

Une eau menacée par la dégradation des ressources végétales

Luc Descroix
géographe-hydrologue

David Viramontes
éco-pédologue

Eva Anaya
biologiste pastoraliste

Henri Barral
géographe pastoraliste

Alain Plenecassagne
ingénieur chimiste

José Luis Gonzalez Barrios
hydro-pédologue

Jeffrey Bacon
professeur en sciences de la forêt

Laura Macias
ingénieure informaticienne

Les travaux menés à Boleras pendant huit années (de 1993 à 2000 inclus) concernaient les conséquences hydrologiques des changements d'usage des sols. On a déterminé (cf. « Trop de bétail et trop de bûcherons. Une économie minière », p. 191) que le déboisement était réel et rapide, et que le surpâturage était aigu. C'est d'ailleurs probablement ce dernier qui a le plus d'influence sur le régime des cours d'eau, par l'intermédiaire de la création de nouveaux états de surface au comportement hydrodynamique différent de celui des sols végétalisés précédents. C'est donc essentiellement sur les zones de pâturages que l'on a mené des mesures précises. Les travaux sur les forêts sont décrits ci-dessous, mais les conclusions sont plus difficiles à généraliser dans le contexte de la Sierra Madre, car les parcelles « forêt » du site de la Rosilla, suivies en 1995 et 1996, n'ont pas été l'objet d'une exploitation comme celle que l'on observe dans les grands secteurs forestiers de la Candela ou de la sierra Tarahumara. De plus, les grandes forêts de pins exploitées étant situées dans les secteurs les plus hauts et les plus humides, la repousse d'une végétation secondaire y est rapide, et il est possible que l'influence hydrologique d'un déboisement y soit minime ; des recherches sont en cours dans le massif de la Candela, sur l'arroyo « Ciénega de la Vaca ». Enfin, signalons que tous les habitants de la sierra avec lesquels on a évoqué ce problème étaient unanimes pour dire que les pâturages et la forêt s'étaient beaucoup dégradés dans les dernières décennies, et qu'il y avait bien plus d'eau (et plus longtemps) dans les cours d'eau auparavant.

La question scientifique de l'impact hydrologique des changements d'usage du sol

L'impact des changements d'usage des sols sur le comportement hydrologique des bassins versants est actuellement un des problèmes majeurs des responsables de la gestion des ressources en eau. Ces changements sont d'ordre très divers :

- la construction de barrages ou d'ouvrages hydrauliques peut influencer très vite le régime et le bilan de l'eau d'un bassin ;
- l'urbanisation, comme l'ont récemment montré ROSE et PETERS (2001) en Georgie (États-Unis), peut ne pas modifier significativement les coefficients d'écoulement, mais peut exagérer crues et étiages des cours d'eau ;
- le surpâturage et le déboisement peuvent avoir un impact, et c'est la question que nous allons étudier ici.

Les premiers grands défrichements ainsi que le nombre de crues et leur gravité observés dès le Moyen Âge par les habitants du Dauphiné et de haute Provence ont fait l'objet de multiples spéculations et querelles d'experts avant d'être étudiés scientifiquement. Si l'administration des forêts s'est appelée dans différents pays « Eaux et Forêts » c'est bien que le lien entre les deux semble établi. Aux États-Unis, dès 1909, le bassin expérimental de Wagon Wheel Gap (Colorado) a été équipé pour étudier l'influence hydrologique des usages du sol (HEWLETT *et al.*, 1969).

HIBBERT (1967) a produit l'une des premières synthèses de données expérimentales ; à partir du comportement de 39 bassins, il conclut que la réduction du couvert forestier conduit à une augmentation des débits, et qu'inversement, la re-végétalisation de sols dénudés diminue les écoulements.

