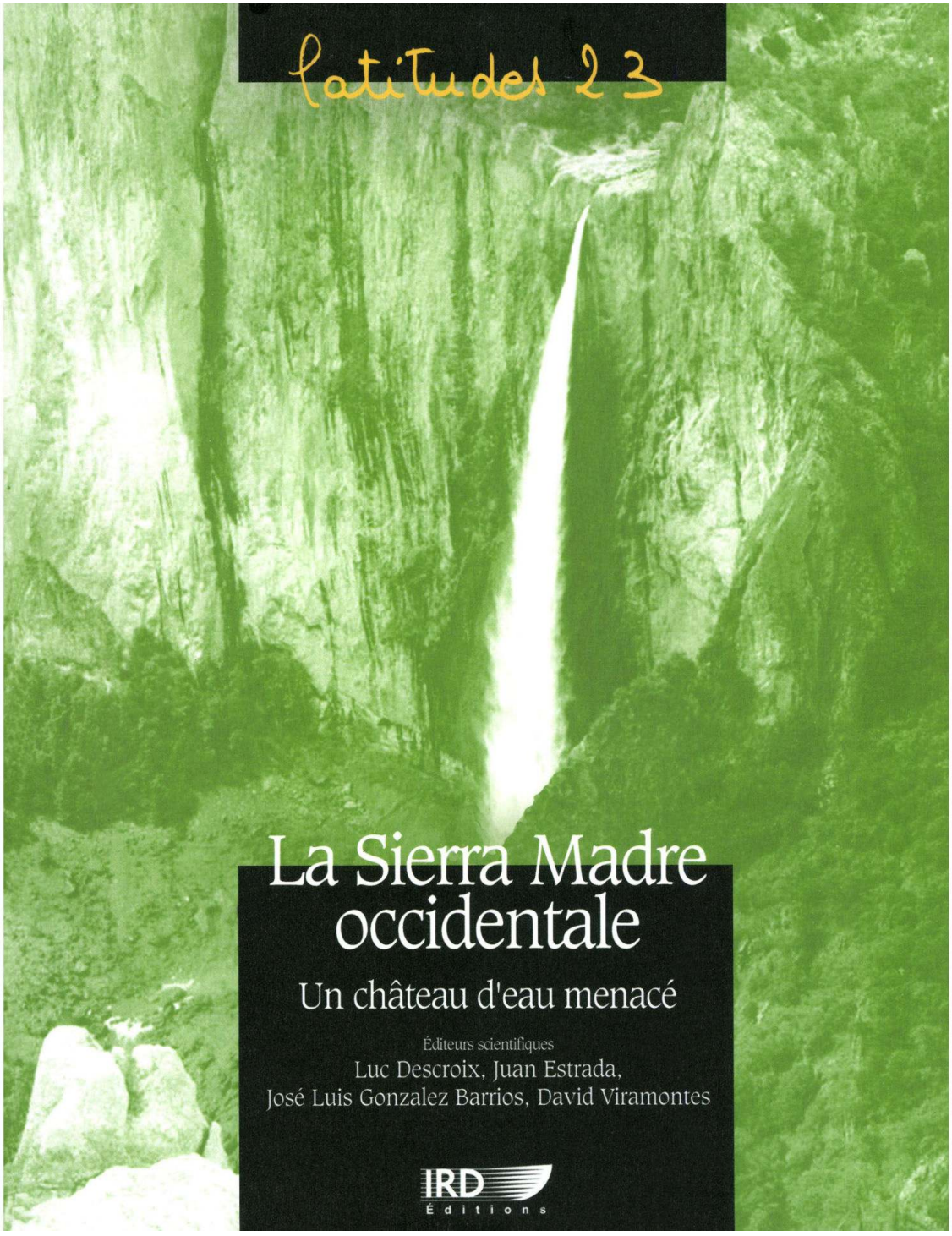

latitudes 23
La Sierra Madre occidentale
Un château d'eau menacé
Éditeurs scientifiques
Luc Descroix, Juan Estrada,
José Luis Gonzalez Barrios, David Viramontes
IRD
Éditions

La Sierra Madre occidentale

Un château d'eau menacé

Luc Descroix, Juan Estrada, José Luis Gonzalez Barrios et David Viramontes (dir.)

Éditeur : IRD Éditions
Année d'édition : 2005
Date de mise en ligne : 5 décembre 2013
Collection : Latitudes 23
ISBN électronique : 9782709917971

Édition imprimée
ISBN : 9782709915823
Nombre de pages : 327

OpenEdition books
http://books.openedition.org

Ce document vous est offert par Institut de recherche pour le développement
IRD
Institut de recherche pour le développement

Référence électronique
DESCROIX, Luc (dir.) ; et al. *La Sierra Madre occidentale : Un château d'eau menacé.* Nouvelle édition [en ligne]. Montpellier : IRD Éditions, 2005 (généré le 01 avril 2015). Disponible sur Internet : <http://books.openedition.org/irdeditions/5436>. ISBN : 9782709917971.

Ce document a été généré automatiquement le 1 avril 2015. Il est issu d'une numérisation par reconnaissance optique de caractères.

© IRD Éditions, 2005
Conditions d'utilisation :
http://www.openedition.org/6540

L'eau est rare au nord du Mexique, et la gestion de cette ressource limitée est devenue une priorité nationale. Dans ce contexte, la Sierra Madré occidentale, château d'eau pour tout le nord du pays, est un espace particulièrement convoité. La relative abondance en eau y a entraîné le développement de pâturages et d'exploitations forestières, provoquant une surexploitation des milieux et des ressources. La déglaciation des sols liée au surpâturage et au déboisement conduit de fait inévitablement à celle de l'eau et menace aujourd'hui le potentiel de toute cette région. À travers des études de cas précises, cet ouvrage montre comment la gestion de l'eau est liée à celle de l'espace et nécessite la prise en compte des besoins de l'ensemble des usagers, du bûcheron au gardien de troupeaux. Cette gestion patrimoniale, qui permet de régler les nombreux conflits d'usage, forme un modèle de développement dont de nombreux pays de montagne pourraient s'inspirer.

SOMMAIRE

Remerciements

Les auteurs

Avant-propos

Préambule
Un bilan de dix années de recherche hydrologique au Nord-Mexique
Jean-François Nouvelot

Introduction
Luc Descroix
La Sierra Madre, aujourd'hui : une montagne relativement privilégiée qui se vide
Le surpâturage, principale cause des changements hydrologiques
La Sierra Madre occidentale et son intérêt pour le Mexique
Construction de l'ouvrage
La Sierra Madre occidentale, « château d'eau » du Nord-Mexique
Un château d'eau naturel et... artificiel

Encadré 1. Géologie de la Sierra Madre occidentale
Constitution et origine
Marc Tardy

Milieu naturel et peuplement dans la Sierra Madre occidentale

Introduction

Les ressources en eau dans le centre-nord du Mexique
Perspective historique
David Viramontes
Une faible population et un vaste espace dans un contexte environnemental souvent difficile
La colonisation, les luttes indiennes et l'établissement de la propriété privée et des grandes latifundia
L'indépendance et les guerres contre l'invasion étrangère
Le régime de Porfirio Díaz. La réactivation économique du pays et le profit des grandes latifundia
La Révolution mexicaine et la période postrévolutionnaire
L'époque actuelle : une population en pleine expansion et une désertification des campagnes
La politique agricole actuelle

Encadré 2. Propriété privée et publique, gestion collective
Quelle politique patrimoniale ?
Luc Descroix

Une montagne en voie d'abandon ?
Béatrice Inard-Lombard
Un exode rural transfrontalier
Les causes et les formes de la migration
Comparaison du processus migratoire entre l'Europe et les États-Unis
Conclusion

Encadré 3. Un contexte démographique et économique de transition
Démographie comparée de la Sierra Madre avec celle de deux autres régions agro-pastorales
Luc Descroix
Surexploitation ou mauvaise gestion de l'espace : de la crise foncière à la déprise
Conséquences de la déprise et de la mauvaise gestion de l'espace
Conclusion

Le projet Hervideros
Un regard sur le passé préhispanique de la Sierra Madre occidentale du Durango, Mexique
Marie-Areti Hers et Oscar J. Polaco
Une région frontalière
Un projet interdisciplinaire
Les Tepehuanes, peuple originaire du Nord
Les paléopaysages

Encadré 4. L'indianité et l'indigénisme au Mexique et dans la Sierra Madre occidentale
Luc Descroix

Les sols et l'eau : précipitations et ruissellement dans la Sierra

Introduction

Le climat et l'aléa pluviométrique au Nord-Mexique
Jean-François Nouvelot, Luc Descroix et Juan Estrada
Les facteurs du climat
Répartition régionale et temporelle de l'aridité
Les sécheresses
Conclusion

La spatialisation des précipitations sur les deux versants de la Sierra Madre occidentale
Luc Descroix, Jean-François Nouvelot, Juan Estrada et Alfonso Gutierrez
Introduction
La spatialisation des précipitations
Le rôle des facteurs locaux et zonaux dans la distribution spatiale des précipitations
Conclusion

Un encroûtement des sols limitant l'infiltration
Jérôme Poulenard, Luc Descroix, José Luis Gonzalez Barrios, David Viramontes et Jean-Louis Janeau
Introduction
Présentation des sols de la Sierra Madre
L'eau dans les sols de la Sierra Madre
Les états de surface dans la Sierra Madre occidentale
Conclusion

Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe
José Luis Gonzalez Barrios, Luc Descroix, David Viramontes, Jérôme Poulenard, Alain Plenecassagne, Laura Macias, Christelle Boyer et Arnaud Bollery
États de surface et comportement hydro-dynamique des versants
Conséquences sur les propriétés physiques des horizons superficiels des sols
Conclusion

Pâturages et forets sous pression

Introduction

Trop de bétail et trop de bûcherons
Une économie minière
David Viramontes, Eva Anaya, Coral Garcia, Jérôme Poulenard, Henri Barrai, Laura Macias et Maria Guadalupe Rodriguez Camarillo
Surpâturage : y-a-t-il trop de têtes de bétail, ou plus assez de gardiens de troupeaux ?
Une exploitation minière des ressources forestières
Un constat : un déboisement massif
Conclusion

Encadré 5. L'appréciation du surpâturage
Eva Anaya, Luc Descroix et Henri Barral
Un *a priori* sur le paysage
La perception des paysans
Des mesures de capacité de charge

Une eau menacée par la dégradation des ressources végétales
Luc Descroix, David Viramontes, Eva Anaya, Henri Barral, Alain Plenecassagne, José Luis Gonzalez Barrios, Jeffrey Bacon et Laura Macias
La question scientifique de l'impact hydrologique des changements d'usage du sol
Le ruissellement et l'érosion : conséquences du déboisement et du surpâturage dans la Sierra Madre occidentale
Conséquences hydrologiques au niveau des grands bassins versants
Discussion et conclusion

Influence de la forêt sur la pluviométrie
Luc Descroix, José Luis Gonzalez Barrios et Raul Solis
La vision historique de la rétroaction végétation-pluie
L'évolution récente de cette question
Un exemple de recherche de relation rugosité-pluviométrie dans la Sierra Madre

Une eau disputée dans un espace encore libre

Introduction

L'eau, agent économique et enjeu politique
Luc Descroix et Frédéric Lasserre
L'eau du río Conchos est-elle mexicaine ou américaine ?
Au cœur de la sierra, la bataille des *ejidos :* Pilitas contre La Peña
Transférer l'eau vers l'intérieur : le litige entre les États de Durango et de Sinaloa
Une bataille amont-aval en perspective ?
La Laguna ou le triomphe du libéralisme
Les problèmes de ressource et d'usage de l'eau : d'une exploitation minière à une gestion patrimoniale

L'écotourisme : une alternative à la déprise et à la surexploitation ?
Des atouts pour développer une nouvelle activité
Luc Descroix
Vers le développement de l'écotourisme
« Ce que le canyon du Colorado aimerait être quand il sera grand »
Des paysages de montagne tempérée
Un décor de western : Durango, mythe du cinéma mexicain
Des villages à l'architecture coloniale, quelques haciendas, et des missions jésuites
De nombreux autres centres d'intérêt

Eau et espace à Valle de Bravo
La bataille pour l'eau
Luc Descroix, Michel Esteves, David Viramontes, Céline Duwig, Jean-Marc Lapetite et Technicien hydrologue à l'IRD.
Petite géopolitique des eaux au Mexique
La Culture ou les cultures
Historique de l'alimentation en eau de México
Le sistema Cutzamala
Et l'avenir ?
Conflits entre les usages de l'eau
Comment pérenniser la ressource ?
Des recherches à approfondir : le programme HVA

Conclusion
Une région à construire, un territoire et des ressources à préserver
Luc Descroix, David Viramontes et José Luis Gonzalez Barrios
Vers une gestion partagée et raisonnée des ressources eau-sol-végétation
La spécificité de la Sierra Madre occidentale
Quel enseignement en tirer à l'échelle mexicaine et à l'échelle globale ?

Glossaire

Résumé

Summary

Resumen

Remerciements

1 Nous tenons à remercier très chaleureusement les habitants du village ***(ejido**[1]**)*** de Boleras, qui nous ont très bien accueillis et hébergés durant dix années de suite. Nous remercions aussi les autres *ejidos* (La Posta de Jihuites, Escobar, La Ciénega de Escobar) qui nous ont autorisés, à travers leur comité ***ejidal***, à installer cinq bassins versants expérimentaux, des parcelles et micro-bassins de mesures sur quatre sites différents, et un réseau de cinquante-six capteurs pluviométriques. Nous tenons à spécifier qu'absolument aucune dégradation, aucun vol ni vandalisme de tout ce matériel n'a été observé durant toutes ces années.

2 Nos remerciements se portent tout particulièrement sur la famille de Anita et Hilario Delgado, dont l'accueil nous a permis de nous sentir chez nous dans le hameau de Pilitas de Abajo (*ejido* Boleras) ; cette famille a mis une maison à notre disposition durant toutes ces années et a facilité le contact avec les habitants, les autorités et, dans la vie de tous les jours, nous ont aidés de mille et une façons, ne serait-ce que pour les nombreux dépannages de véhicules ou le transport des malades à la clinique de La Posta. Leurs enfants et petits-enfants nous ont accompagnés, aidés et accueillis les bras ouverts, leur amitié a été un soutien incommensurable pour les vingt-et-un stagiaires et jeunes étudiants français, mexicains et autres qui se sont succédé à Boleras, de même que pour les chercheurs français et mexicains peu accoutumés à la région au départ.

3 Un grand coup de chapeau aussi à notre cher et regretté copain et collègue Henri Barrai qui nous a aidés de sa solide expérience et de ses grandes connaissances du milieu et des gens du Nord-Mexique ; son humour et sa gentillesse comme sa disponibilité ont été d'un immense secours tout au long de ces années. Devenu l'ami de beaucoup d'entre nous, nous sentons tous que, comme disait Brassens, « jamais au grand jamais son trou dans l'eau ne se refermera » !

NOTES

1. Les mots apparaissant en gras renvoient au glossaire situé p. 303.

Les auteurs

1 Eva **Anaya,** biologiste et pastoraliste, spécialiste des aires protégées, sous-déléguée du ministère mexicain de l'Environnement dans l'État de Durango, en charge de la Laguna (Gômez Palacio).

2 Jeffrey **Bacon,** professeur de sciences forestières à la UJED (université de Durango).

3 Henri **Barrai,** géographe pastoraliste, spécialiste de la gestion des aires protégées, décédé en 2001, était directeur de recherche à l'IRD.

4 Arnaud **Bollery,** géographe, chargé des systèmes d'information géographique au conseil général de l'Isère (Grenoble).

5 Christelle **Boyer,** géographe, fonctionnaire territoriale au département de la Drôme (Valence).

6 Luc **Descroix,** géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

7 Céline **Duwig,** hydrologue, chercheur à l'IRD, en poste à México.

8 Michel **Esteves,** hydrologue, chercheur à l'IRD.

9 Juan **Estrada,** hydrologue, chercheur au Cenid Raspa.

10 Coral **Garcia,** doctorante au laboratoire de géographie physique (CNRS, Meudon).

11 José Luis **Gonzalez Barrios,** hydro-pédologue, directeur de recherche au Cenid Raspa (Inifap) de Gômez Palacio.

12 Alfonso **Gutierrez,** hydrologue, chercheur à l'IMTA (Cuernacava).

13 Marie-Areti **Hers,** professeur d'archéologie à l'Unam (Universidad Nacional Autónoma de México), México.

14 Béatrice **Inard Lombard,** géographe, agent de l'aménagement et de l'environnement à la mairie de Seyssins (Isère).

15 Jean-Louis **Janeau,** pédologue à l'IRD, en poste à Bangkok, a travaillé de 1990 à 1995 dans le désert de Chihuahua et a participé au programme « Sierra Madre » en nous aidant à caractériser les états de surface de la sierra.

16 Jean-Marc **Lapetite,** technicien hydrologue à l'IRD.

17 Frédéric **Lasserre,** professeur de géographie à l'université Laval (Québec).

Laura **Macias,** ingénieure informaticienne au Cenid Raspa (Gômez Palacio).

Jean-François **Nouvelot,** hydrologue, directeur de recherche retraité de l'IRD, il a dirigé le programme de 1995 à 1997.

Alain **Plenecassagne,** ingénieur chimiste à l'IRD.

Oscar **Polaco,** professeur d'archéologie à l'Unam (Universidad Nacional Autónoma de México), México.

Jérôme **Poulenard,** pédologue, maître de conférences à l'université de Savoie (Chambéry).

Maria Guadalupe **Rodriguez Camarillo,** ingénieure forestière, chargée de mission à l'école forestière de la UJED (université de Durango).

Raul **Solis,** enseignant à l'École forestière de Durango, thésard de l'Universidad Autónoma de Nuevo León (Linares, Mexique).

Marc **Tardy,** professeur de géologie à l'université de Savoie.

David **Viramontes,** éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

Avant-propos

1 Cet ouvrage est le fruit d'une longue collaboration entre une équipe de l'IRD (ex-Orstom) et des chercheurs de plusieurs laboratoires mexicains, en particulier le Cenid Raspa (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua Suelo Planta Atmósfera)[1] de Gómez Palacio (État de Durango), qui a accueilli le programme « Usage et gestion de l'eau dans un bassin du Nord-Mexique ». Pendant plus de cinq années sur place (de 1992 à 1998) puis pour de plus courtes missions, de 1998 à 2004, nous avons pu mener ensemble des travaux de terrain, de laboratoire et de bureau dans des conditions excellentes et dans une très bonne ambiance.

