

Les ressources en eaux de la Sierra Madre occidentale : variabilité et évolution avec la surexploitation du milieu

Luc Descroix, David Viramontes, Jose Luis Gonzalez Barrios, Nouvelot Jean-François, E. Anaya, Jérôme Poulenard

▶ **To cite this version:**

Luc Descroix, David Viramontes, Jose Luis Gonzalez Barrios, Nouvelot Jean-François, E. Anaya, et al.. Les ressources en eaux de la Sierra Madre occidentale : variabilité et évolution avec la surexploitation du milieu. Science et changements planétaires / Sécheresse, 2002. ird-02153636

HAL Id: ird-02153636
https://ird.hal.science/ird-02153636

Submitted on 12 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SECHERESSE

Mexique

Sécheresse 2002 ; 13 (4) : 235-43

Les ressources en eaux de la *Sierra Madre* occidentale : variabilité et évolution avec la surexploitation du milieu

Luc DESCROIX

IRD-LTHE, BP 53,
38041 Grenoble Cedex 9.
<descroix@hmg.inpg.fr>

David VIRAMONTES

IMTA, Paseo Cuauhnahuac, 8532,
62550 Jiutepec (Mor), Mexique.
<davidv@tlaloc.imta.mx>

José Luis GONZALEZ BARRIOS

Cenid-Raspa, AP 225-3,
35071 Gomez Palacio (Dgo),
Mexique.
<gonzbar@raspa.inifap.conacyt.mx>

Jean-François NOUVELOT

IRD, BP 5045,
34032 Montpellier Cedex 2, France.
<jean-francois.nouvelot@wanadoo.fr>

Eva ANAYA

Unidad Regional del Semidesierto,
SEMARNAT, bd M.-Aleman,
900, Col. Constituyentes,
Cd Lerdo (Dgo), Mexique.
<n_eva_rez@hotmail.com>

Jérôme POULENARD

Laboratoire des sciences du sol,
CISM, Université de Savoie,
73376 Le Bourget-du-Lac Cedex,
France.
<Jerome.Poulenard@univ-savoie.fr>

La modification des usages des sols dans un bassin-versant (déboisement, mise en culture, urbanisation, etc.) peut provoquer des changements de régime hydrologique de ces bassins. Dans le nord du Mexique, l'essentiel des ressources en eau provient de la *Sierra Madre* occidentale qui alimente en eaux de surface et de profondeur l'ensemble des zones arides et semi-arides de cette région. On analyse ici les changements hydrologiques qu'induisent un déboisement rapide et un surpâturage généralisé de cette montagne, véritable château d'eau du nord-ouest du pays.

La *Sierra Madre* occidentale fait figure de château d'eau pour tout le nord-ouest du Mexique ; les précipitations, qui y dépassent localement les 1 000 mm par an, permettent à des écoulements pérennes d'alimenter oasis et périmètres irrigués des régions arides et semi-arides du littoral pacifique et de l'*Altiplano* central du Nord-Mexique. Le *Río Grande* lui-même lui doit de reprendre du débit (à partir du confluent du *Río Conchos* qui draine le versant oriental de la *Sierra*) après avoir été pillé de ses eaux par les périmètres américains et celui de *Ciudad Juarez* au Mexique.

Cette longue chaîne d'origine volcanique constitue aujourd'hui une vaste zone d'élevage bovin extensif et de forêts de pins. Malgré la très forte émigration actuelle vers les États-Unis qui se traduit par une chute rapide de la population, les pâturages et les forêts sont de plus en plus dégradés par la surexploitation. La forêt de pins a perdu près de 70 % de sa superficie ces trente dernières années [1] et la charge bétaillère est 2 à 4 fois plus forte que souhaitable sur la plus grande partie des pâturages [2]. Cela se traduit par une dégradation des milieux et des sols très sensibles sur de grandes étendues : les cailloux semblent couvrir des proportions croissantes de l'espace, les sols deviennent squelettiques. Par ailleurs, bien que la *Sierra* soit bien plus arrosée que les zones arides de l'*Altiplano* ou les plaines bordières du golfe de Californie, les années 1990 ont connu une série de sécheresses récurrentes [3]. Une des réponses des éleveurs à ce phénomène a consisté à aménager un grand nombre de lacs collinaires *(presones)* pour stocker temporairement l'eau nécessaire à l'abreuvement du bétail. Des retenues de plus grande taille sont également en projet.

Des études statistiques ont été menées sur les données pluviométriques afin d'en étudier la variabilité spatio-temporelle ; de plus, les données hydrométriques ont été analysées afin d'y déterminer d'éventuelles tendances dans le temps.

Références

1. Rodriguez MG. *Determinación de la vegetación en la Sierra Madre Occidental para la calibración de imágenes satélite.* Mémoire ECF-Universidad Juarez del estado de Durango, Mexique, 1997 ; 60 p.

2. Barral H, Anaya E. *La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-arida de México.* Publicaciones Orstom-INIFAP, Gomez Palacio, Mexique, n° 5, 1995 ; 78 p.

3. Bovin P. Les sécheresses au Mexique. *Sécheresse* 1996 ; 6 : 53-8.

4. Nouvelot JF, Descroix L. Aridité et sécheresse du Nord-Mexique. *Revue Trace (Mexico)*, 1996 ; 30 : 9-25.

5. Descroix L, Nouvelot JF, Estrada J, Lebel T. Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations : application à une région endoréique du Nord-Mexique. Article soumis et accepté à la *Revue des Sciences de l'Eau* 2002 ; 14 : 281-305.

6. Rossel F. *Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Équateur.* Thèse de l'Université Montpellier II, 1997 ; 300 p. + annexes.

7. Viramontes PD, Descroix L. Dégradation progressive du milieu et conséquences hydrologiques : étude de cas dans la *Sierra Madre* occidentale (nord-Mexique). *Revue de Géographie Alpine* 2000 ; 88 : 27-42.

8. Descroix L, Viramontes D, Vauclin M, Gonzalez Barrios JL, Esteves M. Influence of surface features and vegetation on runoff and soil erosion in the western Sierra Madre (Durango, North West of Mexico). *Catena* 2001 ; 43 : 115-35.

9. Poulenard J, Descroix L, Janeau JL. Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la *Sierra Madre* occidentale. *Revue de Géographie Alpine* 1996 ; 84 : 76-86.