BOSCH et HEWLETT (1982) ont synthétisé les résultats des expérimentations sur 94 bassins versants de différentes régions du monde. Leurs résultats ont confirmé l'augmentation des coefficients d'écoulement avec le déboisement. Ils ont également mis en évidence les faits suivants :

- les réponses de l'écoulement aux changements des couverts végétaux du bassin sont sensiblement plus importantes sous les climats humides ;
- les formes des massifs végétaux ont une grande influence sur le ruissellement et l'écoulement : les conifères réduiraient plus les écoulements que les feuillus, les formations buissonnantes ayant peu d'impact ;
- cependant, ils ont constaté que dans l'ensemble des résultats, la corrélation entre le taux de progression du boisement et la réduction de l'écoulement est médiocre.

Le premier point est parfaitement illustré par HUDSON et GILMAN (1993) au Plynlimon (ouest de l'Angleterre) et par COSANDEY (1995) au mont Lozère : dans ces deux exemples, la pluviométrie annuelle moyenne

dépasse les 2 000 mm et les forêts de reboisement réduisent la lame écoulée annuelle de plusieurs centaines de mm par comparaison aux prairies naturelles préexistantes.

Une synthèse a été réalisée par STEDNICK (1996), qui a actualisé les données de Bosch et Hewlett, et qui, tout en confirmant le lien entre coupe forestière et augmentation des écoulements, fixe un seuil de déboisement de 20 % du bassin en deçà duquel aucune modification n'intervient. L'auteur conclut que « la variabilité des réponses des débits annuels aux coupes forestières suggère des comportements complexes et non linéaires ». Cette synthèse intègre des bassins de régions très différentes des États-Unis, et ceux de l'Oregon qui reçoivent aussi plus de 2 000 mm par an, voient les lames écoulées annuelles augmenter de 200 à plus de 400 mm en cas de coupe.

Mais dans les secteurs moins pluvieux, les coefficients d'écoulement ne sont pas toujours suffisamment modifiés par les changements d'usage du sol pour qu'on puisse les trouver significatifs. C'est pourquoi il est plus pertinent dans ces cas de noter, plutôt que des variations de débits, celles d'indices mis au point pour cela ; TALLAKSEN (1995) en propose quelques-uns qui sont utilisables dans les pays tropicaux secs.

Dans un secteur aride du piedmont andin, BRAUD *et al.* (2001) ont observé des résultats inattendus : un bassin largement couvert de broussailles et peu pentu produit deux fois plus de ruissellement et dix fois plus de sédiments qu'un autre bassin peu végétalisé et très pentu ; dans ce même secteur, les mêmes auteurs avaient montré auparavant que « la variabilité spatiale de la pluie et des types de sols avait une influence sur le ruissellement d'un ordre de grandeur supérieur à celui de la variabilité spatiale de la végétation » (BRAUD *et al.*, 1999).

À l'échelle de la parcelle expérimentale, on a constaté comme plusieurs auteurs qui ont travaillé en différentes forêts du globe (FRISTCH, 1990 ; SORRISO *et al.*, 1994 ; SCOTT MUNRO et HUANG, 1997 ; CROKE *et al.*, 1999), 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.

En conclusion, il semble bien que la forêt retient l'eau dans le sol, c'est-à-dire que sa présence diminue les écoulements (par rapport à d'autres types de végétation ou d'usage du sol). Elle a surtout indéniablement un rôle régulateur : sa capacité à retenir l'eau lui permet aussi d'en restituer une partie sur le long terme, longtemps après l'épisode pluvieux. Par conséquent, *un bassin boisé aura des étiages et des crues moins marqués qu'un bassin cultivé ou pâturé.*

La coupe des forêts et le sur-piétinement des pâturages entraînent l'apparition de nouveaux états de surface qui, en plus de la disparition progressive des systèmes racinaires, modifient les conditions du ruissellement, de l'infiltration, et l'ensemble du bilan de l'eau y compris des eaux de recharge des nappes, les chemins de l'eau pouvant être drastiquement changés.

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 du sol (VALENTIN et CASENAVE, 1992 ; JANEAU et RUIZ, 1992 ; TARIN, 1992 ; VANDERVAERE, 1995 ; JANEAU *et al.*, 1999). Le rôle des sols à surface caillouteuse a un impact ambivalent (RUIZ FIGUEROA et VALENTIN, 1983). D'une part, les pierres peuvent empêcher 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 de la superficie du sol absorbent l'impact des gouttes des 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.