2 Nous tenons à remercier ici Carlos Hernandez et Ignacio Sanchez Cohen, les deux directeurs successifs du Cenid Raspa, ainsi que l'ensemble de l'équipe présente sur place, en particulier Leopoldo Moreno, Raquel Anguiano et Ernesto Romero. Nous remercions également le programme Ecos-Nord qui a participé au financement de ces recherches, et le programme Isis du Cnes, grâce auquel nous avons pu disposer d'images satellitales Spot à tarif très préférentiel.

3 Par ailleurs, nous avons pu compter sur l'immense connaissance du terrain et des hommes, du milieu et de son contexte mexicain, que nous a offert Henri Barrai, notre collègue géographe, malheureusement décédé depuis. Henri a beaucoup donné de son temps pour encadrer les étudiants de l'équipe, pour parfaire les connaissances de ses collègues, français et mexicains, moins expérimentés que lui ; c'est lui qui a impulsé les recherches sur la qualité des pâturages et sur les modes de gestion de l'espace, qui nous ont permis de comprendre comment le surpâturage pouvait modifier le comportement hydro-pédologique des milieux. Sa grande expérience, et l'amitié et l'affection qu'il a eues pour ce grand pays, culturellement si riche et passionnant, ont été un grand apport tant pour ce modeste travail que pour la collaboration scientifique franco-mexicaine, en particulier au nord de ce grand pays.

4 Tous ces travaux reposent sur le précieux travail de l'équipe du laboratoire, qui sous l'œil vigilant de Alain Plenecassagne et José Luis Gonzalez Barrios, a procédé à plusieurs dizaines de milliers d'analyses d'eau, de sols, de roches et de plantes durant toutes ces années. L'équipe qui avait en charge le dépouillement des données, leur saisie et leur traitement informatique ainsi que la saisie des cartes a effectué un travail de fourmi sans lequel tout ceci n'aurait pas vu le jour : Laurita Macias a su fédérer le travail de l'équipe,

avec l'aide de Irene, Romuald, Stéphane, Salomé, Diana et Cristobal, et constituer la base de données et le système d'information géographique.

5 Les saisons des pluies, sur le terrain, ont été l'occasion de collecter de grandes quantités de données, et cela n'a pu se faire que grâce à l'intervention de nombreux stagiaires, volontaires du service national et étudiants, à savoir Eva, David, Jérôme, Frédéric, Nelly, Lupita, Pierre-Yves, Olivier, Raphaël, Alain, Cristobal, Murielle, Marco, Arnaud, Christelle, Victor, Sylvie et Béatrice.

6 Nous tenons à remercier ici nos collègues de Durango, Olivier Grunberger et Jean-Louis Janeau, qui nous ont appuyés matériellement, scientifiquement et moralement durant les premières années du programme.

NOTES

1. Centre de recherche de l'Inifap (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agro-Pecuarias).

Préambule

Un bilan de dix années de recherche hydrologique au Nord-Mexique

Jean-François Nouvelot

---

1 L'eau et sa gestion représentent pour le Mexique une priorité nationale depuis de nombreuses années et, en particulier, depuis que la **Réforme agraire** de 1936 s'est appuyée, en plus de l'expropriation d'une partie de chaque grande **hacienda**, sur la création de nouveaux périmètres irrigués afin de pourvoir en terres le plus grand nombre possible de paysans. L'accès à l'eau agricole est particulièrement problématique dans les régions septentrionales, arides et semi-arides pour l'essentiel, où sont localisés 53 % des terrains cultivables mais où ne tombent que 7 % des précipitations de l'ensemble du pays, les cumuls pluviométriques annuels se situant, en moyenne, entre 300 et 500 mm, certaines zones recevant moins de 200 mm.

2 Dans ce contexte, l'accroissement démographique, la mauvaise gestion des disponibilités, l'inefficacité parfois du système communautaire *ejidal*, le manque d'une culture « hydraulique » et la mentalité pionnière – doublée d'un comportement « minier » d'appropriation et d'exploitation des ressources naturelles – d'une grande partie des habitants ont vite conduit à une surexploitation des ressources en eau.

3 C'est particulièrement le cas dans le bassin **endoréique** du Nazas-Aguanaval, dont les eaux de surface comme de profondeur sont utilisées presque exclusivement pour l'irrigation d'un périmètre de 160 000 ha, la Laguna, qui connaît depuis quelques années une grave crise du fait d'une série d'années déficitaires en précipitations. Cette région représente l'un des trois grands problèmes auxquels est confronté actuellement le Mexique dans le domaine des ressources hydriques, les deux autres étant la situation conflictuelle, face aux États-Unis, pour le partage des eaux (là aussi très déficitaires) du río Bravo/ río Grande, et la disparition annoncée de la lagune de Chapala, située dans l'État de Jalisco, proche de la grande ville de Guadalajara, qui pourrait s'assécher complètement au milieu de cette décennie, du fait de la surexploitation de la ressource sur son bassin versant.

4 Face à cette problématique, une approche scientifique s'imposait afin de fournir des bases solides à de possibles solutions. C'est dans ce but qu'ont été menées de 1992 à 2002 des

recherches hydrologiques dans le cadre d'une convention passée entre l'Orstom (ancien nom de l'IRD) et le Cenid Raspa, situé à Gómez Palacio, dans la partie du périmètre de la Laguna appartenant à l'État de Durango. Ce programme de recherche franco-mexicain était sobrement intitulé « Usages et gestion de l'eau dans un grand bassin du Nord-Mexique » (il s'agit de la Région hydrologique n° 36, ou bassin des ríos Nazas et Aguanaval).

5 Les recherches ont été entreprises sur deux sites expérimentaux : l'un en zone semi-aride, où les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 300 et 500 mm, au ranch Atotonilco, dans l'État de Durango ; l'autre, en zone de montagne sub-humide, où les précipitations moyennes annuelles se situent entre 500 et 800 mm, dans la Sierra Madre occidentale. Ces travaux portaient sur les mécanismes et la modélisation des processus hydrologiques à différentes échelles spatio-temporelles pour, dans une première phase, acquérir une meilleure connaissance des potentialités hydriques de l'ensemble de la région puis, dans une deuxième phase, rationaliser ou au moins améliorer leur exploitation. Cette étude avait été précédée par un autre programme qui s'était intéressé spécifiquement à la zone aride où les précipitations annuelles sont inférieures à 300 mm (le programme « Mapimi ») ; c'est la raison pour laquelle peu de recherches ont été faites dans le cadre de cette convention « région hydrologique 36 » sur cette dernière zone climatique, en dehors d'un bassin expérimental, situé en bordure de la Laguna et suivi de 1993 à 1995 (le bassin de la Ventana, dans l'État de Coahuila).

6 Cet ouvrage présente les résultats de ces recherches, qui montrent l'impact de la dégradation des milieux sur les ressources en eau et l'urgence d'adopter une gestion patrimoniale des eaux et, surtout, de le faire à l'échelle du bassin versant. On y insiste sur le lien qu'il peut y avoir entre l'occupation de l'espace par l'homme et les ressources en eau. Il s'agit là d'études pluridisciplinaires pour lesquelles plusieurs spécialistes et diverses équipes ont apporté leurs connaissances et leur expérience. Nous les remercions ici de leur contribution.

AUTEUR

JEAN-FRANÇOIS NOUVELOT

Hydrologue, directeur de recherche retraite de l'IRD, il a dirige le programme de 1995 a 1997.

Introduction

Luc Descroix

1 Les recherches qui ont été menées en partenariat entre l'Orstom, puis l'IRD, et le Cenid Raspa, entre 1992 et 2002, dans la Sierra Madre occidentale se poursuivent aujourd'hui dans le cadre d'un programme Ecos-Nord (programme animé par l'université Paris-V encourageant la coopération entre universités françaises et latino-américaines), sur les bassins expérimentaux du haut bassin du río Nazas. Cette longue collaboration scientifique, animée essentiellement par des hydrologues et des pédologues, s'est intéressée tout particulièrement aux *conséquences hydrologiques des changements d'usage des sols* dans cette grande chaîne de montagne d'Amérique du Nord. Six années d'observations intensives, suivies d'autant d'années de suivi sur certains sites ayant démontré un intérêt scientifique particulier, nous ont permis d'améliorer les connaissances sur les processus hydrologiques dans cette zone de montagne et de comprendre comment les modes d'exploitation, et leur évolution, entraînaient des changements loin en aval, et pour les générations futures, au point de justifier de conseiller aux autorités mexicaines, à travers le Cenid Raspa, d'intervenir dans la gestion de l'espace d'une région qui constitue un véritable château d'eau pour tout le nord du pays. Par ailleurs, ce travail est vraiment le fruit d'une intense collaboration entre nos deux organismes porteurs, et le seul fait que cette collaboration continue montre l'intérêt de la communauté scientifique. Les nouvelles directives mexicaines dans la politique de gestion de l'eau et de l'espace ont pu être inspirées par ces travaux ou pourront l'être dans le futur ; au moins une collection de données et d'observations de terrain, de traitements et de modélisations, sont à la portée des scientifiques et des aménageurs, des preneurs de décision et des responsables politiques.

La Sierra Madre, aujourd'hui : une montagne relativement privilégiée qui se vide

2 La Sierra Madre occidentale est mal connue en Europe, mais aussi en Amérique du Nord ; au Mexique, elle reste une région éloignée du « centre », peu touristique et donc peu

visitée. Étrangement, elle sort de sa torpeur depuis une dizaine d'années, au moment où sa population émigre en masse aux États-Unis. L'énorme gradient de niveau de vie entre les deux côtés de la frontière et la relative facilité pour aller et revenir de part et d'autre favorisent la migration de travail souvent vécue comme temporaire au départ mais le plus fréquemment définitive.

