

Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe

José Luis Gonzalez Barrios
hydro-pédologue

Luc Descroix
géographe-hydrologue

David Viramontes
éco-pédologue

Jérôme Poulenard
pédologue

Alain Plenecassagne
ingénieur chimiste

Laura Macias
ingénieur informaticienne

Christelle Boyer
géographe

Arnaud Bollery
géographe

Les mesures qui ont été faites grâce au réseau de parcelles et de bassins équipés dans le secteur central de la Sierra Madre occidentale l'ont été sous pluie naturelle (180 pluies de 1994 à 1998), ce qui permet de s'affranchir de l'utilisation du simulateur de pluie et de disposer de données d'entrée « réelles ». Les parcelles de mesures, par contre, introduisent forcément un biais, puisque leur seule installation est une perturbation des conditions de ruissellement et d'infiltration naturelles ; on a donc autant que faire se peut, installé des parcelles en fonction de la topographie et en perturbant le moins possible les états de surface préalables. Mais il est clair que les seules données complètement « non biaisées » sont celles obtenues à l'exutoire de bassins versants.

Il est difficile de se faire une idée des formes du ruissellement et de ses seuils de déclenchement dans l'espace à partir des écoulements observés à l'exutoire, dans des bassins de plusieurs milliers de km². C'est pourtant la seule information dont on dispose sur une longue durée dans les études hydrologiques au Nord-Mexique. En l'occurrence, la station El Palmito a été mise en service en 1929 sur l'emplacement du futur barrage (mis en eau en 1946) ; les stations Sardinias (sur le Sextin) et Salome Acosta (sur le Ramos), contrôlant les deux principaux tributaires du Nazas ont été mises en service en 1970 et ont fonctionné correctement sauf lors de la grande crue de 1991-1992.

États de surface et comportement hydro-dynamique des versants

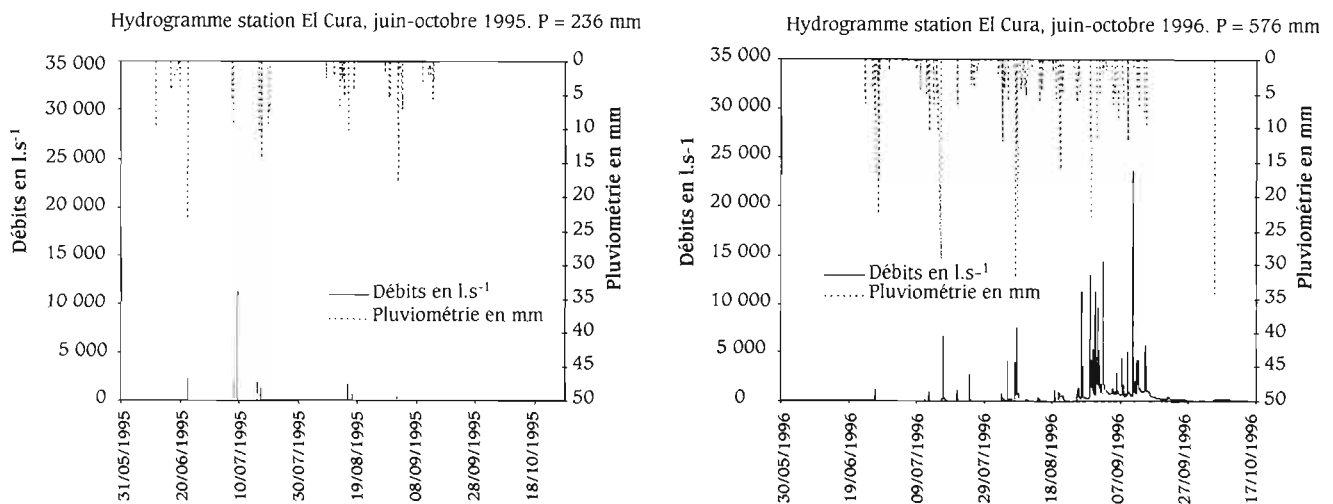
Un comportement hortonien ?

On prend ici comme exemple les hydrogrammes de la station El Cura pour les années 1995 et 1996 (fig. 32). Le bassin-versant (fig. 26) mesure 21,8 km² ; il est creusé dans les rhyolites et boisé à 43 %, et enfin il est assez peu escarpé (pente moyenne 6,6°).

L'observation de la pluviométrie et des débits de l'année 1995, représentative (tabl. XIII) des années de mesures 1994-1999, montre un retour rapide à 0 des écoulements après les précipitations, caractéristique des ruissellements **hortoniens** (HORTON, 1933), dus à une intensité des pluies dépassant la capacité d'infiltration des sols. Si l'on se réfère à l'année 1996, la seule qui ne soit pas représentative des années de mesure, on remarque que jusqu'au 18 août, le comportement des écoulements est conforme à celui de 1995. Puis, on a l'apparition d'un **débit de base** sur le cours d'eau, de quelques centaines de litres par seconde, et ce durant trois semaines, du fait d'une pluviosité abondante.