PONCET (1981), forestier, a tout de même une position originale : « Ce n'est que depuis quelques années, et à l'initiative de chercheurs soviétiques, que la comparaison, par méthodes statistiques, des débits écoulés par de vastes bassins de fleuves ou rivières, couvrant plus de 1 000 km², différents par leur couverture végétale mais par ailleurs similaires (géologie, relief, climat...) a pu témoigner d'un accroissement des débits écoulés, donc du bilan hydrique global des grands bassins, parallèles à l'augmentation de leur taux de boisement ».

Le ruissellement et l'érosion : conséquences du déboisement et du surpâturage dans la Sierra Madre occidentale

Faute de pouvoir déboiser de grandes superficies afin de comparer écoulements et pertes en sol avant et après déboisement, on s'est contenté, sur un même site, d'analyser ces données sur des parcelles boisées et déboisées.

Pour estimer l'impact du surpâturage, on a utilisé des parcelles dont on savait qu'elles avaient été encloses depuis longtemps, et on a comparé avec des parcelles pâturées (voir détail du dispositif, fig. 26, p. 156). On a montré (cf. « Trop de bétail et trop de bûcherons. Une économie minière », p. 191) comment le piétinement du bétail transformait les paramètres physiques du sol. Les tableaux XXI et XXII résument les conséquences du déboisement et du surpâturage à l'échelle de la parcelle.

Variables	Coefficient de ruissellement (%)	Pertes en sol (g.m ⁻²)
<i>Présence ou absence d'arbre (parcelles de 50 m²)</i>		
Pas d'arbre et pas de litière	23	133
Pas d'arbre mais présence de litière	8,5	30
Avec arbre	2,8	1,1
<i>Type d'arbre (parcelles de 1 m², 7 répétitions)</i>		
Pins	9	74
Chênes	3	45
<i>Pente (parcelle de 1 m², 3 répétitions)</i>		
12 %	6	30
33 %	9	110
57 %	5	53

Tabl. XXI – Influence des facteurs environnementaux sur ruissellement et érosion en forêt.

Variables (2 répétitions à chaque cas)	Coefficient de ruissellement (%)	Pertes en sol (g.m ⁻²)
<i>Présence ou absence d'arbre</i>		
Pas d'arbre	34	45
Pas d'arbre mais enclos	19	12
Avec arbre	19	26
<i>Pente</i>		
12 %	31	42
27 %	21	29
<i>Porosité vésiculaire</i>		
avec	35	70
sans	7	7
<i>Piétinement par le bétail</i>		
avec	43	90
sans	8	7

Tabl. XXII – Influence des facteurs environnementaux sur ruissellement et érosion en zone de pâturages (parcelles de 50 m²).

Les valeurs de ruissellement et de pertes en sol données dans les tableaux XXI et XXII apportent quelques enseignements :

– le couvert des arbres protège bien le sol. L'amortissement de l'énergie cinétique des gouttes par les feuillages fait baisser sensiblement les deux

paramètres sous les arbres ; il est bien plus marqué en forêt qu'en pâturages. Dans ces derniers, les graminées et les herbacées pérennes protègent bien le sol, à condition bien sûr de ne pas être pâturées. On remarque d'ailleurs que le pâturage sans arbre limite plus ruissellement et pertes en sol que l'arbre sur un terrain surpâturé ;

– la pente n'est pas un facteur aggravant le ruissellement et l'érosion ; c'est même le contraire en pâturages, comme les différences d'états de surface (cf. « Un encroûtement des sols limitant l'infiltration », p. 155) le laissaient présager ;

– sous forêt, les chênes protègent mieux le sol que les pins, ce qui est dû surtout à leur litière plus épaisse et couvrante ;

– la présence de porosité vésiculaire (pores inactifs car bouchés) est un facteur exagérant nettement ruissellement et érosion ; il en est de même du piétinement du bétail, ce que laissait déjà entrevoir le tableau XVI.