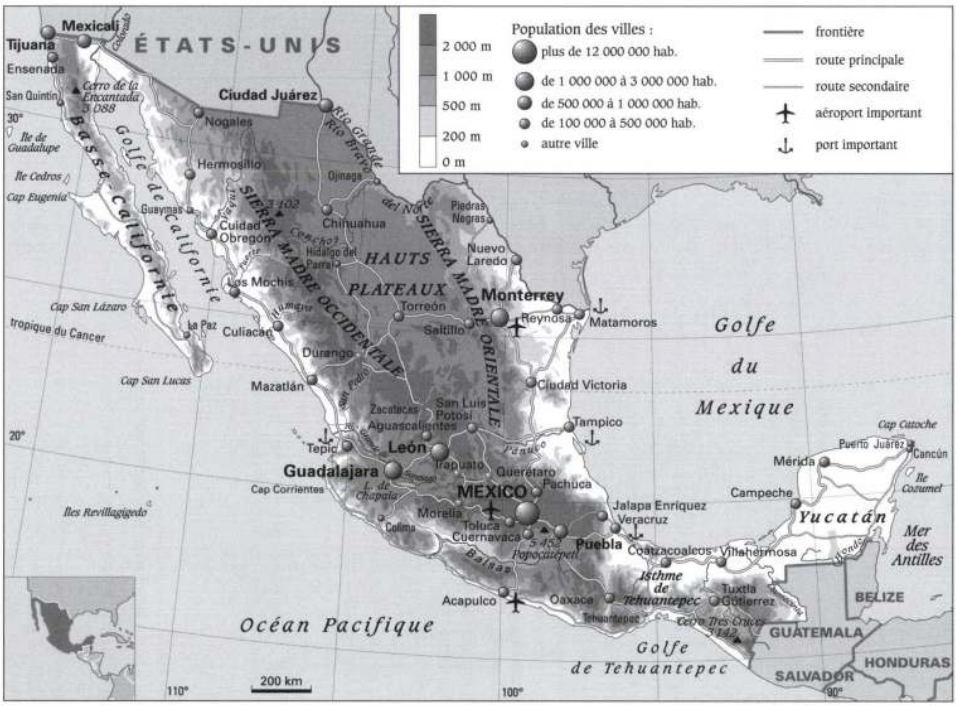


Fig. 1 – Carte topographique du Mexique (source Terracarta).

3 Pourtant, cette chaîne de montagne semble être assez dynamique : les ressources naturelles y sont relativement abondantes, à commencer par l'eau, le bois, les fourrages, les minerais ; le niveau de vie des habitants est bien plus élevé que dans les autres zones rurales mexicaines, *a fortiori* les zones de montagne, du fait de la forte proportion d'émigrés, qui se traduit par une richesse répartie sur une population amoindrie, et aussi par des rentrées de capitaux ; niveau de vie probablement aidé aussi par les revenus des cultures illicites. On y sent une – relative –aisance, peu commune dans les montagnes latino-américaines, qui contraste avec la misère des paysans indiens des montagnes du Sud. Une grande proportion des familles possède ici un véhicule (même s'il s'agit souvent d'un vieux pick-up américain souvent non « légalisé », on reste aussi parfois dans des zones de non-droit…), une maison en dur, un mobilier complet ; l'électricité est arrivée dans de nombreux villages, l'eau courante commence à faire son apparition, le téléphone atteint grâce au satellite les communautés les plus reculées. De nombreux villages sont inaccessibles par la route (les ***barrancas*** sont souvent infranchissables) mais, dans ce cas, l'instituteur par exemple est conduit en avion au mois de septembre, a droit à des communications par radio hebdomadaires avec les siens, et on repasse le prendre en juin pour les grandes vacances ; l'avion peut aussi être utilisé pour évacuer les malades et les blessés en cas d'urgence. On l'aura compris, le Mexique, pays émergent, est aussi l'héritier d'une **Révolution** (celle de 1910, mais dont les slogans, surtout dans le nord qui a été l'un de ses berceaux, restent inscrits en grandes lettres à l'entrée des villes) qui a aidé à forger une nation en réussissant à scolariser près de 100 % des enfants et à installer

un système de santé d'une qualité qu'on ne retrouve qu'à Cuba et au Costa Rica dans l'ensemble latino-américain.

4 Mais ce dynamisme et cette aisance apparents ont comme corollaire, on l'a vu, une très forte émigration. Celle-ci est le fait de tous les jeunes en âge de travailler et, de plus en plus, après avoir été surtout masculine, le fait des deux sexes. Alors une montagne relativement privilégiée qui se vide ? Ce paradoxe, d'ailleurs synonyme de hausse du niveau de vie des « restants », recouvre une migration multiforme (cf. « Une montagne en voie d'abandon ? », p. 65), et bien des gens ont pris l'habitude de traverser régulièrement la frontière (parfois clandestinement) une ou plusieurs fois par an.

Le surpâturage, principale cause des changements hydrologiques

5 Cette dépopulation n'est pas visible dans le paysage, car elle ne s'accompagne pas d'une déprise rurale. Le Mexique est depuis trois décennies au moins un formidable bassin de main-d'œuvre pour les États-Unis mais, ici, on a vu en dix ans des villages perdre 80 % de leur population. Or, les paysages montrent toujours presque partout des signes de surexploitation même si, dernièrement, l'engouement pour les clôtures a permis de sauvegarder certains pâturages. En effet, le Mexique a aussi connu une « révolution » durant les années 1990 ; c'est l'entrée dans l'Aléna[1] en 1994, qui a conduit à faire appliquer « l'abrogation de l'article 27 » de la Constitution, abrogation votée en 1992 d'une loi datant de 1936 et instaurant la Réforme agraire. Le système des communautés rurales nouvelles (*ejidos*), issu de l'esprit de la Révolution de 1910, a volé en éclat et la propriété privée est devenue la norme dans presque tout le Mexique (le système communautaire peut persister là où les gens le souhaitent, mais c'est très rare dans le Nord).

6 Ces faits, marquants et capitaux dans l'histoire du pays, se sont traduits par un vaste phénomène d'« enclosure », les nouveaux propriétaires s'empressant de marquer physiquement les limites de leur nouvelle tenure.

7 Ce mouvement d'enclosure et cette forte émigration n'ont que localement freiné ou inversé la tendance à une très forte surexploitation de l'espace, liée principalement au surpâturage et secondairement au déboisement. En effet, ni les clôtures de barbelé, ni l'émigration n'ont provoqué une baisse du cheptel ; au contraire, on profite souvent de l'argent des émigrés pour acheter une nouvelle vache ; certains paysans partent même aux États-Unis quelques mois par an uniquement pour acheter une nouvelle vache, sélectionnée, à leur retour. Or, ces vaches sélectionnées sont certes plus productives (il s'agit ici de race d'embouche) que les races bovines utilisées traditionnellement dans la Sierra Madre, mais elles sont peu enclines à la marche en montagne et ont tendance à rester près des points d'eau ; par ailleurs, les habitants ont de moins en moins de jeunes bergers pour mener les troupeaux là où les pâturages sont de meilleure qualité et assurer ainsi une meilleure gestion des parcs.

8 Cette surexploitation de l'espace a conduit à une forte dégradation des pâturages et des sols, ce qui a modifié leurs conditions hydro-dynamiques et, par conséquent, le ruissellement et l'infiltration, donc la capacité du sol à retenir l'eau. Le régime des cours d'eau n'a pas manqué d'en être affecté, les crues devenant plus soudaines et courtes, les

étiages plus marqués. Les ressources en eau sont donc menacées à terme si la gestion de l'espace n'est pas améliorée rapidement, dans une optique plus patrimoniale.

9 On l'aura compris, le surpâturage a été cerné comme la principale cause de dégradation de l'espace et, partant, principale cause des changements hydrologiques enregistrés. On est bien, ici dans une *économie agro-pastorale*, et les pages qui suivent développeront parfois des éléments de comparaison avec d'autres régions d'économie de même type, y compris sur d'autres continents (avec le Sahel par exemple où les steppes et les savanes sont aussi des parcours menacés par la surcharge en bétail). Seront aussi évoquées des comparaisons avec le principal massif montagneux d'Europe, ces Alpes qui souffrent aujourd'hui de la *déprise rurale* mais qui ont connu par le passé des phases de surexploitation des versants ayant provoqué une très sensible déstabilisation du régime hydrologique (crues et étiages exacerbés, inondations des zones planes en aval). La dynamique de ces milieux agro-pastoraux est souvent très dépendante du climat, mais aussi des migrations et des conditions d'accès aux ressources, eau, sol et pâturages.

10 La problématique exposée ici est donc l'étude des conséquences des changements d'usages des sols sur l'évolution des ressources en eau. Les changements d'échelles spatiale et temporelle nous feront passer de l'unité élémentaire de sol au bassin versant, et du bassin versant élémentaire à celui des grands cours d'eau que sont le río Nazas, le río Conchos ou encore le río Sonora. Les rappels historiques ou les emprunts aux sciences humaines seront parfois indispensables pour comprendre l'enchaînement de faits qui ont pu mener aux conditions actuelles, elles-mêmes fragiles et sans doute prochainement caduques.