L'apparition d'un débit de base n'a été observée par la suite qu'à deux occasions : en 1997 durant quelques jours en fin de saison, du fait de précipitations assez abondantes et rapprochées, et du 15 au 20 juin 1998, c'est-à-dire avant l'arrivée des pluies de front intertropical, du fait du passage d'une queue de cyclone (60 mm en 4 jours).

Fig. 32 – Comparaison
des hydrogrammes
de la station de l'arroyo El Cura
pour 1995 et 1996.



Sécheresse des années d'observation

Mais l'observation des séries de précipitations connues dans la sierra (fig. 33) montre que les années 1994-1999 sont des années sèches voire très sèches, et qu'inversement, 1996 est par contre dans la moyenne des

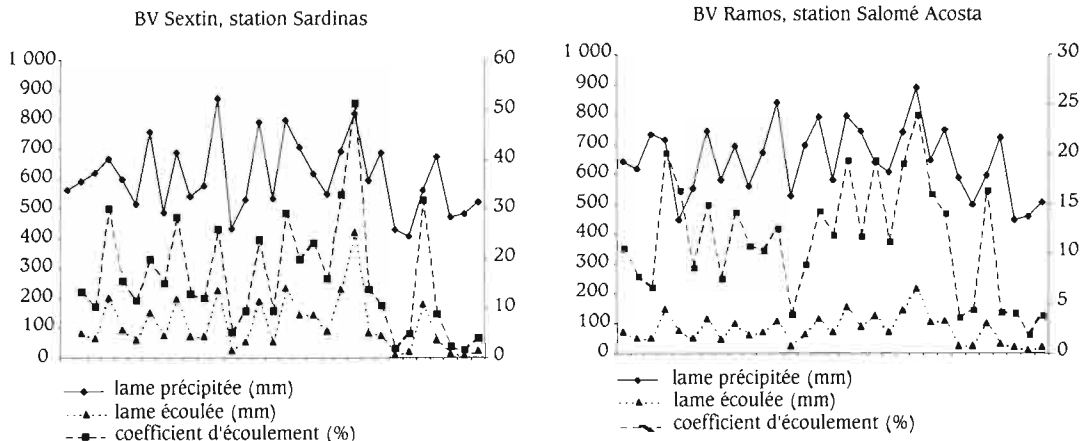


Fig. 33 – Pluviométrie, débits observés et coefficient d'écoulement pour les bassins du Sextin (gauche) et du Ramos (droite) de 1970 à 2000.

années 1970-2000. Peut-on en déduire que l'année 1996, peu représentative de la période d'observation, est en fait tout à fait typique de la série « longue », donc d'une situation « normale » ou « moyenne » ?

A priori oui, mais le manque d'observation à l'échelle de la parcelle ou du petit bassin nous oblige à nous référer aux grands bassins (Ramos et Sextin) qui eux, confirment que 1996 est plus proche des années antérieures à 1993, et qu'elle est probablement la seule année « représentative » dans les années de mesure. Le tableau XIII fait le point sur les données de pluie des années de mesure.

Cela est confirmé par un témoignage oral (mais bien sûr sujet à caution et soumis à une subjectivité incontrôlable) des habitants des villages de la sierra, qui nous ont affirmé en voyant un écoulement semi-pérenne se rétablir dans les petits cours d'eau après le 20 août 1996, qu'en fait cela était la situation normale, du moins celle à laquelle ils étaient habitués.

La figure 33 nous apporte des renseignements sur la réponse hydrologique des bassins à la pluviométrie, et à la succession d'années sèches qui a prévalu durant la période de mesures.

Tout d'abord on remarque que le déficit pluviométrique, à l'échelle des grands bassins (4 660 km² pour le Sextin ; 7 130 km² pour le Ramos) est moindre que sur les bassins expérimentaux (déficit de 20-25 % au lieu de 30-35 % à la Ciénega de Escobar, cf. tabl. XIII). Malgré cela, les **coefficients d'écoulement** et les **lames écoulées** ont beaucoup diminué après 1993 (sauf pour l'année 1996) dans chacun des bassins. La faiblesse des écoulements depuis 1994 rappelle celle que l'on observe sur

Le comportement hortonien des ruissellements mesurés est-il dû à la dégradation des sols ou à des mesures effectuées durant des années sèches ?

Site expérimental	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Rosilla				345	360	612	339	365		
Aguaje				295	324	690	298	320		
Manga				234	284	602	322	272		
BV expérimental										
Manga				245	321	578	281	260	300	
Cura				295	330	643	290	360	340	
Esmeralda				315	340	652	310	390	380	
Pilitas				312	310	620	315	280	310	
Station de Ciénega de Escobar*	428	432	512	370	490	694	460	410	365	445

Tabl. XIII – Pluviométrie des sites de mesure, 1994-1999 (années des observations hydrologiques).

