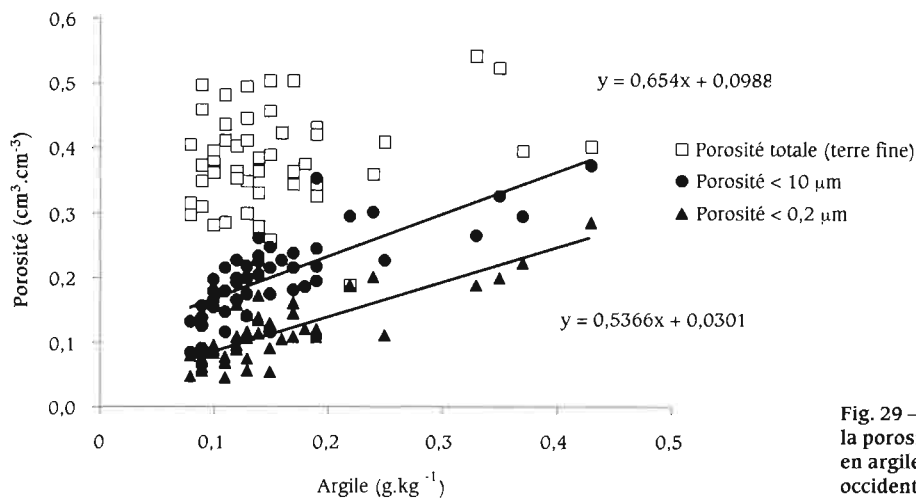


Fig. 29 – Relation entre la porosité des sols et leur teneur en argile dans la Sierra Madre occidentale.

On constate que la porosité de taille $< 0,2 \mu\text{m}$ est très fortement reliée à la quantité d'argile (fig. 29). Il s'agit bien d'une porosité texturale. En revanche, la porosité de taille $10-0,2 \mu\text{m}$ qui peut être le siège de la réserve en eau utile pour les plantes est remarquablement constante (les deux droites de régression sont quasi parallèles).

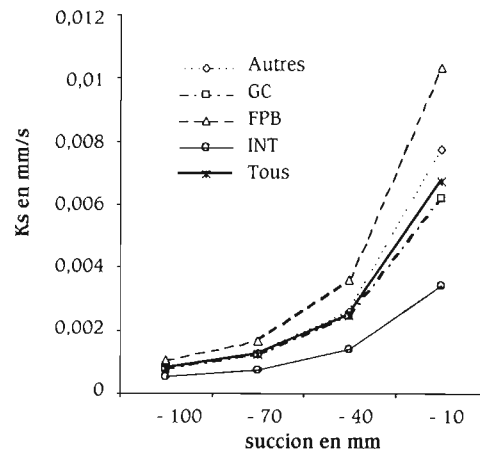
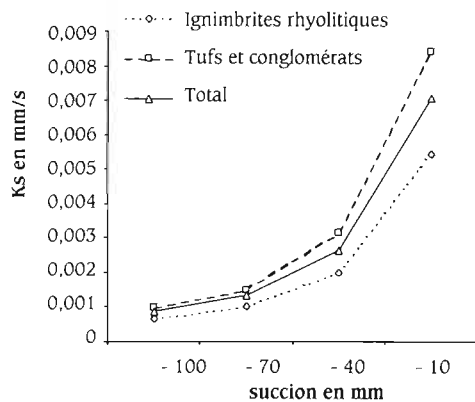
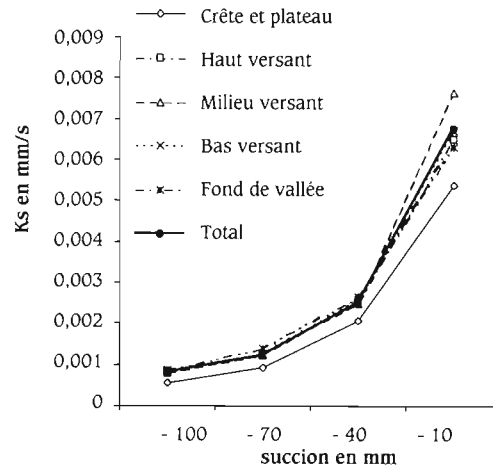
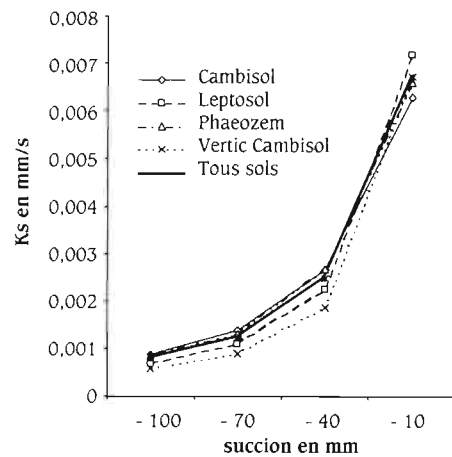
Enfin, la porosité constituée de pores $> 10 \mu\text{m}$, utiles au transfert rapide d'eau est très clairement indépendante des teneurs en argile.