Les parcelles déboisées qui ont été instrumentées avaient été coupées plusieurs années auparavant, et souvent pâturées ; elles présentaient en grande partie un sol induré dont la formation est favorisée par la forte teneur en argile (replats, plateaux sommitaux, bas de versants) et le piétinement du bétail. Cette forte teneur en argile est responsable lorsque ces horizons affleurent (par érosion des horizons supérieurs) de la formation des croûtes épaisses (type INT) ; elle est aussi attestée par les fentes de retrait que l'on peut observer en fin de saison sèche dans l'horizon B.

On a voulu savoir quelle pouvait être l'influence immédiate d'un déboisement ; faute de pouvoir déboiser 10 000 ha d'un seul tenant comme a pu le faire l'USDA à Tombstone (Arizona), on s'est contenté de déboiser un micro-bassin de 450 m² attenant à son alter ego qui a été laissé tel quel.

La coupe a été effectuée au début de la saison des pluies 1995. Les conséquences de la coupe ont été les suivantes :

– le ruissellement est plus élevé dans le micro-bassin coupé dès la première année (24 % de plus) ; cette différence s'accroît la deuxième année, où le ruissellement est de 53 % supérieur, probablement du fait de la disparition progressive de la litière (fig. 41) ;

– inversement, les pertes en sol sont plus faibles la première année sur le micro-bassin coupé que sur celui qui a gardé ses arbres ; c'est probablement dû aux branchages et résidus de coupe dans la parcelle qui ont piégé les sédiments. La différence est plus grande l'année de la coupe (62 % de pertes en sols en moins sur la parcelle déboisée) que l'année suivante (35 % de moins) (fig. 42).



a



b



c

Les micro-bassins
de la Rosilla (450 m²).
a, le bassin boisé ;
b et c, le bassin déboisé :
b, avant la coupe ;
c, juste après la coupe.
Les déversoirs en V
« à lame mince » servent
à la mesure des débits.

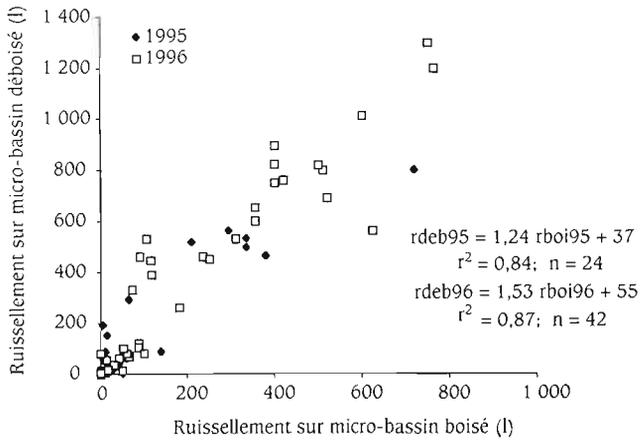


Fig. 41. –Relation entre le ruissellement dans le micro-bassin déboisé (rdeb) et le micro-bassin boisé (rboi) pour 1995 et 1996.

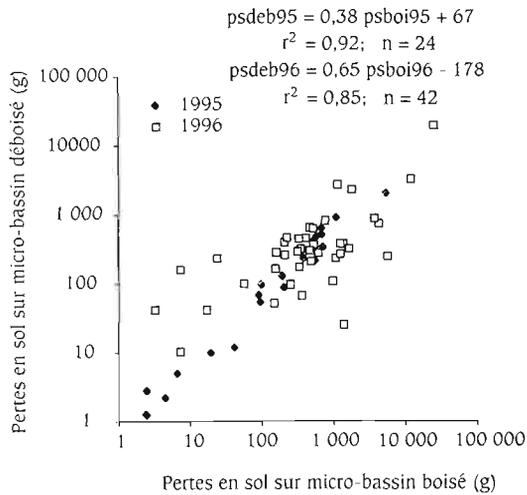


Fig. 42 – Relation entre les pertes en sol du micro-bassin déboisé (psdeb) et celles du micro-bassin boisé (psboi) pour 1995 et 1996.