La Sierra Madre occidentale et son intérêt pour le Mexique

11 On dit souvent du Mexique, mais aussi de toute l'Amérique latine : « *Pobre México, tan lejos de Dios y tan cerca de Estados Unidos* » (« Pauvre pays, si loin de Dieu et si près des États-Unis »). Que dire de la Sierra Madre occidentale qui est même en continuité géologique avec la partie occidentale des montagnes Rocheuses : le nord des États de Chihuahua et de Sonora est à la frontière de l'Arizona et du Nouveau-Mexique. La frontière Mexique/États-Unis est la seule frontière terrestre entre les pays dits « du Nord » et ceux « du Sud ». Elle vit de ce gradient formidable et des flux d'hommes, de marchandises, d'argent et de communications de tout genre qui y sont chaque jour plus développés. La Sierra Madre est en marge de cette frontière même si géologiquement elle la traverse, mais elle est forcément très influencée par cette proximité géographique. Cette frontière est une frontière entre Nord et Sud, certes, mais peut-être plus encore une *frontière* entre culture anglo-saxonne et culture latino-américaine. Bien que les modes de vie nord-américains soient très répandus au Mexique, surtout au nord du pays, et que 35 millions d'habitants des États-Unis soient mexicains ou d'origine mexicaine, bien que le Far West soit en continuité parfaite de paysages et de modes d'exploitation avec les grands espaces du Nord-Mexique, bien que le plus grand désert d'Amérique, celui de Chihuahua, soit à cheval sur la frontière, les traits des sociétés sont têtus et *la frontière culturelle, artistique, socio-économique, religieuse, etc. demeure bien sur le río Grande.*

12 La Sierra Madre est géologiquement en Amérique du Nord et culturellement en Amérique latine, malgré l'intensité croissante des échanges humains et économiques, et malgré les

forts emprunts culturels, dans les deux sens. Nous sommes ici dans *une région transfrontalière,* et cela nous a amenés parfois à nous intéresser à ce qui se passe de l'autre côté de la frontière.

13 Mais la Sierra Madre, c'est avant tout une région de montagne, assez élevée (3 300 m au maximum) mais surtout très escarpée ; elle a donc des traits et des problématiques propres aux *milieux de montagne :* difficultés de circulation, difficultés inhérentes à l'agriculture de montagne, climat rude et sec, pluviométrie excessive en saison des pluies, etc. D'autres zones de montagne seront donc comparées, qu'elles se situent ou pas en zone tropicale ; car, même si nous sommes essentiellement au nord du Tropique, il *s'agit bien ici d'une zone tropicale :* le régime des pluies est tropical (pluies de saison chaude), les températures sont élevées en plaine ; en revanche, l'altitude impose des rigueurs hivernales et, comme dans d'autres massifs montagneux d'Amérique latine et d'autres régions tropicales, les zones les plus hautes connaissent un climat de type tempéré, avec des températures élevées l'été et basses l'hiver.

14 Cette région de montagne a comporté des intérêts divers et changeants pour le Mexique. Longtemps, les foyers d'activité se sont cantonnés aux mines de métaux rares et aux implantations des jésuites. Les Tarahumaras, les Tepehuanos, les Yaquis et les Huicholes n'ont jamais constitué de populations importantes, et leur économie de semi-nomadisme avait peu d'impact sur le milieu. La variété et l'abondance des minerais ont donc longtemps justifié la colonisation espagnole, mais l'activité n'a pas rayonné ; elle s'est limitée à l'extraction des minerais, leur traitement se réalisant dans d'autres régions (Torreón dans l'État de Coahuila, pour les métaux rares, Monterrey pour le fer de Durango, par exemple). La Sierra Madre est ainsi devenue au cours de la première moitié du XX^{e} siècle une zone d'élevage extensif, activité qui est encore de nos jours la principale ressource des populations locales.

15 Cependant, ce n'est pas la production agricole ni l'activité minière qui, aujourd'hui, représente le plus grand intérêt de cette sierra. Ce sont ses ressources en eau qui fondent son principal atout. Elle approvisionne ainsi d'autres régions, plus peuplées mais manquant sévèrement d'eau, en particulier les zones arides ou semi-arides qui l'entourent à l'ouest (désert côtier du Sonora et de Basse-Californie) comme à l'est (désert de Chihuahua).

16 Depuis la période coloniale, les villes se sont installées à proximité des cours d'eau débouchant de la sierra : Culiacán sur le río Humaya, El Fuerte sur le río du même nom, Ciudad Obregón sur le río Yaqui ; cette logique de localisation prévaut bien sûr pour la période postérieure, avec Hermosillo installée sur le río Sonora, Torreón sur le Nazas, Jimenez sur le Conchos, etc.

17 Au cours du XX^{e} siècle, de vastes périmètres irrigués, alimentés par de grands barrages, ont vu le jour et se sont développés. Mais ces aménagements ont profité à la périphérie sans bénéficier aux populations installées dans les montagnes.

18 La question qui ne manque pas de se poser de nos jours, où la concurrence pour l'espace et pour l'eau devient vive, surtout en zone semi-aride, c'est de savoir si cette eau ne pourrait pas produire autant ou plus de valeur ajoutée et créer autant ou plus d'emploi, dans la sierra où elle est moins soumise à l'évaporation et les sols à la salinisation. Et par ailleurs, cela rejoint le but scientifique de nos recherches, cette réserve d'eau, qui pourrait être à terme menacée par la dégradation des milieux (sol et végétation) dans la zone de montagne, est presque intégralement utilisée aujourd'hui. La demande étant

croissante, les utilisateurs de plaine ne vont-ils pas exiger une « sanctuarisation » de la Sierra Madre pour en pérenniser le « rendement hydrologique » ?

19 Si cet ouvrage peut contribuer à conseiller les gestionnaires de l'eau en leur démontrant que celle-ci doit être une gestion de l'espace, s'il arrive à convaincre qu'un bûcheron, un éleveur ou un exploitant de mines sont aussi des acteurs dans la gestion de l'eau parce qu'ils interviennent sur l'espace du bassin versant et sa conservation, les recherches menées durant douze années au Nord-Mexique n'auront pas été vaines.

Construction de l'ouvrage

20 Après une introduction au cours de laquelle seront exposés les principaux traits physiques de la Sierra Madre occidentale, ce travail se découpe en quatre grandes parties :

- dans la première, on aborde le contexte historique et les circonstances humaines, politiques et démographiques qui expliquent le développement du système d'exploitation socio-économique actuel et son évolution récente ; on mettra en opposition la dépopulation rapide des zones rurales avec les débuts de l'occupation des montagnes par l'homme, il y a des milliers d'années ;
- la deuxième partie s'intéresse aux phénomènes hydrologiques tels qu'ils ont été étudiés pendant plus de dix ans, et l'on s'appliquera à en décortiquer les processus de la grande échelle (l'unité de sol élémentaire) à la plus petite (celle des grands bassins fluviaux débouchant hors du massif) ; le climat, et en particulier la pluie, les sols et leurs **états de surface**, condition première du ruissellement, et les données hydrologiques sont analysés afin d'en comprendre leur évolution récente ;
- la troisième partie interprète ces évolutions, à travers ce qui semble être la problématique principale des milieux de montagne tropicale des pays du Sud : la dégradation de leurs ressources (la végétation, les sols et donc l'eau), ses causes et ses conséquences ; on s'arrêtera sur les recherches, encore en cours, d'une éventuelle rétroaction des forêts sur la distribution spatiale des précipitations ;
- la dernière partie aborde les problèmes géopolitiques que pose cette question d'un développement durable. Si la volonté est unanime d'une meilleure gestion de l'eau, les intérêts diffèrent. Préserver l'espace dans une optique patrimoniale permettrait à n'en pas douter de développer une forme d'écotourisme qui peut être une alternative à la fois à la déprise rurale et à la surexploitation ; cette nécessité de développement durable se pose dans les mêmes termes dans le bassin de Valle de Bravo, dont on étudiera la problématique en fin d'ouvrage, montrant ainsi que les problèmes rencontrés dans la Sierra Madre occidentale se retrouvent hélas avec encore plus d'acuité là où la pression démographique est bien plus réelle, ce *qui est le cas dans toutes les montagnes du sud du pays, mais aussi du reste de l'Amérique centrale et du Sud, et dans la plupart des montagnes tropicales.*

La Sierra Madre occidentale, « château d'eau » du Nord-Mexique

21 La Sierra Madre occidentale constitue le plus grand massif rhyolitique du monde. Elle s'étend sur plus de 1 500 km du nord au sud et sur 200 à 400 km de large suivant les endroits. Cette chaîne est composée d'un empilement très épais (plusieurs milliers de mètres) d'épanchements **d'ignimbrites** rhyolitiques (cf. encadré 1 « Géologie de la Sierra

Madre occidentale. Constitution et origine », p. 33) qui ont façonné un ensemble plutôt tabulaire avec un versant oriental, plus sec, descendant régulièrement vers l'Altiplano nord-central mexicain et un versant occidental, au contraire bien plus humide et très escarpé, disséqué par les nombreuses vallées dévalant vers le Pacifique. Les Barrancas del Cobre (le rio Fuerte et ses affluents) et leurs 1 850 m de profondeur ne sont que les plus connues de ces profondes incisions qui rendent le franchissement de la chaîne d'est en ouest très difficile (il n'y a qu'une route actuellement, entre Durango et Mazatlán, et un chemin de fer, de Chihuahua à Los Mochis, pour franchir l'obstacle au plus court), alors que la circulation sur la ligne des hauts plateaux est relativement aisée. Il faut dire que ces zones sommitales sont d'altitude subégale ; le point culminant de la sierra est à 3 310 m, mais aucun col ne la franchit à moins de 2 400 m ; c'est dire que l'ensemble est massif mais peu accidenté pour les secteurs les plus hauts (fig. 1).