Les états de surface constituent un élément qui est directement sous la dépendance de l'utilisation des sols. La figure 30 permet de constater qu'ils sont probablement le moyen de classification des sols qui synthétise le mieux l'information concernant leurs caractéristiques hydro-dynamiques, souvent dues, comme on l'a vu, aux usages qui sont faits de ces sols. On remarque que ni le type de sol, ni le type de roche mère, ni la position du site sur le versant, ne permettent une ségrégation de classes de conductivité hydraulique aussi marquée que celle autorisée par les états de surface.

Dans les bassins expérimentaux du haut bassin du Nazas, où des relevés hydro-pluviométriques ont été réalisés de 1994 à 1999 (fig. 26), on a constaté que toutes les zones situées au-dessous de 2 400 m d'altitude avaient été transformées en pâturages durant les cinquante dernières années, et ce à partir des haciendas et des villages qui ont succédé, au moment de la réforme agraire, aux campements où les employés des grands propriétaires gardaient les troupeaux. Peu à peu, tout cet espace a été dévolu à l'élevage. Les secteurs situés au-dessus de 2 400 m sont aussi avant tout pastoraux ; mais les forêts y couvrent encore un certain pourcentage de l'espace : plus de la moitié au-dessus de 2 700 m, et plus de 80 % sur les plus hauts plateaux, aux alentours de 2 900-3 000 m. Donc, plus on monte en altitude, et moins le surpâturage a modifié les conditions de surface du sol, puisque la forêt a subi peu de coupes pour les besoins des pâtures. Par contre, ces secteurs les plus élevés sont ceux où les coupes se font dans un but d'exploitation forestière ; la plus forte pluviométrie et la présence de nombreux arbustes et des résidus d'exploitation de la forêt protègent pour le moment les sols d'un trop fort impact du piétinement (les troupeaux peuvent paître jusqu'aux crêtes).

Les états de surface dans la Sierra Madre occidentale

Des états de surface « jeunes »



GC : graviers croûte
 FPB : free pebbles and blocks,
 pierres et cailloux libres
 INT : induced topsoil :
 sol encroûté

Fig. 30 – Classification des mesures de conductivité hydraulique suivant les types de sol, la lithologie, la position du site de mesure sur le versant, et les états de surface.

Typologie

De la récente dégradation de la couverture végétale et du piétinement du bétail ont découlé trois types principaux d'états de surface spécifiques (fig. 31), caractérisés pour les uns par un encroûtement généralisé et le dernier par un empiècement progressif de la surface ; ces trois états de surface couvrent plus de 95 % de l'espace dans la zone consacrée exclusivement à l'élevage. Les trois sont récents et leur formation est liée au surpâturage (DESCROIX *et al.*, 2001).