Conséquences hydrologiques au niveau des grands bassins versants

Après avoir recherché les modifications de l'écoulement au niveau des parcelles et des micro-bassins versants, on a tenté de déterminer si l'évolution des usages des sols avait pu avoir une influence sur le comportement hydrologique des grands bassins versants. On s'est pour cela appuyé sur les données de débits journaliers des deux stations qui contrôlent les deux branches amont du río Nazas, au-dessus du réservoir de El Palmito. Il s'agit de la station Salomé Acosta sur le río Ramos (7 130 km²) et de la station Sardinias sur le río Sextin (5 060 km²). Les données utilisées sont les débits moyens journaliers de 1970 à 1998 (VIRAMONTES et DESCROIX, 2002).

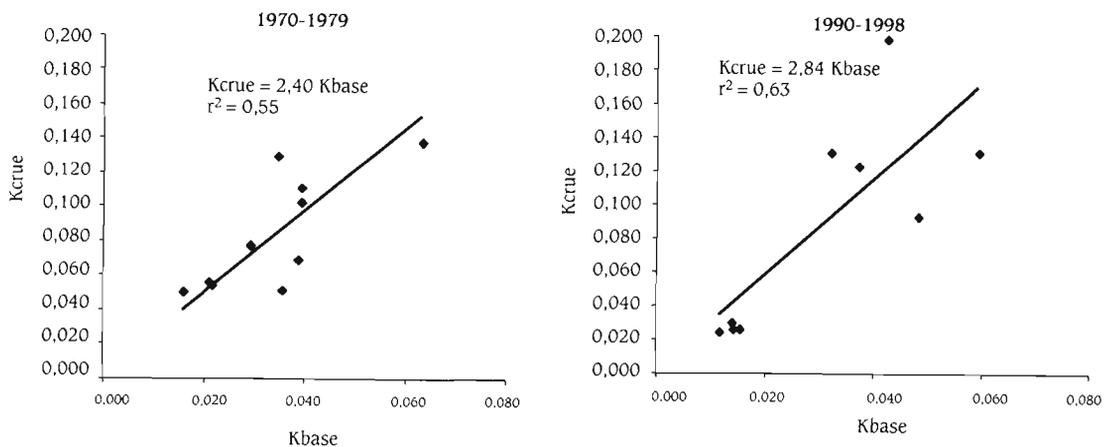
Avant de procéder à une analyse statistique des données de débits journaliers, on s'est assuré d'abord que les séries étudiées ne comportaient aucune tendance ou anomalie qui pourrait influencer tout traitement et le rendre caduc ou erroné, et ce en utilisant les procédés de recherche de tendance proposés par le logiciel Khronostat de l'IRD (VIRAMONTES, 2000).

On a ensuite disposé de plusieurs outils afin de détecter des évolutions entre les années 1970 et les années 1990.

Le premier est basé sur la décomposition des débits des cours d'eau en débits de base et débits de crue, suivant un algorithme proposé par GUSTARD *et al.* (1989), cité par HUMBERT et KADEN (1994). Il s'agit de distinguer, dans le débit d'un cours d'eau, la part de l'écoulement qui est due à la pluie qui vient de se produire (débit de crue) de celle qui est alimentée par les circulations retardées (nappes perchées, vidange lente du sol, etc.) ; cette dernière se serait écoulee même s'il n'avait pas plu (débit de base). La figure 43 montre que le rapport entre débit de crue (Kcrue) et débit de base (Kbase) augmente sensiblement entre la première décennie (1970-1979) et la dernière décennie (1990-1998) de la période étudiée, pour le río Ramos ; on note la même tendance, moins prononcée toutefois, pour le río Sextin (VIRAMONTES et DESCROIX, 2002).