*Il s'agit de la station la plus proche du réseau national de mesure mexicain (CNA). Elle est située à 10 km à l'ouest du centre du dispositif expérimental ; sa pluviométrie annuelle moyenne (1965-1998) est de 584 mm (écart-type 141 mm).

le bassin du Cura en 1995 (fig. 32) ; une telle faiblesse a aussi été enregistrée en 1994, 1997, 1998 et 1999. Par contre, la figure 33 montre que l'année 1996 se rapproche par sa pluviométrie comme par ses écoulements des années antérieures à 1991. L'année 1997 a un comportement spécial, avec une pluviométrie élevée et peu d'écoulement. En effet, c'est une année chaude en terme de El Niño, ce qui fait qu'il y a eu d'abondantes précipitations d'hiver. Toutefois celles-ci n'ont pas atteint le volume observé durant l'hiver 1991-1992 et surtout elles n'ont pas eu le même effet en terme de ruissellement. Les pluies de décembre 1991 et janvier 1992 avaient non seulement rempli le réservoir du barrage El Palmito, mais elles avaient même provoqué des inondations dans la Laguna, 150 km en aval, du fait de l'ouverture brutale du déversoir de trop-plein du barrage liée à une mauvaise prévision des apports. Cette erreur des autorités compétentes aurait entraîné la destruction volontaire des archives des deux stations pour les années 1991 et 1992.

On peut imaginer, au vu des données des longues séries sur les grands bassins et des six années de mesure sur les petits, que le ruissellement dans les pâturages de la Sierra Madre occidentale est mixte, principalement hortonien durant les années sèches et les premières semaines des saisons des pluies, et **cappusien** (CAPPUS, 1960) lors des cyclones, des hivers d'années « chaudes » (c'est-à-dire avec El Niño) et lors des années de pluviométrie normale, à partir d'une pluviométrie cumulée de 200 mm en un mois de saison des pluies.



Pour résumer à la fois spatialement et temporellement cette variation de faciès hydrologique, on peut estimer qu'il existe un *seuil de 500 mm de pluviométrie annuelle* au-dessous duquel tout le ruissellement est hortonien, et au-dessus duquel il est cappusien. Celui-ci apparaît quand 200 mm de précipitations se sont produits en quelques semaines, remplissant ainsi, dans une grande partie de l'espace, la capacité d'absorption en eau des sols, telle qu'elle a été calculée (DESCROIX *et al.*, 2002) : elle est de 32 mm en moyenne dans les phaeozems d'une épaisseur de 0 à 20 cm, et de 135 mm lorsqu'ils ont de 20 à 60 cm de profondeur ; ces deux catégories représentent 94 % de l'espace dans les pâturages et les forêts de la Sierra Madre occidentale. La faible profondeur de ces sols et l'imperméabilité totale des ignimbrites rhyolitiques sous-jacentes expliquent ce rapide passage à un fonctionnement en zone contributive saturée, que nous n'avons pu observer qu'en 1996 de façon notoire, du fait de l'indigence des précipitations lors de la période d'observations.

Ruissellement en nappe sur la tranchée de la route entre Santa María del Oro et Tepehuanes, un jour de pluie : pas de hiérarchisation de l'écoulement, toute la surface ruisselle.

**Conclusion :
l'effet de la durée
de l'événement quand
le réservoir est petit !**

Les pluies d'hiver et les pluies de queues de cyclones ont un enseignement intéressant : elles ruissellent, au bout de quelques heures ou de quelques jours, malgré des intensités bien plus faibles (0,5 à 2 mm.h⁻¹) que les conductivités hydrauliques observées sur le terrain. En effet, celles-ci sont en moyenne (avec une très forte variabilité spatiale, cf. DESCROIX *et al.*, 2002) de :

- 11 mm.h⁻¹ sur les surfaces de type « INT » ;
- 14,5 mm.h⁻¹ sur les surfaces « GC » ;
- 29 mm.h⁻¹ sur les « FPB ».

Or, si ces pluies sont peu intenses, elles peuvent durer plusieurs jours d'affilée, arrivant à remplir le réservoir sol. Si 40 % de la surface a une contenance de 32 mm d'eau (VIRAMONTES *et al.*, 2002), même si ce réservoir est vide au début des précipitations, (ce qui est toujours le cas des pluies d'hiver, et des cyclones se produisant avant la saison des pluies), le sol peut être rapidement saturé sur cette proportion d'espace. Ces pluies se produisent en effet souvent à un moment où l'évapotranspiration est faible (cas des pluies d'hiver). De ce fait, en deux jours de précipitation à 1 mm.h⁻¹ par exemple, le réservoir peut « déborder » et les versants fonctionner en surface contributive saturée. En début de saison, il faut 20 mm de pluie et en fin de saison, 5 à 15 mm pour qu'un orage d'une heure ruisselle. Cet effet de la durée a aussi été observé sur le site semi-aride d'Atotonilco (communication orale de Juan Estrada).