GC (graviers croûte ou gravel-crust)

Cet état de surface est typique des zones de pâturage de pente comprise entre 2 et 20° ; il s'agit (fig. 31) d'une mince croûte de particules fines

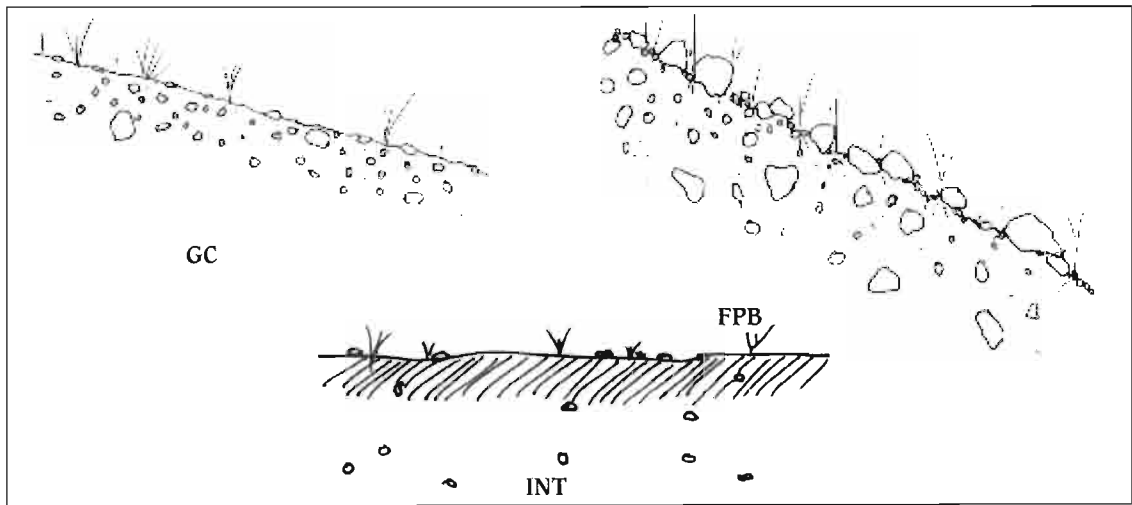


Fig. 31 – Profil des trois principaux états de surface décrits.

de sols dans laquelle les graviers sont incrustés, limitant sérieusement l'infiltration de l'eau et favorisant donc le ruissellement. Sa formation est liée à l'impact du **splash** sur les plages de sol dénudé de plus en plus étendues ; ce processus déplace les plus fines particules du sol, qui viennent boucher les pores et fixer les graviers (< 20 mm) dans la matrice. Ce type de croûte correspond aux secteurs connaissant de forts coefficients de ruissellement et des pertes en sols élevées et on le trouve dans tous les endroits surpâturés où s'accroissent les zones de sol nu. Il correspond aussi aux croûtes définies par CASENAVE et VALENTIN (1989) ; comme l'ont observé POESEN *et al.* (1990), l'incrustation des graviers dans la croûte explique les hauts coefficients de ruissellement.

Ce type de surface se trouve dans tous les types de milieu sur pentes faibles (moins de 10°) ; la localisation la plus fréquente est l'interfluve ou le bas des versants (là où l'argile n'a pas encore été mobilisée ou bien là où au contraire, elle s'est accumulée), sous pâturages. Il se caractérise par une induration des horizons superficiels (sur 20 ou 40 cm) des phaeozems rouges. Ces horizons sont sérieusement compactés du fait de fortes teneurs en argile (contrairement au « GC ») et du piétinement incessant du bétail, mais ne représentent que 5 à 10 % de la surface des pâturages (fig. 31). En zone tropicale, ce type de surface évoluerait vers une croûte ferrugineuse.

INT (Indurated topsoil, sols encroûtés)

On trouve ce type de surface sous forêt mais surtout dans les pâturages, là où les pentes dépassent 20°. Il est caractérisé par une forte proportion de blocs, pierres et cailloux (> 20 mm), non encastrés dans la matrice

FPB (Free pebbles and blocks, pierres et cailloux libres)



Versant très dégradé sujet au ruissellement en nappe généralisé, au-dessus de la Posta de Jihuites.