10. Viramontes D. *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, 2000 ; 450 p.

11. Gonzalez B, Descroix L. Bilan et perspectives de la ressource en eau dans la région hydrologique 36 (Nord-Mexique). *Revue de Géographie Alpine* 2000 ; 88 : 115-28.

12. Descroix L. *Les conflits d'usage de l'eau au Nord-Mexique : une problématique multi-scalaire.* Actes de l'école thématique « Les conflits d'usage en environnement : le cas de l'eau », Les Houches, 24-29 septembre 2000 : 129-44.

13. Estrada J. *Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique.* Thèse de l'Université Montpellier II, 1999 ; 462 p.

Par ailleurs, des recherches ont été effectuées de 1994 à 1999 sur des bassins versants expérimentaux pour acquérir des données de relation pluie-débit à l'échelle des petits bassins (1 à 50 km²) ainsi qu'à l'échelle des parcelles (1 à 50 m²). Les impacts des modifications des états de surface et des conditions de ruissellement et d'infiltration ont pu y être déterminés spatialement en comparant secteurs dégradés et non dégradés. Par ailleurs, une analyse des écoulements dans les deux grands bassins (*Río Ramos*, 7 130 km² et *Río Sextin*, 4 660 km²) sur les trente dernières années a permis de détecter à cette échelle également, des modifications que l'on peut attribuer à l'évolution récente des conditions de surface et de l'état des sols et de la végétation dans tout le haut bassin *(carte 1)*.

Ressources en eau et variabilité spatio-temporelle dans le haut bassin du *Río Nazas*

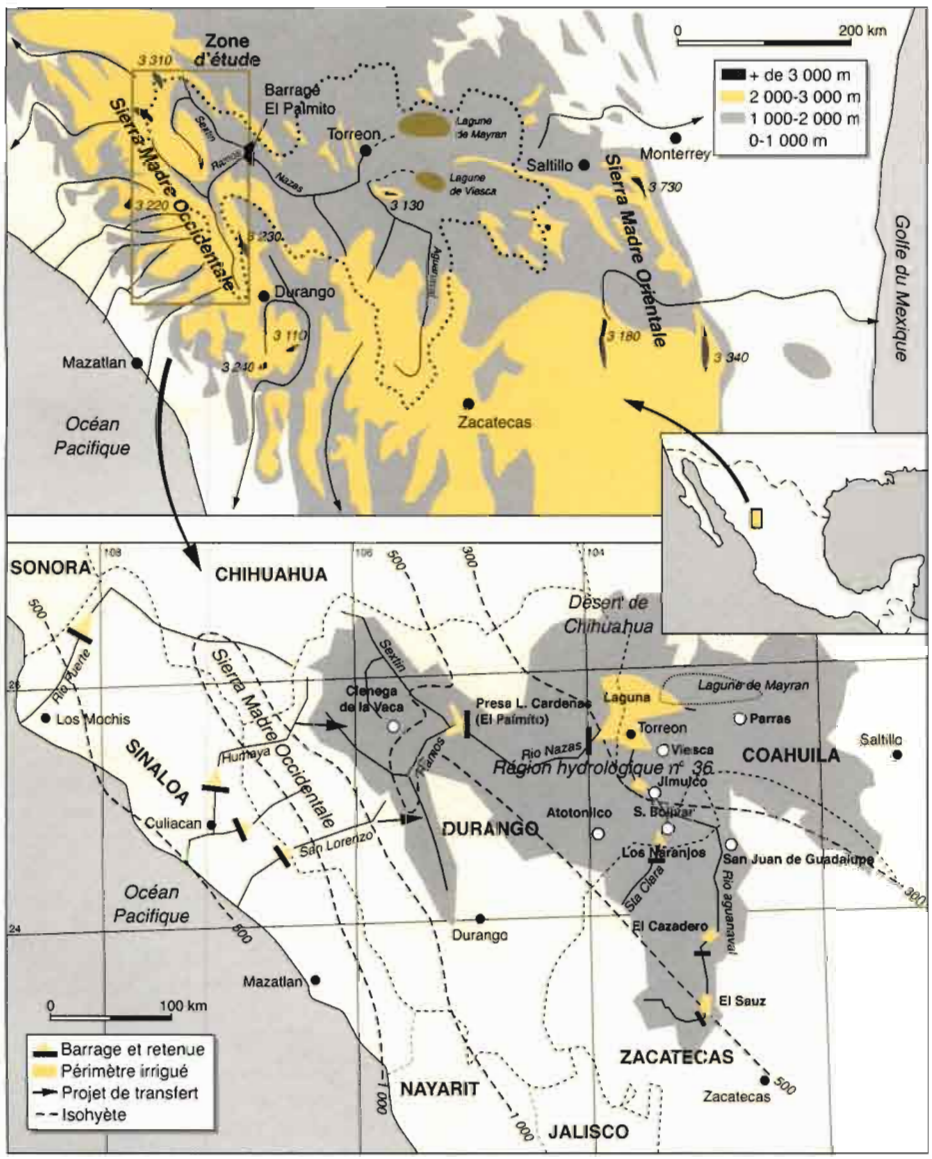
Les États de *Sonora* et *Sinaloa*, sur le littoral du Pacifique, de même que ceux de *Chihuahua*, *Durango*, *Zacatecas* et la moitié orientale de l'État de *Coahuila* dépendent intégralement ou en partie des eaux de la *Sierra* pour assurer l'approvisionnement en eau des villes et surtout des grands périmètres irrigués (qui totalisent 1 150 000 hectares) qui y ont été installés, parfois sur le site d'oasis anciennes *(tableau I)*.
On s'intéresse ici en particulier à la haute vallée du *Río Nazas (cartes 1* et *2)*, en amont du barrage de *Palmito (presa Lázaro Cárdenas)*. Ce haut bassin a une superficie de 19 000 km²,



Carte 1. *Localisation du haut bassin du* Río Nazas.