**Conséquences
sur les propriétés
physiques
des horizons
superficiels
des sols**

Des campagnes de mesures des propriétés physiques des sols ont été menées de 1997 à 2001 sur les bassins de la sierra. La première (1997) a été une campagne de mesure d'infiltrométrie par cylindre unique (méthode suggérée par ROOSE *et al.*, 1993). La densité apparente a été mesurée sur chaque site (méthode du cylindre). Des échantillons ont été prélevés qui ont permis de faire des granulométries (effectuées au laboratoire du Cenid Raspa à Gómez Palacio), ainsi que de déterminer les paramètres suivants :

- **capacité au champ** ;
- **point de flétrissement** ;
- teneur en matière organique ;
- carbone total ;
- **espace poral**.

En 1998, une campagne de mesure a été entreprise sur les mêmes sites que les tests cylindres, mais avec des infiltromètres TRIMS (VAUCLIN et CHOPART, 1992). Sur chaque site était réalisé un test en multi-potentiels (en faisant varier la dépression appliquée à l'infiltromètre) et trois tests simples (avec une dépression unique de 10 mm) étaient effectués, l'un avec un grand disque (25 cm de diamètre), les deux autres avec un petit disque (8 cm), pour avoir également une mesure en mode multi-rayons (VANDERVAERE, 1995). Le fait de prendre la moyenne des deux petits disques pour le calcul de K limite un peu l'effet de la variabilité spatiale des valeurs de conductivité. On a utilisé sur chaque site la plate-forme d'un des grands disques pour effectuer un prélèvement de densité apparente avec la méthode dite « de la piscine » ; ceux-ci se sont révélés plus robustes que le test de densité au cylindre.

Afin de cerner le lien de chaque variable entre elles et avec la conductivité hydraulique, qui nous paraissait ici devoir être l'élément clé pour comprendre le fonctionnement hydro-dynamique des sols, on a effectué une Analyse en composantes principales (ACP) de ces variables de sol.

Les résultats sont exposés dans la figure 34 ; le nom des variables de l'espace des deux premières composantes est explicité dans le tableau XIV.

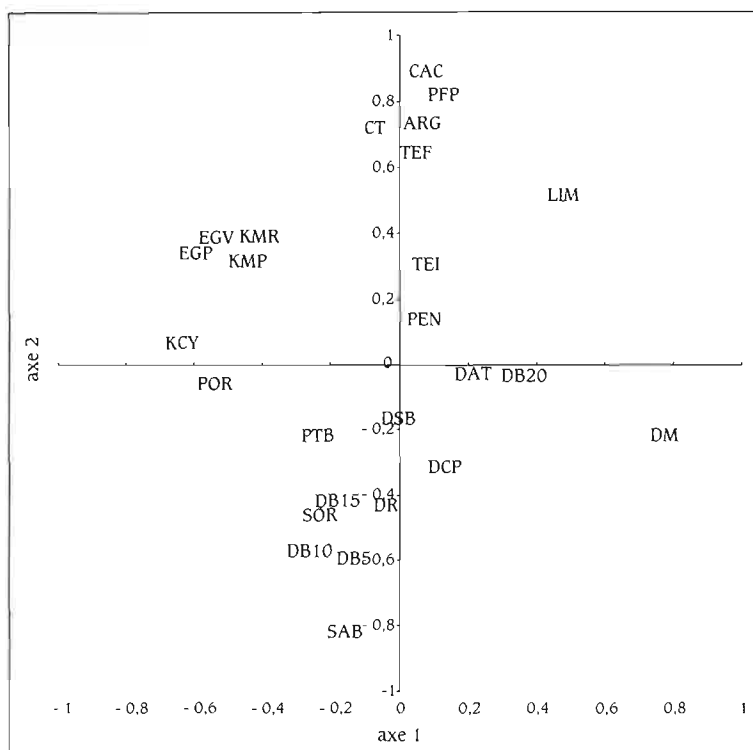


Fig. 34 – Espace des variables de l'ACP paramètres du sol (tiré de DESCROIX *et al.*, 2002).