(fig. 30). Si la charge bétailière excessive se maintient après la formation du pavage, les terrassettes apparaissent du fait du piétinement. Le fait que les cailloux ne s'encastrent pas dans la matrice est dû à leur grand nombre, à leur taille, mais surtout à la conjonction de la pente et du passage incessant des troupeaux, qui les déplacent constamment.

Une cartographie (BOYER, 1999) des états de surface sur deux des bassins expérimentaux a montré la logique de leur distribution spatiale, en fonction des pentes et de la localisation sur le versant.

Des états de surface de zone semi-aride dans un secteur de montagne subtropical

Les états de surface actuels, dont on a postulé qu'ils étaient le résultat d'un stade d'érosion antérieur, font penser à ceux de secteurs plus arides. Les surfaces « GC » et « INT » se retrouvent par exemple dans le bassin expérimental d'Atotonilco, en zone semi-aride, au centre de l'Altiplano nord-central mexicain. Dans cet autre site d'observation et de suivi hydrologique du programme « Gestion et usage de l'eau dans un bassin du Nord-Mexique », la pluviométrie annuelle est de 400 mm (contre 600 mm en moyenne sur les bassins de la Sierra Madre) et les pâturages, même s'ils sont mieux gérés, laissent apparaître de grandes plages de sol nu entre les touffes de graminées. Le site expérimental est installé dans un ranch privé de 40 000 ha, dont les propriétaires ont eu les moyens de creuser une cinquantaine de puits, et peuvent acheter du soja importé les années où les pâturages sont trop peu productifs (ESTRADA, 1999). Ceci autorise dans un site comme dans l'autre la formation d'organisations pelliculaires superficielles et de sols indurés sur des

proportions significatives de la superficie des versants. En gros, on retrouve des états de surface de type « semi-aride » dans un milieu défini comme sub-humide où la pluviométrie permet normalement la présence de pâturages très denses sous chênes.

Si 95 % de l'espace non forestier est surpâturé et comprend un des types de surface considérés ici comme découlant de la surexploitation des herbages, il est difficile d'imaginer que cela n'a pas d'impact hydrologique. Nonobstant le fait que sur les pentes fortes, le processus de dégradation semble « auto-freiné » par le pavage de la surface, ce type de formations superficielles est bien plus enclin au ruissellement que les rares sites protégés et enclos depuis longtemps où l'on peut encore observer les profils du sol avant dégradation

Il apparaît nettement que le piétinement du bétail et la dégradation de la strate végétale modifient la structure du sol et l'aspect des versants, en rendant plus aisé le ruissellement (fermeture des pores, tassement, glaçage de la surface). Par contre, sur les versants les plus pentus, la dégradation de la végétation et des sols a produit une forte pierrosité de surface, laquelle freine à présent le ruissellement et l'érosion, en dispersant l'énergie cinétique des pluies et en favorisant l'infiltration.

Il est donc important de considérer quelles peuvent être les conséquences de ces activités et de la formation de ces états de surface sur le comportement hydro-dynamique des versants de la Sierra Madre occidentale.

Conclusion

Références

AMBROISE B., 1998 – Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1- Processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° 4 (11) : 617-630.

BERGKAMP G., 1998 – A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and micro-topography in semiarid shrublands. *Catena*, 33 : 201-220.

BOYER C., 1999 – *Variabilité spatiale du comportement hydrodynamique des versants dans la Sierra Madre occidentale*. Mémoire de maîtrise de géographie, Institut de géographie alpine, UJF-Grenoble, 108 p.