22 Cette chaîne constitue indéniablement un « château d'eau » pour tout le nord du pays, et tous les cours d'eau importants y prennent leur source, qu'ils s'écoulent vers l'Atlantique (le rio Conchos, affluent du rio Bravo/Grande), vers une des dépressions endoréiques (le rio Nazas) nombreuses dans cette région aride et semi-aride, ou vers le Pacifique comme le rio Fuerte, le rio Sonora, le río Yaqui ou encore le rio Humaya. La Sierra Madre est encadrée, à l'est, par le plus grand désert d'Amérique du Nord, celui de Chihuahua et, à l'ouest, par une plaine littorale qui bénéficie au sud d'un climat tropical humide, jusqu'à la latitude de Mazatlán, et devient de plus en plus aride vers le nord (300 mm de précipitations annuelles environ vers Los Mochis), jusqu'à laisser la place aux déserts côtiers du Sonora et de Basse-Californie. Le point le plus sec du Mexique se trouve dans la basse vallée du Colorado (50 $mm.an^{-1}$).

23 La Sierra Madre occidentale constitue une barrière au franchissement, surtout sur son versant occidental, très escarpé (fig. 2) ; elle est aussi un obstacle pour les masses d'air humides venues du sud-ouest, qui apportent l'essentiel des précipitations en saison des pluies. Il existe aussi une petite saison des pluies en hiver (décembre-janvier) mais celle-ci, outre qu'elle n'apporte en moyenne que 10 % des précipitations annuelles, est très dépendante de l'Enso (El Niño Southern Oscillation) ; en effet, elle est importante surtout les années « chaudes », et plus sur le versant occidental que sur le versant interne de la sierra. Des conditions climatiques relativement favorables aux confins de ces latitudes subtropicales, généralement caractérisées par l'aridité en façade ouest des continents, font de la Sierra Madre une région a *priori* attractive, mais aussi un enjeu du fait de ses ressources.

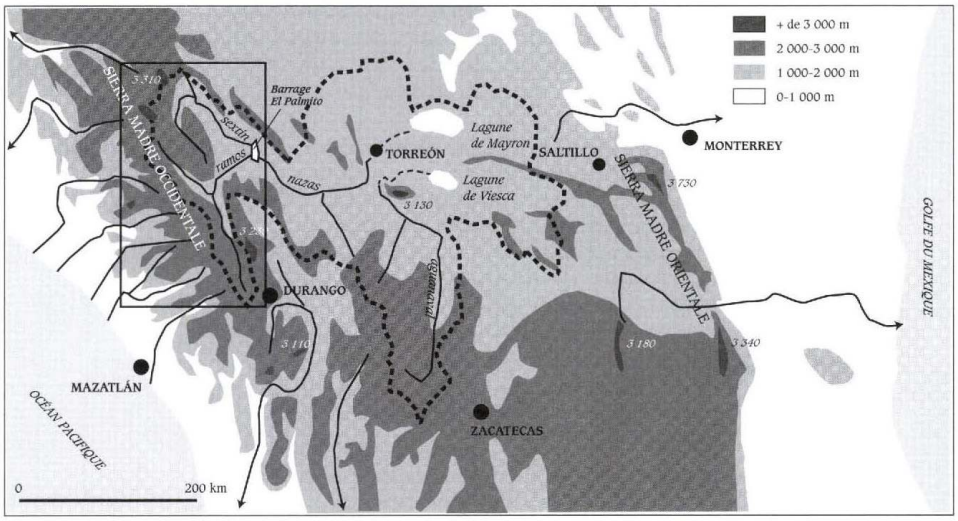


Fig. 2 – Relief de la Région hydrologique n° 36 et de la partie centrale de la Sierra Madre occidentale. Le rectangle signale l'aire d'étude du haut bassin du río Nazas.

24 À l'époque de la colonisation espagnole, ce sont ses ressources minérales qui en avaient fait une aire de spéculation. Les affleurements de roches plutoniques et cristallines (fig. Il dans l'encadré 1 « Géologie de la Sierra Madre occidentale. Constitution et origine » p. 33) laissent apparaître de nombreux filons de métaux rares (or, argent) ou moins rares (cuivre, plomb, etc.), mais aussi de nombreux gisements de manganèse. L'exploitation de ce dernier minerai, très abondant dans la zone d'étude du haut Nazas, a brutalement cessé en 1974, son prix s'étant effondré à la fin de la guerre du Viêt-nam. En revanche, de très grandes exploitations minières sont encore en activité : à Cananea (extrême-nord de l'État du Sonora), d'où l'on extrait essentiellement du cuivre, du plomb et du zinc ; La Ciénega de Nuestra Señora (ouest de l'État de Durango) et El Colorado (nord de l'État de Durango), d'où l'on extrait surtout de l'or et de l'argent.

25 Depuis la fin du XIX[e] siècle, l'élevage bovin extensif a pris possession de ces terres boisées mais au potentiel meilleur que les plaines du centre-nord bien plus arides. La végétation naturelle de forêts étagées suivant l'altitude[2] (fig. 3) des hauts versants et des plateaux de la sierra tend à être remplacée par les pâturages, sauf dans les secteurs de sylviculture, où cette activité occupe tout l'espace. Si l'élevage reste l'activité principale des paysans et des communautés rurales, la sylviculture est devenue depuis trente ans l'activité motrice de la sierra, ce qui ne va pas sans poser des problèmes de gestion des ressources.

Mine de cuivre à ciel ouvert de Cananea, au nord de l'État de Sonora ; au premier plan, le bassin de décantation des déchets.

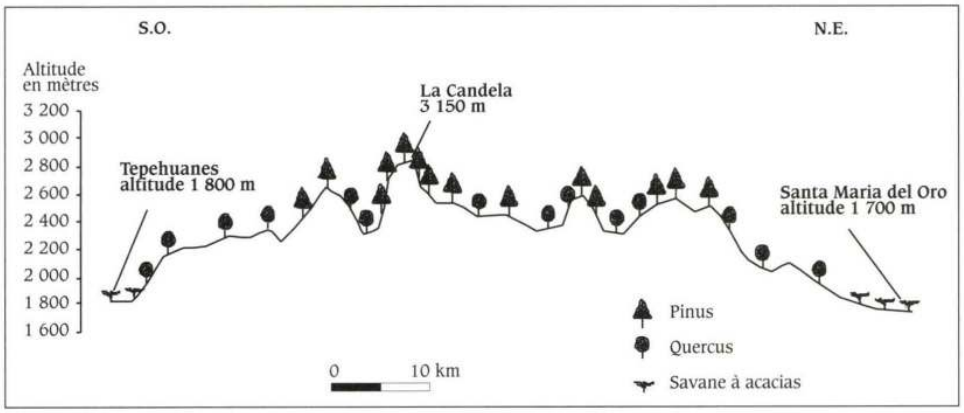


Fig. 3 – Etagement altitudinal de la végétation (VIRAMONTES, 2000).

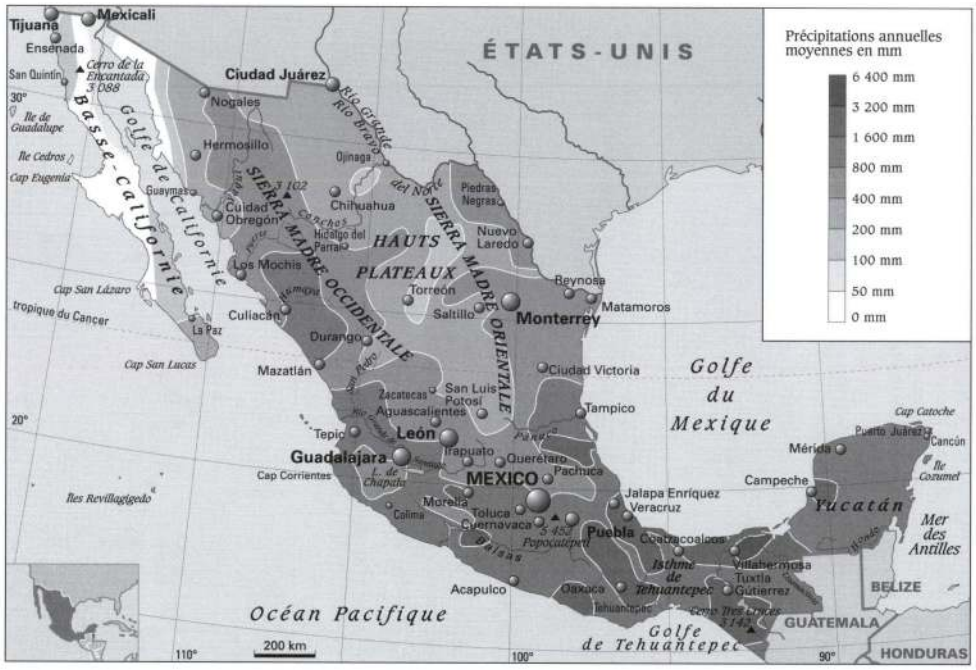


Fig. 4 – Pluviométrie moyenne au Mexique (source Terracarta).

Un château d'eau naturel et... artificiel

26 Les conditions naturelles préalablement décrites, en particulier la topographie, la géologie et la végétation, font de la Sierra Madre un château d'eau naturel.