Conductivité hydraulique	KMR KMP KCY	K mesurée au TRIMS en mode multi-rayons K mesurée au TRIMS en mode multi-potentiels K mesurée avec la méthode Beerkan
Densité apparente	DAT DCP DM DR	densité apparente du sol complet (matrice plus cailloux) densité des cailloux et pierres densité de la matrice densité réelle
Porosité	POR	espace poral
Pente	PEN	valeur de la pente
Dimension du bulbe d'humectation des tests cylindres	PTB DSB DB5 DB10 DB15 DB20	profondeur totale du bulbe diamètre superficiel du bulbe diamètre du bulbe à 5 cm de profondeur diamètre du bulbe à 10 cm de profondeur diamètre du bulbe à 15 cm de profondeur diamètre du bulbe à 20 cm de profondeur
Texture	ARG LIM SAB	% d'argile % de limon % de sable
Éléments grossiers	EGV EGP	% d'éléments grossiers (en volume) % d'éléments grossiers (en poids)
Sorptivité	SOR	sorptivité
Teneur en eau	TEI TEF	teneur en eau initiale teneur en eau finale
Propriétés du sol	CAC PFP CT	capacité au champ point de flétrissement permanent carbone total

Tabl. XIV – Paramètres physiques du sol pris en compte dans l'ACP.

L'espace des variables permet de mettre en évidence les points suivants (DESCROIX *et al.*, 2002) :

- il existe une corrélation évidente entre les valeurs de conductivité hydraulique (KMR et KMP en particulier) et la teneur en éléments grossiers (EGP et EGV) ; ceci correspond aux observations faites en termes de ruissellement et d'érosion ;
- la pente (PEN), la densité apparente totale (DAT, matrice + grossiers) et le diamètre du bulbe d'humectation (DSB) n'ont pas de relation notoire avec K.

Ces paramètres physiques expliquent les fortes variations de conductivité hydraulique entre les différents états de surface (Descroix *et al.*, 2001). Le point le plus important nous paraît être le rôle de la pierrosité, et en particulier le rôle des gros cailloux et des pierres libres dans les terrains pentus.

Le premier axe explique 24 % de la variance et est également déterminé par la porosité (POR), corrélée positivement à la conductivité, et par la densité de la matrice (DM), corrélée négativement avec K.

Le second axe (16 % de la variance expliquée) est caractérisé surtout par la teneur en argile (ARG), la capacité au champ (CAC), le point de flétrissement permanent (PFP), la teneur en carbone total (CT), et la teneur en eau à saturation (TEF), toutes variables corrélées positivement avec K ; par contre, là encore, la **densité réelle** (DR) lui est corrélée négativement.

On a utilisé en grande partie ces paramètres pour déterminer, dans un paysage où domine fortement l'érosion aréolaire (ou laminaire), les paramètres qui étaient à l'origine de la formation des ravines. Plusieurs des paramètres utilisés étaient difficilement numérisables, sauf à introduire un biais dans le traitement statistique des données. On a dû procéder alors à une AFC, analyse factorielle des correspondances, pour trouver les liens et corrélations entre variables étudiées.



Malgré la prédominance de l'érosion en nappe (ou aréolaire), les ravines se développent récemment dans les rares versants aux sols profonds.

On a pris en compte ici :

- des éléments végétaux (en taux de couverture) : litière (LIT), arbres (ARB), graminées (GRM), plantes annuelles (ANN) ;
- des éléments lithologiques : affleurements d'ignimbrites (IGN) ;
- des éléments pédologiques : proportion de sable (SAB), états de surface (GC), pierrosité (PIE), graviers (GRV), encroûtement (CRO) ;
- des éléments topographiques : pente (PEN), rugosité (RUG), présence de terrassettes (TER), distance de la ravine au drain principal (DRR), pente de cette distance (PRR) ;
- des éléments descriptifs des ravines : bassin versant l'alimentant (SRF), longueur (LON), et volume (VOL) de la ravine.

La figure 35 reproduit l'espace des variables de cette analyse suivant les deux principales composantes. Ces deux axes représentent respectivement 34 et 17 % de la variance expliquée. Cette analyse permet de souligner les relations suivantes :

- la taille des ravines (longueur et volume) est corrélée positivement avec la taille de leur bassin, certes, mais surtout avec : l'encroûtement des sols du bassin, la présence d'ignimbrites, les graminées ;