- CALDER I.R., HALL L.R., BASTABLE H.G., GUNSTON H.M., SHELA O., CHIRWA A., 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., VALENTIN C., 1989 – *Les états de surface de la zone sahé-lienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom, coll. Didactiques, 229 p.
- COSANDEY C., BOUDJEMLINE D., ROOSE E., LELONG F., 1990 – Étude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du mont Lozère. *Z für, Geomorphologie*, 34 (1) : 61-73.
- CROKE J., HAIRISINE P., FOGARTY P., 1999 – Runoff generation and redistribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 216 : 56-77.
- DESCROIX L., VIRAMONTES D., VAUCLIN M., GONZALEZ BARRIOS J.L., ESTEVES M., 2001 – Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre. *Catena*, 43 : 115-135.
- DESCROIX L., GONZALEZ BARRIOS J.L., VANDERVAERE J.P., VIRAMONTES D., BOLLERY A., 2002 – An experimental analysis of hydrodynamic behaviour on soils and hillslopes in a subtropical mountainous environment (Western Sierra Madre, Mexico). *Journal of Hydrology*, 266 : 1-14.
- ESTRADA J., 1999 – *Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique*. Thèse de l'université Montpellier 2, 320 p.
- FAO/ISRIC/ISSS, 1998 – *World Soil Resources*. Report n° 81 FAO, Rome.
- FRICTSCH J.M., 1990 – *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants en Guyane française*. Thèse, université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 390 p.
- GALEA G., BREIL P., AHMAD A., 1993 – Influence du couvert végétal sur l'hydrologie des crues, modélisation à validations multiples. *Hydrol. Continent.*, 8 (1) : 17-33.
- GONZALEZ BARRIOS J.L., 2000 – « Los suelos de la sierra ». Memorias del Seminario sobre el uso y manejo del agua en las cuencas hidrológicas de México. IRD-Inifap Cenid Raspa. Gómez Palacio, Dgo. Junio 2000.
- HUDSON J.A., GILMAN K., 1993 – Long-term variability in the water balances of the Plynlimon catchments. *Journal of Hydrology*, 143 : 355-380.
- ISSS, ISRIC, FAO, 1998 – *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Reports n° 84. Rome, Italy, Éditions FAO, 92 p.
- KOSMAS C., DANALATOS N., CAMMERAT L.H., CHABART M., DIAMANTOPOULOS J., FARAND R., GUTIERREZ L., JACOB A., MARQUES H., MARTINEZ-FERNANDEZ J., MIZARA A., MOUSTAKAS N., NICOLAOU J.M., OLIVEROS C., PINNA G., PUDDU R., PUIGDEFABREGAS J., ROXO M., SIMAO A., STAMOU G., TOMASI N., USAI D., VACCA A., 1997 – The effects of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29 : 45-59.

- PODWOJEWSKI P., POULENARD J., ZAMBRANA T., HOFSTEDE R., 2002 – Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the paramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18 : 45-55.
- POESEN J., INGELMO-SANCHEZ F., MUCHER H., 1990 – The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surf. Process. Landforms*, 15 : 653-671.
- POULENARD J., 1995 – *Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre occidentale*. Projet Orstom-Cenid Raspa, Mexique. Mémoire de fin d'études Istom, 82 p.
- SCOTT MUNRO D., HUANG L.J., 1997 – Rainfall, evaporation and runoff responses to hillslope aspects in the Shenchong Basin. *Catena*, 29 : 131-144.
- 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 Calambrian catchment. *Catena*, 25 : 89-104.
- VIRAMONTES D., 1995 – Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas. *Folleto científico n° 3*, publication Orstom-Cenid Raspa, Éditeur Cenid Raspa, Gómez-Palacio Durango, Mexique.
- VIRAMONTES D., DESCROIX L., BOLLERY A., POULENARD J., 2002 – Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre occidentale : processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis à la surexploitation. *Géomorphologie*, 3 : 239-255.
- WOO M., FANG G., DICENZO P., 1997 – The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena*, 29 : 145-149.