27 Mais c'est bien sûr la pluviométrie et le climat en général qui sont les principaux éléments conduisant à cette relative richesse en eau. De fait, 54 % des terres arables du Mexique se trouvent dans sa moitié nord, laquelle ne reçoit que 7 % des précipitations tombées sur l'ensemble du pays. Toutefois, la figure 4 montre bien que les hauteurs précipitées sont plus importantes dans la Sierra Madre que sur la plaine côtière du Pacifique, d'une part, et que sur l'altiplano nord-central mexicain, de l'autre. Il y pleut bien plus que dans les zones avoisinantes, et l'évaporation potentielle y est sensiblement plus faible du fait de l'altitude.

28 Certaines stations, sur le versant Pacifique de la sierra, dans les États de Durango et Sinaloa, reçoivent aux alentours de 1 500 mm par an.

29 Ces conditions font des cours d'eau issus de la sierra des émissaires relativement abondants pour la région, les seuls apportant des ressources représentatives, malgré des débits spécifiques très faibles pour des zones de montagne : inférieurs à 2 l.s-1.km-^{2} sur le versant intérieur de la Sierra Madre, entre 5 et 10 l.s-1.km-^{2} sur le versant Pacifique. C'est pourtant sur le versant donnant sur l'altiplano que l'exploitation des cours d'eau sortant de la Sierra Madre a commencé, avec le barrage de La Boquilla sur le Conchos, construit en 1916, et le barrage Lázaro Cárdenas sur le Nazas (tabl. 1 et fig. 5).

Tabl. 1 – 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 ($10^6 m^3$)	Superficie irriguée (km²)
La Boquilla	Conchos	Chihuahua	1916	28 000	3 990	39 700
A. Lopez Mateos	Humaya	Sinaloa	1964	11 000	3 160	126 100
J. Lopez Portillo	San Lorenzo	Sinaloa	1981	8 200	3 400	260 000
Miguel Hidalgo	Fuerte	Sinaloa	1956	29 600	3 290	230 000
Sanalona	Tamazula	Sinaloa	1949	3 250	1 095	95 000
A. L. Rodriguez	Sonora	Sonora	1948	21 900	253	10 000
Alvaro Obregón	Yaqui	Sonora	1953	73 500	3 000	220 000
Lázaro Cárdenas	Nazas	Durango	1946	19 000	4 400	160 000

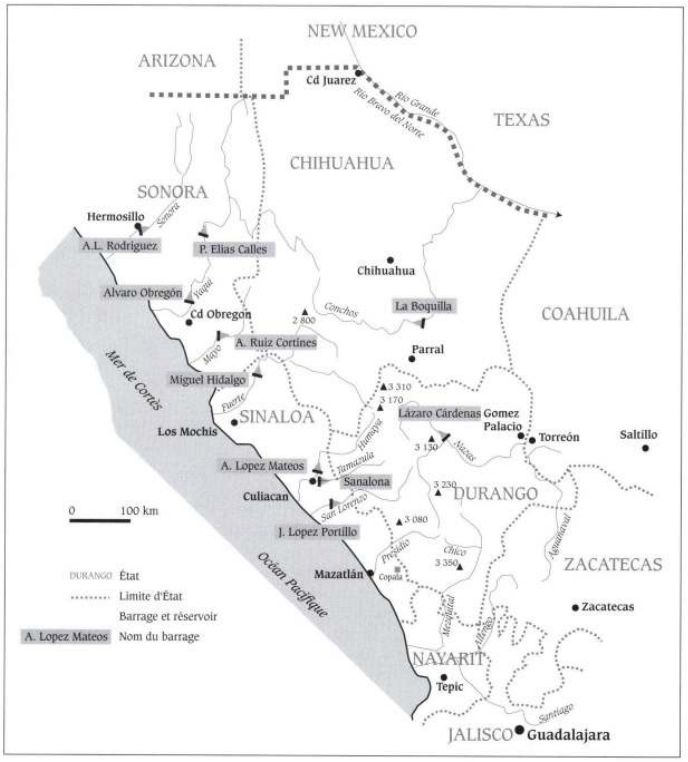


Fig. 5 – Localisation des principaux barrages-réservoirs sur les cours d'eau issus de la Sierra Madre occidentale.

30 Ensuite, c'est sur le versant Pacifique de la sierra que se sont concentrés les efforts d'aménagement. Il est à noter que la période la plus intense de construction correspond aux années 1940, qui sont les années où l'Amérique latine a vécu un peu isolée du monde en guerre et, aussi, l'époque des régimes « populistes » qui ont mené de solides et volontaires politiques d'industrialisation par « substitution aux importations » ; c'est surtout, au Mexique, la présidence de Lázaro Cárdenas, qui a fait appliquer la Réforme agraire et a donc cherché à pourvoir les petits paysans en terres arables par la création de périmètres irrigués. La construction de nombreux gros barrages a été commencée sous cette présidence. On peut remarquer les éléments suivants :

- les barrages ont de grandes capacités (tabl. I) ; ils ont avant tout une vocation de stockage à but agricole (irrigation) et ne produisent en général pas d'hydro-électricité. Six d'entre eux ont une capacité de stockage supérieure à 3 km^3 ; à titre de comparaison, les deux plus grands réservoirs français, ceux de Serre-Ponçon sur la Durance et de Sainte-Croix sur le

Verdon, ne dépassent pas 1 km³ de réserve utile ; mais de nombreux ouvrages plus modestes ont aussi été construits ;

- tous les cours d'eau importants de la Sierra Madre ont été mis à contribution, sauf à l'extrémité sud de la sierra où, la pluviométrie étant bien plus importante, l'irrigation est rarement nécessaire (fig. 5) ;
- les périmètres irrigués ainsi créés sont également de très grande extension, dépassant pour cinq d'entre eux les 100 000 ha irrigables ; c'est le fruit d'une politique volontariste et de conquête d'une nouvelle frontière, celle de la ressource en eau ; il est à remarquer que cette poussée vers le nord intervient après les années du New Deal américain qui ont vu les chantiers fleurir sur les cours d'eau américains, en réponse à la grande crise (le barrage Hoover sur le Colorado, qui privera le Mexique de 95 % des eaux de ce fleuve qui se jette au fond du golfe de Californie, a été mis en eau en 1932) ;
- ces périmètres se dédient surtout aux cultures industrielles : canne à sucre, coton, localement maïs ; pour la Laguna – oasis naturelle de piedmont du río Nazas, dont l'alimentation a été régulée par le barrage Lázaro Cárdenas –, l'activité, auparavant cotonnière et mère d'un puissant complexe agro-industriel, a été remplacée dans les années 1980 par la production de fourrages (essentiellement la luzerne à hauts rendements) destinés à nourrir les vaches qui font de la Laguna le premier bassin laitier du Mexique, avec 28 % de la production nationale de produits laitiers, en plein désert ;
- le remplissage des barrages a été très affecté par la succession d'années de sécheresse (qui s'est achevée avec une année 2004 très pluvieuse ; la saison des pluies 2005 est abondante à fin août) qui a touché le Nord-Mexique depuis le début des années 1990 ; le barrage Lázaro Cárdenas a été à plusieurs reprises pratiquement à sec ; et le barrage A. L. Rodriguez d'Hermosillo était vide depuis deux ans au printemps 2004.

Barrage La Haciendita sur le río Matapé (État de Sonora).

Barrage A. L. Rodriguez, en amont de la ville d'Hermosillo (État de Sonora) ; le réservoir est en 2004 complètement vide depuis plus de deux ans.

BIBLIOGRAPHIE

Références

DESCROIX L., 2002 – Le rôle de l'homme dans l'entretien et la dégradation des sols des régions à faible densité de population ; analyse à travers trois cas de figures. *Revue de Géographie de Québec,* 46 (128) : 215-235.

GONZALEZ B., DESCROIX L., 2000 – Bilan et perspectives de la ressource en eau dans la Région hydrologique n° 36 (Nord-Mexique). *Revue de Géographie alpine,* 2-2000, t. 88 : 115-128.

VIRAMONTES P. D., 2000 – *Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre occidentale, Mexique) ? Causes et conséquences de son évolution.* Thèse de doctorat de géographie de l'université Joseph Fourier-Grenoble 1,450 p.

VIRAMONTES P. D., DESCROIX L., 2000 – Dégradation progressive du milieu et conséquences hydrologiques : étude de cas dans la Sierra Madre occidentale (Nord-Mexique). *Revue de Géographie alpine,* 2-2000, t. 88 : 27-42.

NOTES

1. Aléna : Alliance de libre-échange nord-américaine (TLC : Tratado de Libre Comercio, en espagnol) ; simultanément le Mexique a aussi intégré l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques).
2. Les acacias sont remplacés par les chênes vers 2 000 m, puis par les pins vers 2 500 m.