Tableau I. Les principaux barrages et périmètres irrigués alimentés par des eaux provenant de la *Sierra Madre* occidentale

Nom du barrage	Cours d'eau	État	Année	Superficie bassin (km²)	Capacité totale x $10^6 m^3$	Superficie irriguée (ha)
Lo Boquillo	Conchos	Chih	1916	28 000	3 990	39 700
A. Lopez Moteos	Humaya	Sin	1964	11 000	3 160	126 100
J. Lopez Portillo	San Lorenzo	Sin	1981	8 200	3 400	260 000
Miguel Hidolgo	Fuerte	Sin	1956	29 600	3 290	230 000
Sonalona	Tamozula	Sin	1949	3 250	1 095	95 000
A.L. Rodriguez	Sonora	Son	1948	21 900	253	10 000
Alvaro Obregon	Yaqui	Son	1953	73 500	3 000	220 000
Lazoro Cardenas	Nazas	Dgo	1946	19 000	4 400	160 000



Carte 2. *Situation et détail de la zone d'étude.*

mais il fournit 87 % des eaux de surface de l'ensemble du bassin endoréique du *Nazas-Aguanaval* auquel il appartient, alors qu'il ne représente que 21 % de la surface de l'ensemble du bassin (92 000 km²). L'ensemble du bassin correspond à une unité de gestion de l'eau appelée région hydrologique (RH) 36 et s'étend surtout sur l'*Altiplano* nord-central mexicain.

Variabilité spatio-temporelle des précipitations

À l'échelle de l'ensemble du bassin *Nazas-Aguanaval*, la pluviométrie diminue très vite de la *Sierra Madre* occidentale à l'ouest au désert de *Chihuahua* à l'est *(carte 2)* en même temps qu'augmente son irrégularité interannuelle *(figure 1)* [4, 5].

L'ensemble du bassin *Nazas-Aguanaval* se caractérise par un régime des précipitations sensiblement homogène, 80 % d'entre elles tombant durant la saison des pluies de juin à octobre. La répartition du nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur précipitée varie également très peu de la zone aride à la zone sub-humide.

L'influence de l'ENSO *(El Niño Southern Oscillation)* n'est pas évidente ici malgré la proximité du Pacifique : sur 12 *Niños* avérés depuis 1923, la pluviométrie à *Tepehuanes* n'a été que 6 fois excédentaire. En revanche, toutes les années dites froides, c'est-à-dire avec des températures du Pacifique oriental au-dessous de la moyenne (phénomène parfois appelé *Niña* [6]), correspondent à des années dont la pluviométrie annuelle est déficitaire.

Par ailleurs, s'il y a bien une légère tendance à la diminution des précipitations *(figure 2)* statistiquement peu significative, elle est due à l'existence d'une période très humide en début de série (années 1920 et 1930). Les années 1945 à 1963 sont au contraire très nettement déficitaires, et de 1963 à 1998, on observe une chronique d'années à pluviométrie très irrégulière, sans qu'une tendance à l'augmentation ou à la diminution soit discernable [4, 7].

Au niveau spatial, les principaux facteurs explicatifs de la répartition des précipitations moyennes sont l'altitude et la distance à l'océan Pacifique, ces deux variables étant d'ailleurs très étroitement liées [8].

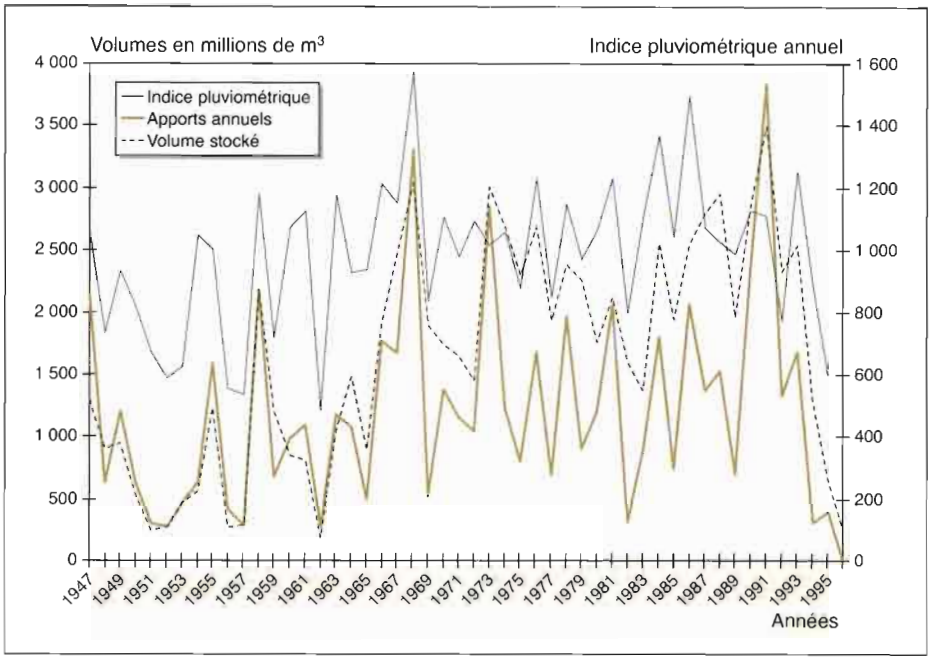


Figure 1. *Retenue de* El Palmito : *apports et volumes stockés ; indice pluviométrique annuel de la* Sierra Madre.

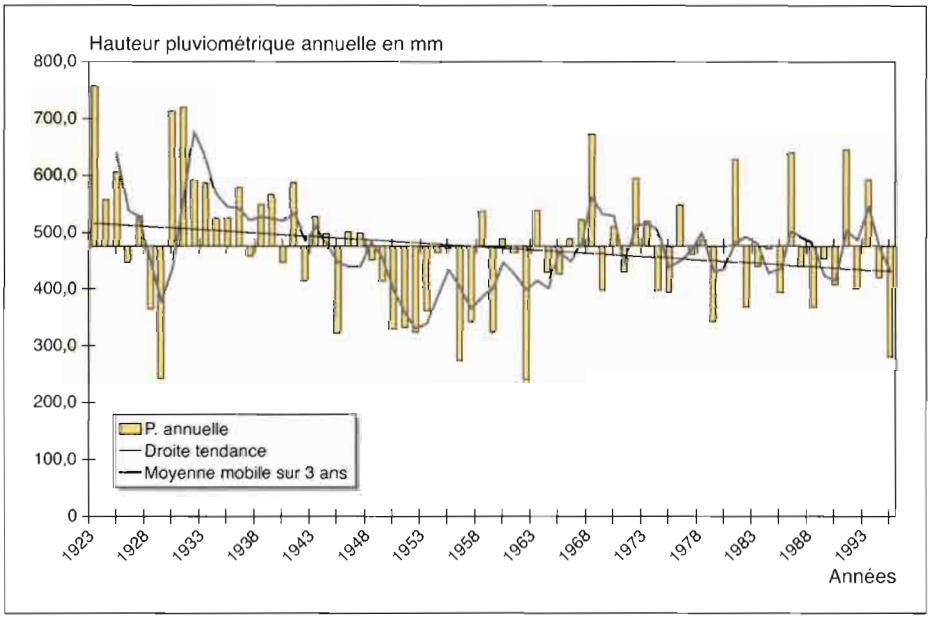


Figure 2. *Précipitations annuelles observées à* Tepehuanes.