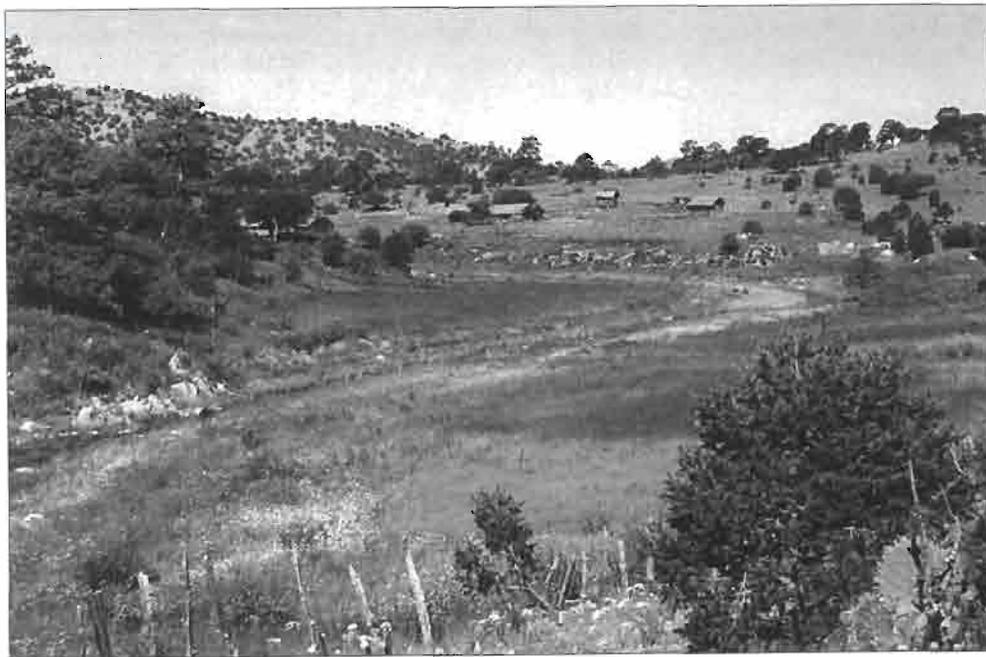
Le deuxième outil est la mesure du temps de réponse des cours d'eau, c'est-à-dire le temps écoulé entre la précipitation et la montée de l'eau à l'exutoire du bassin. Là aussi on constate une légère évolution, cette fois-ci plus marquée dans le bassin du Sextin que du Ramos ; le temps de réponse du premier diminue en effet de 5,5 % (tabl. XXIII) entre la décennie 1970 et la décennie 1990, alors qu'il ne diminue que de 1,6 % pour le bassin du Ramos.

Fig. 43 - Évolution du rapport entre coefficient d'écoulement de crue (Kcrue) et coefficient d'écoulement de base (Kbase) pendant les périodes 1970-1979 et 1990-1998 dans le bassin du Ramos.





Arroyo El Cura, près de Escobar, au-dessus de Tepehuanes : la plupart du temps, les cours d'eau sont vides et ne se remplissent que pour quelques heures après les pluies.



L'arroyo Pilitas au niveau du hameau de Quelites, au-dessus de Tepehuanes, fin août 1996, à une période où il a gardé de l'eau pendant plusieurs semaines d'affilée.

Tabl. XXIII – Temps de réponse moyen total et par décennie des bassins versants.

		Total	Séparation par décennie			Différence années 70 et 90
			1970-1979	1980-1989	1990-1998	
Bassin Ramos	Nombre d'événements	2 273	836	847	590	1,6 %
	Moyenne (jours)	1,45	1,45	1,46	1,43	
	Écart-type	0,38	0,38	0,36	0,40	
	Coefficient de variation	0,26	0,26	0,25	0,28	
	Student (80 %)		*	*	*	
			1971-1979	1980-1989	1990-1997	années 70 et 90
Bassin Sextin	Nombre d'événements	1 720	615	701	404	5,5 %
	Moyenne	1,32	1,34	1,34	1,26	
	Écart-type	0,36	0,35	0,33	0,41	
	Coefficient de variation	0,27	0,26	0,25	0,32	
	Student (80 %)		✓	*	✓	

* : Différence des moyennes non significative. ✓ : Différence des moyennes significative.