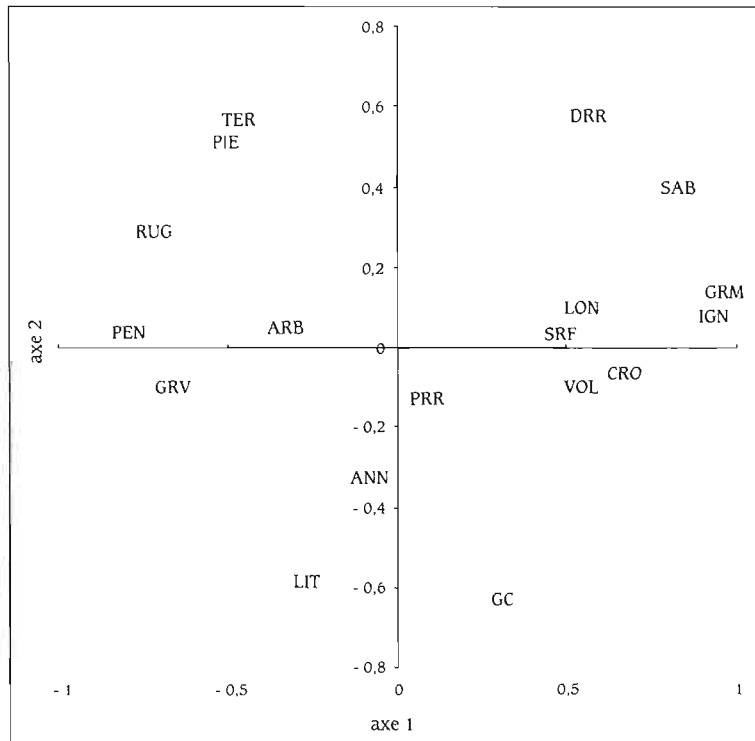


Fig. 35 – Espace des variables de l'AFC sur les ravines (tiré de travaux en cours).

– elle est reliée négativement à la pente, à la rugosité et à tous les éléments qui composent cette rugosité : terrassettes, pierrosité, présence de graviers.

Cette analyse a été réalisée à partir d'un échantillon de 31 ravines réparties sur 400 km².

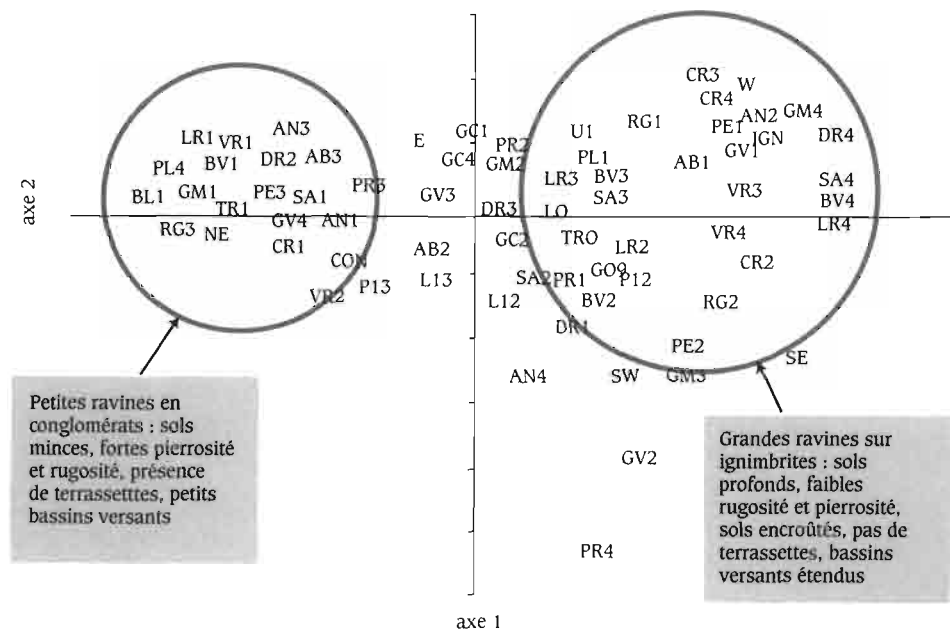
Elle confirme l'opposition déjà notée en termes d'états de surface, entre :

– les secteurs en pente douce et aux versants longs, encroûtés et pâturés, qui connaissent un fort ravinement si les sols sont suffisamment profonds ; l'érosion laminaire y est présente aussi, comme en témoignent l'appauvrissement des horizons superficiels en éléments fins, et la fréquente apparition en surface de l'horizon d'accumulation des argiles, normalement situé à 20 à 40 cm de profondeur.

– les secteurs de versants courts mais pentus, très rugueux et pierreux, où les ravines sont petites du fait que l'on atteint vite la roche-mère : l'érosion y est essentiellement laminaire, les ravines n'apparaissant en général que dans les talwegs principaux, et leur creusement étant lui aussi bloqué par la forte pierrosité.

Cette ségrégation apparaît nettement dans l'espace des ravines (fig. 36), où les deux ensembles se distinguent nettement, avec leurs éléments constitutifs. Les catégories sélectionnées pour l'analyse des correspondances sont mentionnées dans le tableau XV.

Fig. 36 – Espace des individus de l'AFC ravines.