Variabilité spatiale des écoulements

On a pu constater que les caractéristiques hydro-dynamiques du sol varient très rapidement, le coefficient de variation (Cv) de la conductivité hydraulique allant de 0,45 pour des mesures faites à 50 cm les unes des autres sur le même site à 0,67 pour des mesures faites dans un secteur de 400 km^2.

Les coefficients d'écoulement sont en moyenne de 0,15 dans le haut bassin du *Nazas*, ce qui cache bien sûr une forte variabilité compte tenu des composantes de pluviométrie, de lithologie, de pente, etc. On peut l'estimer de 0,03 vers 450 mm à 0,3 vers 900 mm de précipitations.
À l'échelle de la parcelle (1 à 50 m^2), on obtient des coefficients de ruissellement de 0,15 à 0,6 et à celle du bassin versant, de 0,05 à 0,3 (entre 1 et 50 km^2) suivant les états de surface et la végétation en premier lieu dans la *Sierra Madre*. En zone semi-aride, les coefficients d'écoulement vont de 0,005 à 0,03 au niveau des bassins-versants (1 à 50 km^2).

Variabilité interannuelle des écoulements

Le coefficient de variation des précipitations annuelles en amont du barrage de *Palmito* (haut bassin du *Nazas*) est de 0,23, mais celui de l'écoulement pour le même bassin (apports au barrage de *Palmito*) est de 0,67. Entre 1996 (année excédentaire de 20 % en moyenne), et 1997 (année déficitaire de 40 %), le volume apporté au barrage a varié de 1,7 x 10^{9}m^3 à 40 x 10^{6}m^3 *(figure 1)*.

Dynamique de l'écoulement et effets de seuil

On a pu constater, tant à l'échelle de la parcelle que du bassin versant, un fonctionnement différent suivant la pluviométrie. Le ruissellement est très généralement de type hortonien, mais on observe deux types de surfaces contributives [8] : les zones encroûtées et localement des aires saturées, certaines saisons connaissant, en effet, des événements pluvieux suffisamment rapprochés et abondants pour provoquer une saturation du sol.

Variabilité des apports solides

Les ablations mesurées sur parcelles (50 parcelles de 1 à 50 m^2) sont de l'ordre de 0,1 t.ha^{-1}.an^{-1} en forêt et de 100 t.ha^{-1}.an^{-1} sur des pâturages surpâturés, avec une moyenne (mesurée sur 45 ans d'alluvionnement dans le réservoir de *El Palmito* alimenté par un bassin versant de 19 000 km^2) de 5 t.ha^{-1}.an^{-1}. Les pertes mesurées sur pâturages pour des bassins versants (1 à 10 km^2) en zone semi-aride sont de 1 à 2,5 t.ha^{-1}.an^{-1}.
Quoi qu'il en soit, dans le cas de la *Sierra Madre* occidentale, des données suffisantes existent depuis 1940 et il ne semble pas y avoir de modification sensible du coefficient d'écoulement, bien que la forêt ait été sérieusement dégradée, et que les pâturages soient surexploités [9, 10] : 66 % de la forêt de conifères du haut bassin du *Río Nazas* ont

été détruits ou sérieusement éclaircis, et pratiquement tous les pâturages (ceux-ci représentent 70 % de la superficie) sont surpâturés, ce qui modifie, sensiblement le comportement hydrodynamique des parcelles. Le fait que la forêt de conifères soit la plus touchée est accentué parce qu'elle est située dans les zones hautes qui reçoivent le plus de précipitations (600 à 900 mm contre 450 dans les fonds de vallée) ; cependant, le type d'exploitation forestière fait que la repousse d'une couverture secondaire doit assez vite assurer un comportement de type « forestier » à l'écoulement.

En ce qui concerne les eaux souterraines [11], elles ne jouent pratiquement aucun rôle dans la *Sierra Madre* où les écoulements de surface suffisent en principe à couvrir les besoins. En revanche, c'est probablement cette zone qui assure l'essentiel de la recharge des aquifères de l'*Altiplano* du centre-nord du pays, ainsi que des plaines littorales du Pacifique.

Usages de l'eau : vers des conflits locaux et régionaux ?

Le haut bassin du *Nazas* fait figure depuis plus d'un siècle de zone d'apport en eaux de surface. C'est de cette région que proviennent 99 % des volumes annuels d'eau douce disponibles du bassin du *Nazas* et de 90 à 99 % de ceux de l'ensemble de la région hydrologique 36 apportés à la *Laguna*. Auparavant, le bassin de l'*Aguanaval* apportait 13 % des apports annuels au périmètre irrigué, mais la mise en valeur de ces eaux en amont a asséché le cours de l'*Aguanaval* qui n'atteint plus la *Laguna* que les années exceptionnellement humides.

La *Sierra Madre* recevant de 500 à 900 mm d'eau dans cette zone (et jusqu'à 1 500 sur le versant exposé au Pacifique), l'irrigation n'y est pas nécessaire. L'activité principale, hormis l'exploitation forestière, y est l'élevage bovin extensif ; les cultures, fourrages et haricots, occupent peu d'espace et ne sont pas irriguées. De ce fait, les eaux d'écoulement sont très peu mises en valeur. Il y a toutefois eu, lors d'épisodes secs dans les décennies 1960 et 1970, des aides à la construction de petits barrages à batardeaux sur les cours d'eau de la *Sierra*, permettant de constituer des points d'abreuvement pour le bétail.

Au Mexique, on appelle *presones* les petits barrages. « Traditionnellement », ils sont de 2 types :

– *bordos* classiques en terre pour l'abreuvement du bétail, creusés avec des engins de terrassement qui poussent la terre vers l'aval pour former la digue. Ces *presones* peuvent être situés sur le talweg ou être creusés à même un versant, comme les lacs collinaires installés en France ces dernières décennies ;

– *presa*, petit barrage en ciment avec batardeau pouvant être plus ou moins ouvert, en fonction de la saison et des besoins en eau.