latitudes 23

La Sierra Madre occidentale

Un château d'eau menacé

Éditeurs scientifiques

Luc Descroix, Juan Estrada,
José Luis Gonzalez Barrios, David Viramontes

IRD
Éditions

Sommaire

Avant-propos	11
Préambule	13
<i>Jean-François NOUVELOT</i>	
Introduction	15
<i>Luc DESCROIX</i>	
Encadré 1 : Géologie de la Sierra Madre occidentale. Constitution et origine	33
<i>Marc TARDY</i>	
MILIEU NATUREL ET PEUPEMENT DANS LA SIERRA MADRE OCCIDENTALE	
Les ressources en eau dans le centre-nord du Mexique. Perspective historique	49
<i>David VIRAMONTES</i>	
Encadré 2 : Propriété privée et publique, gestion collective. Quelle politique patrimoniale ?	59
<i>Luc DESCROIX</i>	
Une montagne en voie d'abandon ?	65
<i>Béatrice INARD-LOMBARD</i>	
Encadré 3 : Un contexte démographique et économique de transition. Démographie comparée de la Sierra Madre avec celle de deux autres régions agro-pastorales	83
<i>Luc DESCROIX</i>	
Le projet <i>Hervideros</i> . Un regard sur le passé préhispanique de la Sierra Madre occidentale du Durango, Mexique	93
<i>Marie-Areti HERS et Oscar J. POLACO</i>	
Encadré 4 : L'indianité et l'indigénisme au Mexique et dans la Sierra Madre occidentale	115
<i>Luc DESCROIX</i>	
LES SOLS ET L'EAU : PRÉCIPITATIONS ET RUISSELLEMENT DANS LA SIERRA	
Le climat et l'aléa pluviométrique au Nord-Mexique	129
<i>Jean-François NOUVELOT, Luc DESCROIX et Juan ESTRADA</i>	

La spatialisation des précipitations sur les deux versants de la Sierra Madre occidentale	145
<i>Luc DESCROIX, Jean-François NOUVELOT, Juan ESTRADA et Alfonso GUTIERREZ</i>	
Un encroûtement des sols limitant l'infiltration	155
<i>Jérôme POULENARD, José Luis GONZALEZ BARRIOS, David VIRAMONTES, Luc DESCROIX et Jean-Louis JANEAU</i>	
Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe ..	171
<i>José Luis GONZALEZ BARRIOS, Luc DESCROIX, David VIRAMONTES, Jérôme POULENARD, Alain PLENECASSAGNE, Laura MACIAS, Christelle BOYER et Arnaud BOLLERY</i>	
PÂTURAGES ET FORÊTS SOUS PRESSION	
Trop de bétail et trop de bûcherons. Une économie minière	191
<i>David VIRAMONTES, Eva ANAYA, Coral GARCIA, Jérôme POULENARD, Henri BARRAL, Laura MACIAS et Maria Guadalupe RODRIGUEZ CAMARILLO</i>	
Encadré 5 : L'appréciation du surpâturage	201
<i>Eva ANAYA, Luc DESCROIX et Henri BARRAL</i>	
Une eau menacée par la dégradation des ressources végétales	207
<i>Luc DESCROIX, David VIRAMONTES, Eva ANAYA, Henri BARRAL, Alain PLENECASSAGNE, José Luis GONZALEZ BARRIOS, Jeffrey BACON et Laura MACIAS</i>	
Influence de la forêt sur la pluviométrie	221
<i>Luc DESCROIX, José Luis GONZALEZ BARRIOS et Raul SOLIS</i>	
UNE EAU DISPUTÉE DANS UN ESPACE ENCORE LIBRE	
L'eau, agent économique et enjeu politique	249
<i>Luc DESCROIX et Frédéric LASSERRE</i>	
L'écotourisme : une alternative à la déprise et à la surexploitation ? Des atouts pour développer une nouvelle activité	265
<i>Luc DESCROIX</i>	
Eau et espace à Valle de Bravo. La bataille pour l'eau	283
<i>Luc DESCROIX, Michel ESTEVES, David VIRAMONTES, Céline DUWIG et Jean-Marc LAPETITE</i>	
Conclusion : une région à construire, un territoire et des ressources à préserver	295
<i>Luc DESCROIX, David VIRAMONTES et José Luis GONZALEZ BARRIOS</i>	
Glossaire	303
Résumé	311
Summary	317
Resumen	323