Volume de la ravine (m ³)	VR1 VR2 VR3 VR4	0-100 100-1 000 1 000-10 000 + de 10 000	Longueur de la ravine (m)	LR1 LR2 LR3 LR4	0-90 90-230 230-600 + de 600
Distance entre le bas de la ravine et le cours d'eau (m)	DR1 DR2 DR3 DR4	0 10-35 35-150 150-250	Pente entre la ravine et le cours d'eau (°)	PR1 PR2 PR3 PR4	0 2-9 10-26 90
Surface de l'impluvium (m ²)	BV1 BV2 BV3 BV4	1 000-10 000 10 000-25 000 25 000-250 000 + de 250 000	Lithologie de l'impluvium	CON IGN	Conglomérats Ignimbrites
Pente de l'impluvium (°)	PE1 PE2 PE3	0-9,5 9,5-15 15-25	Rugosité de l'impluvium (°)	RG1 RG2 RG3	0-5 5-10 10-15
Taux de boisement de l'impluvium (%)	AB1 AB2 AB3	0 1-10 11-30	Taux de couverture en graminées (%)	GM1 GM2 GM3 GM4	0-3 3-15 15-31 + de 31
Taux de couverture par la litière (%)	LI1 LI2 LI3 LI4	0-2 2-6 6-12 + de 12	Taux de couverture par les annuelles (%)	AN1 AN2 AN3 AN4	0 0,1-1,5 1,5-3 + de 1,5
Taux de couverture par des graviers (%)	GV1 GV2 GV3 GV4	0-15 15-25 25-35 + de 35	Taux de couverture par des sables (%)	SA1 SA2 SA3 SA4	0 1-7 7-13 + de 13
Taux de couverture par des cailloux (%)	PI1 PI2 PI3 PI4	0-3 3-9 9-20 + de 20	Présence de blocs	BLO BL1	NON OUI
Taux de surface en gravier-croûte (%)	GC1 GC2 GC3 GC4	0-11 19-28 28-40 + de 40	Taux de surface encroûtée	CR1 CR2 CR3 CR4	0 0,5-10 10-21 + de 21
Présence de terrassettes	TRO TR1	NON OUI			

Tabl. XV - Ensemble des classes de variables prises en compte dans l'AFC « ravines ».

De fait, pour les états de surface caractérisés par l'abondance d'éléments grossiers (croûtes de type INT et GC), on constate une corrélation satisfaisante entre teneur volumique en éléments grossiers et conductivité hydraulique à saturation (fig. 37). Cependant, les points de conduc-

tivité hydraulique extrême PIL 32 et 33 s'écartent sensiblement de cette régression exponentielle et constituent des horsains, c'est-à-dire des éléments statistiquement isolés. Quoiqu'il en soit, plus la teneur en éléments grossiers est élevée, plus la conductivité hydraulique est forte. La réalisation d'une régression multiple prenant en compte outre la teneur en éléments grossiers, la porosité de la terre fine améliore un peu la régression (le coefficient de détermination passe de 0,42 à 0,52).

On voit se dessiner un scénario dans lequel déboisement et surtout excès de pâturage conduisent à la formation de nouveaux états de surface (anthropiques ?) qui eux-mêmes sont générateurs de nouveaux comportements hydrologiques de la part des sols et des versants. On verra plus loin ce qu'il en est à l'échelle des grands bassins versants.

Le tableau XVI et la figure 37 montrent l'impact du surpâturage sur le comportement hydrodynamique des sols et des versants.

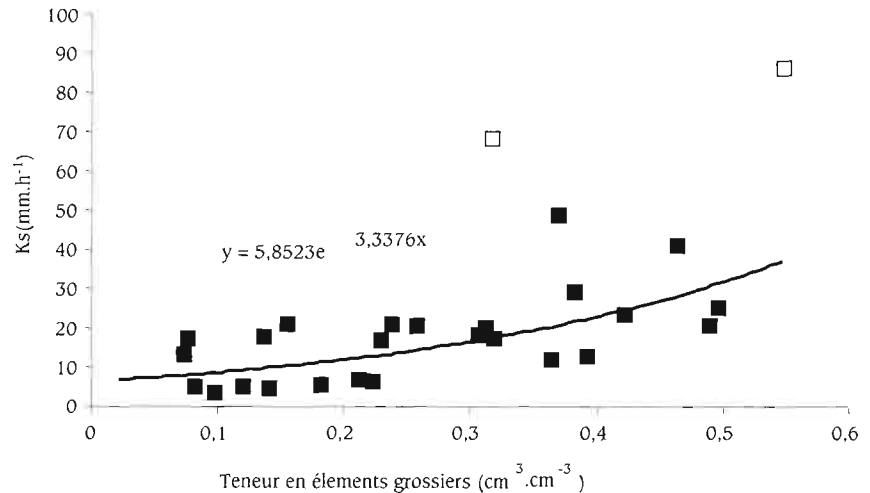


Fig. 37 – Corrélation entre conductivité hydraulique et teneur en éléments grossiers. Les deux carrés blancs représentent les points PIL 32 et PIL 33 mentionnés dans le texte.