Dans les deux cas, leur capacité n'est au mieux que de quelques milliers de mètres cubes d'eau et ils servent uniquement d'abreuvoir. Une bonne vingtaine de ces ouvrages existaient au début des années 1990 sur les 4 *ejidos* (communautés rurales formées par la réforme agraire de 1936*) sur lesquels se trouvent les bassins versants étudiés (soit une aire de 400 km^2). La constitution des *ejidos* remontant ici à une quarantaine d'années, les traditions sont récentes.

Mais le schéma classique de fonctionnement de ces points d'eau répondait au régime normal des pluies, avec une grande saison des pluies estivale (régime tropical, de juin à septembre avec 80 % des précipitations) le plus souvent doublée d'une petite saison des pluies hivernale (de régime « méditerranéen », de décembre à février). Bien que cette « petite » saison des pluies soit bien plus irrégulière que la grande (elle a reçu 200 millimètres en 1991-1992 mais n'a connu aucune précipitation en 1993-1994 , 1994-1995, 1995-1996, 1997-1998 ni 1999-2000), elle joue un rôle très important dans la gestion de l'eau. Comme cela se fait aussi dans la zone semi-aride, on compte sur ces pluies d'hiver, peu volumineuses mais tombant à un moment où l'évaporation est faible, pour remplir à nouveau les *presones*. De fait, en année « normale », la seule période de soudure se situe en mai-juin, avant la grande saison des pluies.

Par ailleurs, les petits barrages à déversoir sont laissés ouverts durant la grande saison des pluies, de manière à éviter leur colmatage par les sédiments. On ne les ferme que fin septembre, afin de leur permettre d'être remplis par les dernières pluies (vu le volume de ces barrages et la grande taille des impluviums, de petites pluies suffisent pour assurer leur remplissage) ; les barrages sont ouverts aux premières pluies de la saison suivante, quand les points d'eau deviennent assez nombreux pour pouvoir se passer de l'eau de ces *presones*.

Deux stratégies nouvelles sont ainsi apparues avec les récentes années sèches :

1. À partir de 1992, c'est-à-dire la première saison des pluies déficitaire après la très bonne année 1991, on a vu apparaître une nouvelle série de *presones*. Jusqu'alors, les *ejidos* s'étaient contentés de disposer quelques *presones* abreuvoirs là où le bétail manquait de points d'eau, afin de pouvoir tirer profit de tous les pâturages. Mais l'apparition d'années très sèches (1992, 1994 et 1995) ainsi que la possibilité de disposer de capitaux extérieurs (l'aide des membres de la famille émigrée aux États-Unis, qui bien souvent ne coupent pas les liens avec la famille restée sur place) ont incité les éleveurs à se grouper pour construire quelques points d'eau supplémentaires. A pu jouer aussi comme incitatif l'annonce de la fin prochaine des aides gouvernementales aux *ejidatarios** et la prochaine dissolution « volontaire » des *ejidos*.

2. Une autre gestion des barrages ouverts apparaît : les saisons des pluies (l'hivernale comme l'estivale) étant déficitaires, on se sert du barrage en position fermée durant toute l'année : il sert d'abreuvoir y compris durant la grande saison des pluies, et reste fermé car les crues sont rares et il faut être sûr de pouvoir remplir le réservoir. Les alluvions s'y concentrent rapidement, mais on profite d'une crue importante pour assurer la vidange des sédiments piégés dans le réservoir, pour le remplir d'eau aussitôt à la fin de la crue.

Enfin, pour éviter le colmatage des ouvrages et s'assurer de leur alimentation en eau, certains *presones* ont été construits en fond de vallée mais ne sont alimentés par les talwegs qu'à la fin des crues (des canaux et des batardeaux succincts permettent de les remplir au moment voulu).

Plusieurs éléments pourraient conduire à une évolution de la gestion de l'espace et de l'eau ;

* Voir *Glossaire*.

– tout d'abord la surexploitation des forêts, et plus encore, des pâturages, conduit à une dégradation de l'espace qui entraîne une très forte baisse de la productivité des pâturages ;
– les apports en numéraire des émigrés peuvent permettre des investissements en petite et moyenne hydraulique ;
– durant la période sèche, qui a commencé en 1994, la construction de *presones* s'est multipliée, afin de constituer de nouveaux points pour l'abreuvement du bétail.

Mais surtout, malgré la diminution de la population, des conflits peuvent apparaître sur la gestion de l'espace et de l'eau. Le contexte s'y prête : le régime éjidal issu de la réforme agraire de 1936 a volé en éclats suite à l'abrogation de l'article 27 de la Constitution mexicaine en 1992, qui a en fait re-généralisé la propriété privée. Du coup, les paysans, dans pratiquement tout le pays, ont eu un titre de propriété ; ceux qui n'avaient pas l'intention de continuer à cultiver leur terre ont de ce fait pu la vendre (ce qui était impossible auparavant en *ejido*). Et ceux qui veulent garder leur exploitation tendent à tout faire pour s'assurer un accès à l'eau, même dans cette région *a priori* favorisée. Du coup, des conflits apparaissent tant au niveau local que régional : entre deux *ejidos*, entre *ejidos* et propriétés privées, et de plus en plus entre propriétaires, puisque les *ejidos* sont en voie de disparition dans cette région [12].

Si cela peut entraîner des tensions entre villages, c'est *a fortiori* le cas entre États : l'État de *Durango*, dont le territoire s'étend sur les deux versants de la *Sierra Madre* occidentale, envisage de faire percer un tunnel pour transférer l'eau des cours d'eau coulant vers le Pacifique, très abondants, vers le haut *Nazas*, afin d'accroître les volumes d'eau utilisables sur les hauts plateaux (voir *carte 2*). Les zones aval des cours coulant vers l'ouest sont situées dans l'État de *Sinaloa*, où plusieurs périmètres irrigués sont alimentés par leurs eaux *(tableau I)* ; d'où l'inquiétude des autorités de cet État à ce sujet, d'autant que, comme pour le barrage de Palmito, les barrages alimentant les périmètres de la plaine côtière ont vu leur niveau baisser sensiblement depuis le début des années 1990, du fait de la série d'années sèches.

Évolution des apports et des régimes dus à la surexploitation des milieux

La gestion actuelle des ressources en eau pose des problèmes et arrive à générer des conflits à l'échelle locale et régionale. Or, on a présenté en introduction les évidences des transformations des bassins versants du fait de leur surexploitation. Si ces transformations arrivent à se traduire par des modifications dans les régimes des cours d'eau et les volumes écoulés, cela ne risque-t-il pas d'exacerber les tensions existantes, voire d'en faire apparaître de nouvelles ?