Tabl. XXIV – Valeurs des paramètres du modèle Nazas par décennie des bassins du rio Ramos et du rio Sextin.

Paramètres du bassin du Ramos	Période			
	1970-1998	1970-1979	1980-1989	1990-1998
Capacité maximale du réservoir (H_{\max})	220*	220	220	220
Paramètre de décroissance de l'humidité (α)	0,031	0,02	0,029	0,04
Paramètres du bassin du Sextin	Période			
	1971-1997	1971-1979	1980-1989	1990-1997
Capacité maximale du réservoir (H_{\max})	130*	130	130	130
Paramètre de décroissance de l'humidité (α)	0,04	0,040	0,054	0,061

* Les valeurs de H_{\max} sont fixées par le modèle, mais sont proches des valeurs observées.

Cette diminution signifie que l'écoulement est plus rapide, que la rétention de l'eau par le bassin versant est inférieure à ce qu'elle était auparavant. Ceci est lié à la diminution de la couverture végétale et à la modification des états de surface que celle-ci a occasionnée.

Le dernier outil utilisé est le paramètre α du modèle Nazasm (DESCROIX *et al.*, 2002) ; ce paramètre de décroissance de l'humidité traduit le temps nécessaire pour que le sol reprenne son état initial d'humidité. C'est l'inverse du temps de ressuyage du sol : plus il est élevé, et plus le temps de ressuyage du sol est court. Le tableau XXIV permet de constater que sur les deux bassins, on a une augmentation sensible de la valeur de ce paramètre entre la décennie 1970 et la décennie 1990. Cela indique que le temps nécessaire au sol pour retrouver son état initial d'humidité a diminué, ce qui pourrait, là aussi être dû à la modification des états de surface du sol.

Discussion et conclusion

Par rapport aux chiffres donnés par le tableau XXI, où la parcelle sans litière était déboisée depuis longtemps, on voit bien qu'un déboisement récent a finalement peu d'impact sur le ruissellement. Pourtant, la parcelle de 50 m² « sans arbre mais avec litière » du tableau XXI venait aussi juste d'être déboisée ; alors comment expliquer qu'elle ait connu un triplement des écoulements et une multiplication par 25 des pertes en sol quand les deux micro-bassins connaissaient, pour les mêmes années de mesure, des modifications bien plus faibles et nuancées ? C'est probablement lié au fait que les micro-bassins ont été déboisés comme s'il s'agissait d'une vraie coupe : on y a laissé les détritiques de coupe, ce qui a considérablement limité les effets du déboisement tant en termes d'érosion que de ruissellement.

Mais il n'a pas été possible pour des raisons logistiques tenant à l'éloignement du site de mesure et à la difficulté d'y accéder en voiture, de poursuivre les mesures plus de deux années consécutives. Il nous est de ce fait difficile de dire ce qu'il serait advenu des micro-bassins au comportement hydrologique apparemment peu modifié par la coupe, au-delà de ces deux années. Donc il est impossible de savoir si la litière a été dégagée et le sol dénudé et plus dégradé par le splash et le ruissellement. Il faut toutefois souligner les résultats du tableau XXI, qui montrent que le déboisement total fragilise considérablement les sols et en accroît très fortement le ruissellement et les pertes de substance.

Enfin la comparaison des tableaux XXI et XXII montre que les coefficients de ruissellement et de pertes en sol ne sont pas très différents sous forêts et sous pâturages. Seules les parties de forêts vraiment situées sous la couronne des arbres et protégées par d'épaisses litières sont bien plus perméables et sont beaucoup moins sujettes à l'érosion.