Type de site	Ks (cylindre) mm/h	Densité apparente	Espace poral (%)	Capacité au champ (%)	Carbone total (%)
Non pâturé (sites PIL32 et PIL 33)	77	1,21	49	10,5	1,4
Surpâturé (sites PIL 31 et PIL 34)	24	1,55	35	8	0,9

Tabl. XVI – Caractéristiques physiques des horizons de surface (0-5 cm) d'un sol sur deux sites voisins.

Les mesures du tableau XVI ont été réalisées deux par deux de part et d'autre d'une clôture de barbelé, sur le même versant (mêmes conditions par ailleurs de pente, type de sol, exposition, etc.). Les sites PIL 32 et 33 sont situés dans une parcelle clôturée depuis dix ans ; PIL 31 et 34 dans une autre parcelle fortement surpâturée. Les deux paires de mesures ont été faites à 40 m l'une de l'autre. On constate que la densité apparente augmente très sensiblement sous l'effet du piétinement du bétail, et inversement, que ce dernier provoque une nette diminution de la conductivité hydraulique (K_s) à saturation, de l'espace poral, de la capacité au champ et de la teneur en carbone total. Cela signifie que *le surpâturage entraîne une compaction du sol et une très forte diminution de la capacité d'infiltration et de stockage en eau des sols*, ainsi qu'une dégradation de leur structure et de leur fertilité. Ces mesures ont été faites ponctuellement.

Le tableau XXII (p. 211) montre qu'à l'échelle de la parcelle de 50 m², les conséquences n'en sont pas moins drastiques. En effet, si la présence d'un arbre protège partiellement de l'érosion et du ruissellement les pâturages surexploités, son action est bien moindre que celle d'une mise en défens. Le piétinement du bétail accroît nettement ruissellement et pertes en sol, et a pour corollaire l'apparition d'une porosité non fonctionnelle, nommée porosité vésiculaire (CASNAVE et VALENTIN, 1989) : les pores sont bouchés par la compaction du sol et les effets du splash (rejaillissement) exagérés par la mise à nu de plages de plus en plus grandes du sol.

De fait à l'échelle ponctuelle et de la parcelle (comme fraction du versant), on constate des modifications drastiques des états de surface et des caractéristiques physiques du sol, qui ne sont pas sans conséquences sur le fonctionnement hydrodynamique des versants. La surexploitation de l'espace semble tangible (cf. « Trop de bétail et trop de bûcherons. Une économie minière », p. 191) et a des conséquences évidentes au niveau du bilan hydrique ; leur mise en évidence à l'échelle locale, dont il a été question ici, suggère des modifications des bilans hydriques à plus grande échelle qui seront abordées plus loin.

Conclusion

Les travaux réalisés sur les propriétés physiques du sol avaient surtout pour but de montrer l'extrême variabilité spatiale de ces propriétés et la difficulté de les spatialiser (DESCROIX et *al.*, 2002). Mais ils ont permis aussi de bien cerner les propriétés physiques actuelles des sols et ce

qu'elles devaient à la surexploitation des terres et en particulier au surpâturage et aux effets d'un piétinement exagéré du bétail. Celui-ci a drastiquement changé les états de surface et les conditions de l'infiltration, modifiant le régime hydrologique jusqu'à l'échelle du bassin versant de 5 000 km². En effet, comme le montrent des travaux en cours (DESCROIX *et al.*, soumis), l'érosion laminaire (ou aréolaire) l'emporte du fait de l'extrême extension spatiale du surpâturage et des conditions de surface encroûtées et d'empierrement qu'il génère. Il en résulte, outre la généralisation des « terrassettes » sur les pentes supérieures à 20 %, une pierrosité très forte et générale, qui n'a qu'un seul avantage en terme de préservation du milieu : c'est la constitution d'un pavage protégeant en partie le sol de l'énergie cinétique de la pluie.

Références

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.

CAPPUS C., 1960 – Bassin expérimental de l'Alrance. Étude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche*, juillet-août 1960.

CASENAVE A., VALENTIN C. (1989) – *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom, coll. Didactiques, 229 p.

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 of Mexico). *Catena* 43-2 : 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.

DESCROIX L., GONZALEZ BARRIOS J.L., VIRAMONTES D., ESTEVES M., POULENARD J., BOLLERY A., 2005 – Gully and laminar water erosion on subtropical mountainous slopes : impact of land use changes and consequences on scale effect. Soumis à *Catena*.

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.

HORTON R.E. 1933 – The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14 : 446-460.

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.

ROOSE E., BLANCANEUX P., FREITAS P., 1993 – Un test simple pour observer l'infiltration et la dynamique de l'eau dans les horizons du sol. *Cah. Orstom, sér. Pédologie*, 16 (1) : 43-72.

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.

VAUCLIN M., CHOPART J-L., 1992 – L'infiltrométrie multi-disques pour la détermination *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. *Agron. Trop.*, 46 : 259-271.

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 : 239-252.

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