On utilise ici trois méthodes différentes pour déterminer les éventuelles modifications du régime des écoulements qui sont apparues dans le haut bassin du *Nazas*.

Comparaison des écoulements de base et de crue

La *figure 3* présente les graphiques de régression linéaire entre les coefficients d'écoulement de crue et de base des cours d'eau, par décennie, pour chacun des bassins versants. On a indiqué les droites de régression passant par l'origine. Les équations obtenues montrent des coefficients de détermination assez significatifs. Par ailleurs, on constate que la pente de la droite de corrélation augmente de décennie en décennie dans les deux bassins versants :

• Ainsi, pour le bassin du *Ramos*, on observe :
– de 1970 à 1979 pour une valeur donnée de Kbase :
Kcrue = 2,40 x Kbase ;
– de 1980 à 1989 :
Kcrue = 2,75 x Kbase ;
– de 1990 à 1998 :
Kcrue = 2,84 x Kbase.

• Pour le bassin *Sextín*, on obtient aussi une évolution, mais moins marquée :
– de 1971 à 1979 pour une valeur donnée de Kbase :
Kcrue = 2,9 x Kbase ;
– de 1980 à 1989 :
Kcrue = 3,0 x Kbase ;
– de 1990 à 1997 :
Kcrue = 3,1 x Kbase.

Cette évolution témoigne d'une diminution de la part du volume de base dans l'écoulement total annuel pour les deux bassins versants. Les écoulements de crue prennent donc de plus en plus de place dans l'écoulement total. Cela traduit une « irrégularisation » des débits. La proportion d'eau ruisselant au moment de l'événement pluvieux augmente. La proportion des écoulements de base des deux bassins versants fournis par l'eau stockée dans les sols et les nappes perchées, diminue et des écoulements de crues la remplacent.

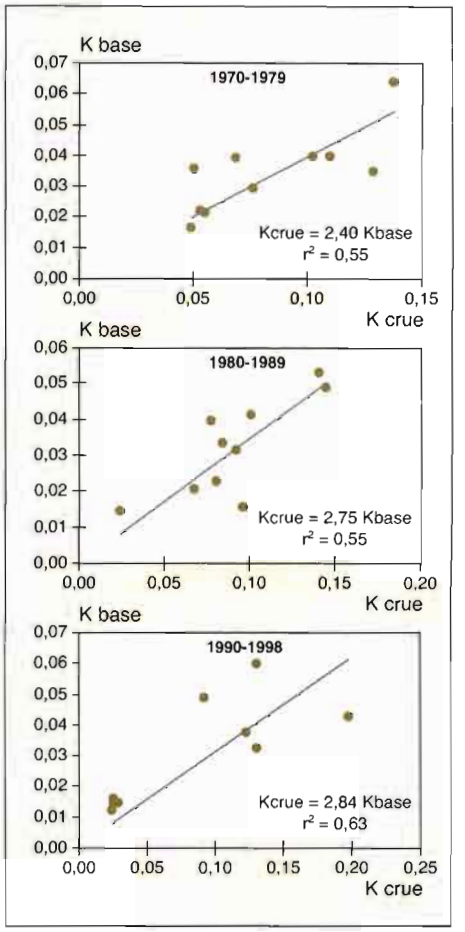


Figure 3. *Évolution du rapport entre coefficient d'écoulement de crue (Kcrue) et coefficient d'écoulement de base (Kbase), par décennie entre 1970 et 1998, dans le bassin du* Río Ramos.

Cependant, il existe deux aspects statistiques qui empêchent une confirmation définitive de cette tendance :

• D'une part, le test de Student de comparaison des moyennes (jusqu'au seuil de 60 % de certitude) ne différencie pas les trois groupes des valeurs de coefficient de base (Kbase) et de coefficient de crue (Kcrue), c'est-à-dire que les valeurs des trois décennies peuvent provenir de la même population. La différence entre les trois décennies des deux bassins versants n'est donc pas significative pour ce test.

• Le second facteur fait appel à la modération des résultats. En effet, il faut accepter que cette tendance est statistiquement faible du fait que nous ne disposons que de séries courtes (28 et 29 ans) et d'une variabilité très importante.

Temps de réponse des bassins versants

On a noté dans le *tableau II* les temps de réponse moyens des deux bassins versants du *Río Ramos* et du *Río Sextín* aux épisodes pluvieux. Au total, nous avons noté 2 273 événements de crues dans le bassin du *Ramos* qui correspondent aux années 1970 à 1998, et 1 720 événements pour le bassin du *Sextín* correspondant aux années 1971 à 1997. Les temps de réponse moyens des bassins est de 1,45 jour pour le bassin du *Ramos*, le plus grand des deux, et de 1,32 jour pour le bassin du *Sextín*, de taille sensiblement plus réduite [10].
La distribution des résultats moyens par décennie montre une légère baisse dans le temps de réponse des deux bassins. Le bassin du *Ramos* présente une diminution de 1,6 %, mais cette diminution n'est pas significative d'après le test de comparaison de moyennes de Student (au seuil de 80 %). En revanche, dans le bassin du *Sextín* la moyenne passe de 1,32 jour dans les années 1970 à 1,26 jour dans les années 1990. La diminution des temps de réponse est de 5,5 %. Cette diminution est significative (à 80 %) d'après le test de Student de différenciation des moyennes.

Tableau II. Temps de réponse moyen, global et par décennie des bassins versants

		Global	Séporotion por décennie			Différence
		1970-1998	1970-1979	1980-1989	1990-1998	Années 70 et 90
Bassin Ramos	Nombre d'événements	2 273	836	847	590	
	Moyenne (jours)	1,45	1,45	1,47	1,43	1,6 %
	Écart-type	0,38	0,38	0,36	0,40	
	CV	0,26	0,26	0,25	0,28	
	Student (80 %)		*	*	*	
		1971-1997	1971-1979	1980-1989	1990-1997	
Bassin Sextin	Nombre d'événements	1 720	615	701	404	
	Moyenne	1,32	1,34	1,34	1,26	5,5 %
	Écart-type	0,36	0,35	0,33	0,41	
	CV	0,27	0,26	0,25	0,32	
	Student (80 %)		☺✓	*	☺✓	

* Différence des moyennes non significative ; ☺✓ Différence des moyennes significative.