Les recherches sur l'impact du déboisement ou du reboisement sur le fonctionnement hydrologique des bassins ont été menées surtout dans des zones très humides (Guyane, Oregon, Pays de Galles, mont Lozère), où la présence de la forêt se traduit par une baisse de 200 à 400 mm de la lame d'eau annuelle écoulée. Ici, dans la Sierra Madre occidentale, la lame d'eau écoulée annuelle moyenne est de 100 mm. L'impact du rapide déboisement actuel est difficile à estimer car il n'y a pas de bassin versant spécifiquement forestier qui soit équipé. De ce fait, l'impact du déboisement risque de n'être qu'un bruit de fond face à l'impact du surpâturage et des changements d'états de surface qu'il provoque. C'est aussi la raison pour laquelle on a fait appel, pour les deux grands bassins, à des indices d'évolution des régimes d'écoulement plus sensibles, car l'évolution attendue est évidemment moindre ici, étant donné la faible lame écoulée.

Références

- BOSCH J.M., HEWLETT J.D., 1982 – A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of hydrology*, 55 : 3-23.
- BRAUD I., FERNÁNDEZ P.C., BOURAOUI F., 1999 – Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. *J. of Hydrol.*, 216 : 155-171.
- BRAUD I., VICHE A.I.J., ZULUAGA J., FORNERO L., PEDRANI A., 2001 – Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region : observation and modelling. *J. of Hydrol.*, 254 : 124-144.
- COSANDEY C., 1995 – La forêt réduite elle l'écoulement annuel ? *Annales de Géographie*, 581-582 : 7-25.
- 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., NOUVELOT J.F., VAUCLIN M., 2002 – Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico). *Journal of Hydrology*, 263 : 114-130.
- 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.
- GUSTARD A., ROALD L.A., DEMUTH S., LUMADJENG H.S., GROSS R., 1989 – *Flow regimes from experimental and network data (FRIEND)*. Wallingford (UK), Institute of Hydrology, 2 vol.
- HEWLETT J.D., LULL H.W., REINHART K.G., 1969 – In defence of experimental watersheds. *Water Resour. Res.*, 5 (1) : 306-316.
- HIBBERT A.R., 1967 – « Forest treatment effects on water yield ». In Spooer W.E., Lull H.W. (eds) : *Int. Symp. For Hydrol.*, Pergamon, Oxford, 813 p.
- HUDSON J.A., GILMAN K., 1993 – Long-term variability in the water balances of the Plynlimon catchments. *Journal of Hydrology*, 143 : 355-380.
- HUMBERT J., KADEN U., 1994 – Détection des modifications de l'écoulement fluvial au moyen de l'indice de débit de base. *Revue de Géographie alpine*, 82 (2) : 25-36.
- 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 Mapimí*, 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.
- POESEN J., LAVÉE H., 1994 – Rock fragments in top soils : significance and processes. *Catena*, 23 (1-2) : 1-28.
- PONCET A., 1981 – « Interactions forêts et climats ». In : *Eaux et climats, mélanges offerts en hommage à C. Péguy*, Grenoble CNRS : 445-461.
- ROSE S., PETERS N.E., 2001 – Effects of urbanisation on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA) : a comparative hydrological approach. *Hydrol. Process.* 15 : 1441-1457.
- RUIZ FIGUEROA J.F., VALENTIN C., 1983 – *Effects of various types of cover on soil detachment by rainfall*. Abidjan, Orstom, 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.
- 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.
- STEDNICK J.D., 1996 – Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176 : 79-95.
- TALLAKSEN L.M., 1995 – A review of baseflow recession analysis. *J. of Hydrol.*, 165 : 349-370.
- TARIN G., 1992 – *Caracterización hidrodinámica del suelo a nivel de una formación en mogote, utilizando un simulador de lluvia en la Reserva de la Biosfera de Mapimí, Durango*. Tesis profesional, Biología, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México, 125 p.

VALENTIN Ch., CASENAVE A., 1992 – Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 6 : 1667-1673.

VALENTIN Ch., 1994 – Surface sealing as affected by various rock fragment cover in West Africa. *Catena*, 23 (1-2) : 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., 2000 – *Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre occidentale, Mexique)*. *Causes et*

conséquences de son évolution. Thèse de géographie de l'université Joseph Fourier-Grenoble 1, 450 p.

VIRAMONTES D., DESCROIX L., 2002 – Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre occidentale (Mexique). *Revue des Sciences de l'Eau*, 15 (2) : 493-513.

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