Évolution du temps de ressuyage des bassins versants

Pour analyser l'évolution du comportement de l'indice de précipitations antérieures à différentes périodes, on a utilisé ici le modèle *Nazas* [10]. Il s'agit d'un modèle déterministe global qui permet de simuler et prévoir des lames écoulées en fonction de la précipitation et de l'indice des précipitations antérieures (IPA), qui est un moyen de pallier l'absence de mesures en continu de l'humidité du sol. L'IPA est calculé comme suit :

$$IPA_n = (IPA_{n-1} + P_{n-1}) * \exp^{-\alpha.\Delta t}$$

avec $\Delta t = t_n - t_{n-1}$;

où IPA_{n-1} et P_{n-1} sont respectivement l'IPA et la précipitation de l'événement pluvieux précédent (n – 1), Δt le temps (en jours et fraction) écoulé depuis la fin de celui-ci jusqu'au début de l'événement n, et α le paramètre exprimant la vitesse de décroissance de l'humidité du sol.
On a pu constater dans les travaux précédents que le modèle reconstituait bien les lames écoulées et que l'optimisation des paramètres permettait de remarquer une évolution du paramètre α. La validité du modèle ayant été testée sur 16 parcelles de 1 à 50 m² et 7 bassins versants de 1 à 7 130 km², on considère que les valeurs obtenues du paramètre α sont significatives.
L'évolution de ce paramètre est indiquée pour les deux grands bassins pour les trois dernières décennies *(tableau III)*.
Le paramètre α permet d'exprimer la vitesse de ressuyage du sol (temps nécessaire pour que le sol reprenne son état initial d'humidité) après une précipitation. Plus α est élevé, et plus le temps de ressuyage du sol est court. On observe dans les résultats globaux que le bassin du *Sextín* présente une valeur supérieure à celui du *Ramos*. Cela signifie que le bassin du *Ramos* a un temps de ressuyage plus long que le bassin du *Sextín*. Il a du reste un coefficient d'écoulement de 0,12 contre 0,17 pour le bassin du *Sextín*.
La comparaison du paramètre α par décennies nous montre une tendance à la hausse de ce paramètre, ce qui indique que le temps nécessaire pour que le sol reprenne son état initial d'humidité a diminué ; le modèle utilisé permet de dire que le paramètre de décroissance de l'indice des précipitations antérieures (IPA) dans la production des écoulements, évolue dans le temps, donc que la capacité des bassins à stocker l'eau diminue.

Perspectives

L'avenir des ressources en eau et leur exploitation dans le haut bassin du *Nazas* et dans la *Sierra Madre* dans son en-

Tableau III. Valeurs du paramètre α de décroissance de l'humidité du sol calculées par optimisation grâce au modèle « Nazas » pour les bassins des *Ríos Ramos* et *Sextín*

Valeur de α	Période			Moyenne
	1970-1979	1980-1989	1990-1998	1970-1998
Ramos (BV 7 130 km²)	0,020	0,029	0,040	0,031
Sextin BV (4 660 km²)	0,040	0,054	0,061	0,050

semble dépend en grande partie de paramètres extérieurs et de la dynamique géopolitique mexicaine et globale. On peut regrouper ces éléments en plusieurs catégories.

Facteurs culturels

Le nord du Mexique est globalement un pays neuf ; il est de surcroît très proche (tant géographiquement que culturellement) du sud des États-Unis, et, en dehors des ethnies amérindiennes sédentarisées qui occupaient la *Sierra (Tarahumaras* et *Tepehuanes)*, la plupart des habitants considèrent que l'eau appartient à celui qui l'utilise et la met en valeur (et de fait, au premier ou aux premiers utilisateurs). Si bien que l'eau qui coule pour le moment vers le barrage de *Palmito* (et qui est exploitée, loin en aval, dans la *Laguna*) peut très bien être exploitée localement un jour, ce qui est susceptible de réduire les volumes disponibles en aval, déjà utilisés à 100 %.

Facteurs climatiques : la sécheresse actuelle

Bovin [3] signalait déjà que les sécheresses étaient récurrentes au nord du Mexique et que 1994 semblait être une des pires années de la fin du XX^e^ siècle. Or depuis, à part l'année 1996 (qui a connu des précipitations supérieures de 5 à 25 % à la moyenne dans la *Sierra*) toutes les années ont été déficitaires en précipitations, et ce, de 15 à 50 % par rapport aux moyennes des stations concernées. Avec 6 années très sèches sur 7 entre 1994 et 2000, les tensions sur l'utilisation de l'eau commencent à se faire sentir.

Facteurs externes : l'émigration

L'émigration est autant liée au dynamisme de l'économie des États-Unis qu'à la persistance de la sécheresse. Toujours est-il que depuis plus d'une génération, les villages de la *Sierra Madre* envoient les jeunes hommes travailler « de l'autre côté », « au Nord », aux États-Unis. Cela peut avoir des conséquences au niveau de la gestion des eaux ; en effet, le départ d'une partie importante de la population (de 20 à 100 % de la main-d'œuvre masculine suivant les secteurs) ne se traduit pas par une baisse des effectifs des troupeaux. En effet, les hommes s'en vont, mais les troupeaux restent. De plus, certains de ceux qui s'en vont investissent dans le troupeau familial en envoyant de l'argent pour l'achat de bêtes sélectionnées.
Cela a deux conséquences néfastes pour les sols, et à terme, les eaux :
– le cheptel se maintient mais il est constitué d'espèces sélectionnées moins rustiques et moins marcheuses qui aggravent le surpâturage près des points d'eau ou obligent à installer un plus grand nombre de lacs collinaires en vue de l'abreuvement ;
– la main-d'œuvre manquant, la gestion du bétail et des pâturages se fait de manière moins ordonnée et le surpâturage en est encore aggravé.

Vers un aménagement du territoire ?

Les modifications déjà observées dans le régime des écoulements pourraient encore s'accentuer dans les prochaines années, la gestion de l'espace n'évoluant pas pour l'heure vers une gestion « conservatoire » ou « patrimoniale ».

On a pu jusqu'à présent considérer que le haut bassin du *Nazas* avait au sein de la région hydrologique 36 une fonction hydrologique tournée vers la fourniture d'eaux d'écoulement à destination des zones arides de la *Laguna*. Mais d'une part, l'argent des émigrés pourrait servir à financer des aménagements hydrauliques dans la *Sierra* et, d'autre part, celle-ci se prête plus à l'agriculture, de par sa pluviométrie et ses sols relativement fertiles, que les sols souvent salins du désert de *Chihuahua*. De ce fait, il est possible qu'à l'avenir, une part croissante des eaux du haut bassin soit utilisée sur place.
Ainsi, on a observé dans la vallée de l'*Aguanaval*, une utilisation croissante des volumes d'eau de surface dans le haut et le moyen bassin, qui a abouti à un assèchement progressif du cours d'eau qui ne fournit plus d'eau au périmètre de la *Laguna* [13].
Quoi qu'il en soit, on peut aussi supposer et espérer que les tendances hydrologiques perçues sur les dernières décen-

Résumé

La *Sierra Madre* occidentale est de loin la région la plus pluvieuse du Nord-Mexique, ce qui en fait une zone importante en termes d'approvisionnement en eau ; cela permet l'alimentation en eau de grands périmètres irrigués en bordure du massif. Mais cette région souffre depuis quelques décennies d'une sévère surexploitation de l'espace, liée essentiellement au surpâturage et secondairement au déboisement, ce qui rend chaque fois plus aigus les problèmes d'approvisionnement en eau et peut être à l'origine de conflits d'usage sur cette ressource.
On cherche à savoir si cette dégradation menace l'avenir des ressources en eau. Ce point est difficile à déterminer, tant est grande la variabilité spatiale des précipitations comme des écoulements.
Des observations et des mesures ont été effectuées pendant 5 années sur des parcelles et de petits bassins-versants sur plusieurs sites de la haute vallée du *Sextín* (nord de l'État de *Durango*), l'une des branches amont du *Río Nazas*. On a pu observer un accroissement très sensible des écoulements et de l'érosion tant sur les sites surpâturés, par rapport aux pâturages enclos et mis en réserve, que dans les zones déboisées dans la forêt. Par ailleurs, en réponse aux sécheresses récurrentes, les agriculteurs s'équipent d'un nombre croissant de lacs collinaires.
Ces modifications dans le haut bassin du *Nazas* (dégradation de la végétation et stockage de l'eau de ruissellement) ont pu avoir des conséquences sur le bilan hydrique du bassin. Un ensemble d'études a été réalisé pour voir si les débits et les régimes des cours d'eau avaient connu une évolution depuis le début de la mise en valeur intensive des hauts bassins. On a constaté que les coefficients d'écoulement avaient peu évolué. Mais les principales modifications ont porté sur les régimes ; l'utilisation du « modèle *Nazas* » semble montrer que la capacité de stockage naturel des bassins-versants a diminué et, simultanément, on a observé une diminution du coefficient d'écoulement de base des cours d'eau ainsi qu'une diminution de leur temps de réponse aux précipitations.

Sujets : Ressources en eau ; Hydrologie ; Eau et gestion de l'eau ; Dégradation des sols.

nies amènent les autorités gestionnaires des eaux à proposer un aménagement de l'ensemble du bassin en vue d'en préserver les ressources en eau.

Conclusion

La variabilité des précipitations et des écoulements est une caractéristique des régions arides et semi-arides à laquelle le nord du Mexique ne déroge pas. Mais si l'on s'intéresse aux zones favorisées d'où proviennent les plus gros apports en eau de surface, on s'aperçoit que la mise en valeur de l'espace, même peu intensive, produit des modifications qui peuvent déséquilibrer les ressources en eau.

L'abondance relative des ressources en eau dans la *Sierra Madre* n'empêche pas l'apparition de tensions pour la maîtrise de cette ressource. De plus, et c'est inquiétant pour l'avenir, on a constaté que les régimes des cours d'eau étaient, comme c'est souvent le cas, modifiés par l'anthropisation du milieu. On a pu observer une diminution des temps de réponse des cours d'eau aux précipitations sur leur bassin, une diminution des écoulements de base et de la capacité des bassins versants à retenir les eaux de pluie.

Ces phénomènes, qui risquent d'exacerber les conflits latents liés à l'accès à la ressource, sont probablement dus aux éléments suivants :

– le surpâturage, qui est général dans tout le haut bassin du *Nazas* comme, du reste, dans une grande partie de la *Sierra Madre* occidentale, et qui modifie drastiquement les états de surface ;

– le déboisement, qui est intense sur les zones les plus hautes, et qui influe probablement sur les réserves en eau du sol (plus que sur les états de surface et le ruissellement, car la repousse de broussailles est rapide).

En revanche, un élément devrait produire un effet inverse, non perceptible ou trop largement compensé par les dégradations du milieu : la multiplication récente des *presones* du fait à la fois de la récente réforme agraire (qui rend les paysans prompts à s'assurer l'accès à la ressource) et de la sécheresse, qui oblige les exploitants à constituer des abreuvoirs supplémentaires pour le bétail. Ceux-ci devraient servir de réservoirs aussi au niveau de l'écoulement global à l'échelle des bassins et de ce fait permettre une atténuation des crues.

Glossaire

Ejidos : nom des communautés rurales mises en place grâce aux terres récupérées lors de la réforme agraire de 1936. Auparavant, de nombreuses terres (surtout dans les zones de montagnes habitées par les « indigènes » étaient déjà des communautés rurales ; mais on les distingue des *ejidos* et elles ont gardé le nom de *communidad rural.*

Ejidatario : paysan membre d'un *ejido.*

Summary

The Western *Sierra Madre* is the most rainy area of Northern Mexico; it is therefore the main water supply zone for the irrigated districts of the Northern central *Altiplano* and for the coastal plains of the Pacific shore.

However, due to overgrazing and deforestation, this mountain has been suffering from a severe overexploitation of the space for three or four decades, a situation which increases the scarcity of the water and which could lead to conflicts over the consumption of the water. On the other hand, faced with recurring droughts, cattle farmers in the *Sierra* have started to build a great number of *presones* (small dams) on the grassland.

The objective of this study is to determine the impact of the overexploitation of the environment on the water balance. Observations and measurements were carried out during five years at both plot and watershed levels in the upper valley of the *Río Sextin*, the left component of the *Río* Nazas (in the North of the state of *Durango*). A set of studies were performed in order to detect any possible evolution in the discharges and in the regimes of the rivers since land use had started to change.

At the experimental level, a significant increase in the runoff coefficient and in the soil loss rate was observed in overgrazed and deforested areas. At basin level, the modifications in the upper *Nazas* basin land use (degradation of the vegetation and of the water storage capacity) could have consequences on the water balance of the catchments. No significant change seems to have occurred as far as runoff coefficients are concerned while the main changes have been observed in the regimes. The use of the « *Nazas* model » shows that the watershed natural water storage capacity, the response time and the rivers' base flow have indeed decreased.