AUTEUR

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

Encadré 1. Géologie de la Sierra Madre occidentale

Constitution et origine

Marc Tardy

---

1 *La Sierra Madre occidentale est un plastron volcanique tertiaire qui couvre un sixième de la superficie du Mexique (fig. I).*

2 *Dans la partie ouest du pays, l'empilement volcanique constitue un plateau élevé (2 500 m d'altitude moyenne ; point culminant à 3 350 m) allongé nord-nord-ouest/sud-sud-est, long de 1 200 km et large de 200 à 300 km. Il s'étend, d'un seul tenant, de la frontière des États-Unis aux environs de la ville de Guadalajara où il est interrompu par l'axe volcanique transmexicain plio-quaternaire (moins de 5 Ma). À l'ouest, sa limite avec la plaine côtière du Sinaloa est marquée par un fort abrupt topographique entaillé par les canyons (Barranca del Cobre) des cours d'eau tributaires du Pacifique. Sur ses bordures nord et est, le plateau est affecté par la distension dite du «* Basin and Range » *à l'origine de blocs basculés en sierras et de vallées parallèles remplies d'alluvions récentes ; son passage au désert du Sonora ou aux dépressions endoréiques du plateau central mexicain (1 500 à 2 000 m d'altitude moyenne) y est progressif.*

3 *L'existence du plus vaste entablement de roches volcaniques acides connu au monde qu'est la Sierra Madre occidentale a été signalée dès le début du XX^e^ siècle par les travaux des pionniers de la géologie mexicaine :* ORDONEZ *(1900),* HOVEY *(1907),* KING *(1939),* BURROWS *(1949). Ce n'est, cependant, qu'à partir des années 1970 que sont menées, notamment le long de la route Durango-Mazatlán (* MCDOWEL *et* KEISER*, 1977 ;* SWANSON et al.*, 1978) et aux environs de Chihuahua (*SWANSON *et* MCDOWEL*, 1985), les premières études pétrologiques, géochimiques et radiochronologiques de l'ensemble de l'empilement volcanique qui constitue cette montagne.*

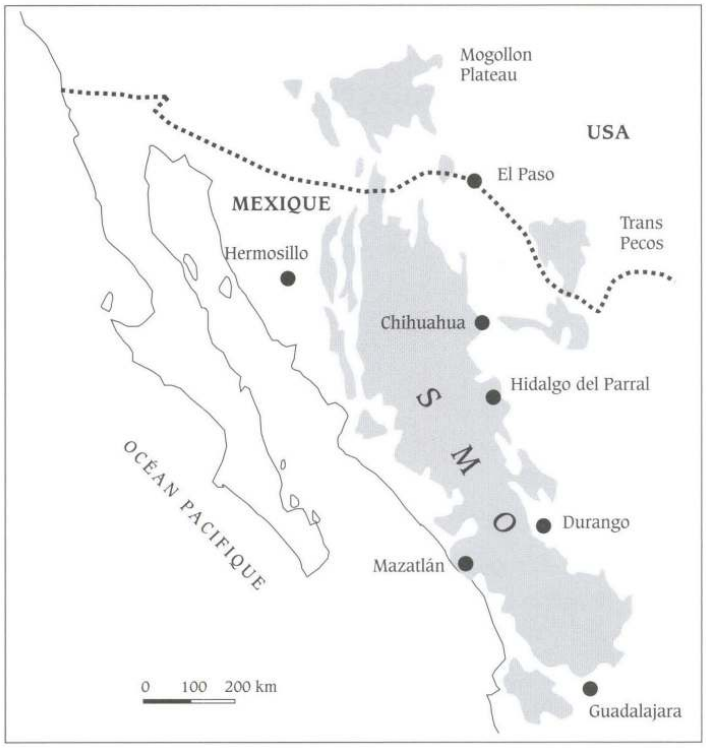
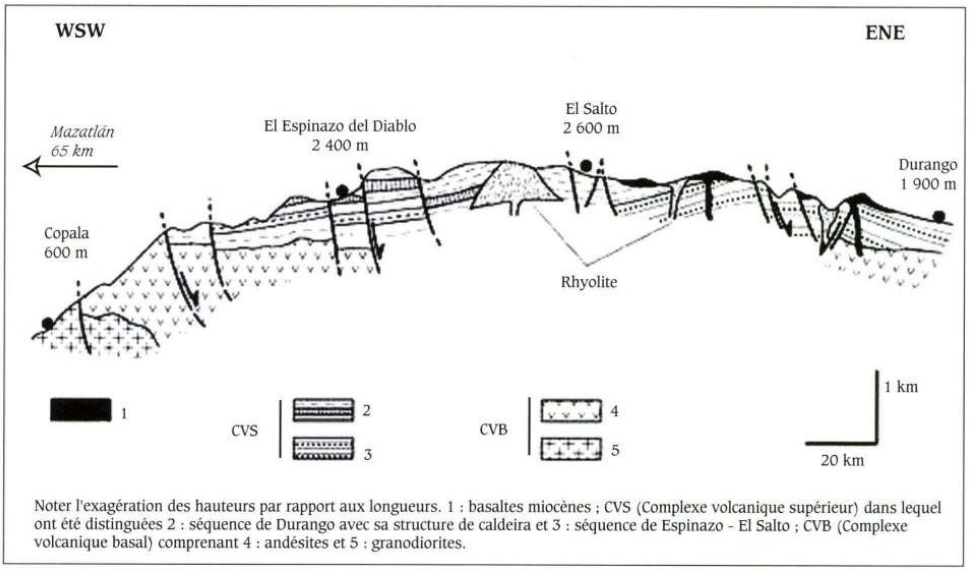


Fig. I – La Sierra Madre occidentale dans les parties ouest et nord-ouest du Mexique et le sud-ouest des États-Unis ; le gris représente le massif montagneux.

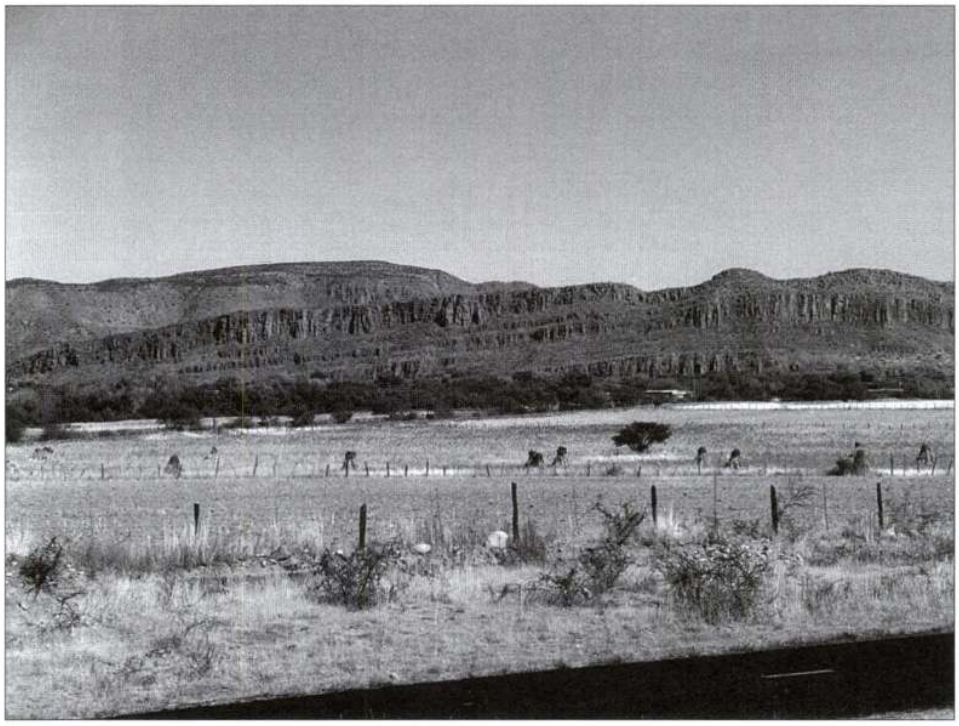
4 *À la suite de ces travaux, complétés depuis par de nombreuses études d'équipes internationales (* RANGIN, *1986,* DEMANT et al., *1989), il est classique de distinguer dans cette sierra (fig. II) :*

- *un complexe volcanique de base, d'épaisseur mal connue, constitué essentiellement d'andésites et de dacites (dans lesquelles sont intercalés quelques niveaux de* ***rhyolites****) recoupées par des corps intrusifs de granodiorites. Les roches volcaniques sont généralement métamorphisées dans le faciès schiste vert et, de plus, hydrothermalisées au contact des intrusifs. Les datations, ainsi que les caractéristiques pétro-géochimiques, indiquent que laves et roches intrusives appartiennent à un même complexe magmatique calco-alcalin, lequel, vers l'ouest,* se *poursuit jusqu'en Basse-Californie. Sa mise en place s'est effectuée, entre 90 Ma (Crétacé supérieur) et 40 Ma (Éocène supérieur) - avec un paroxysme entre 60 et 55 Ma (Paléocène supérieur) - à travers et sur les roches antérieurement déformées du Paléozoïque et du Mésozoïque des parties occidentales du continent mexicain ;*
- *un complexe volcanique supérieur, discordant sur l'ensemble précédent, plus clairement représentatif de la Sierra Madre occidentale. Dépassant 1 000 m d'épaisseur et débutant parfois dès l'Éocène supérieur (40 Ma) par des andésites, il est formé de* ***tufs****, d'ignimbrites de composition rhyodacitique à rhyolitique et de dômes-coulées de rhyolite. Cet ensemble a été généralement mis en place, en contexte de volcanisme explosif (on rapporte la présence de près de 400 anciennes caldeiras associées aux ignimbrites), entre 34 Ma et 20 Ma (Oligocène-Miocène inférieur). Il est à noter que dans la partie nord de la Sierra Madre occidentale, en Sonora, des laves basiques (basaltes et andésites basaltiques), pouvant atteindre 600 m d'épaisseur et datées entre 30 et 20 Ma, sont intercalées dans la séquence acide ;*
- *couronnant l'édifice, des épanchements basaltiques épars et de faible épaisseur, les uns alcalins (12 Ma) liés à la genèse de petits fossés d'effondrements au Miocène, les autres tholéiitiques surmontant des alluvions quaternaires.*



Noter l'exagération des hauteurs par rapport aux longueurs. 1 : basaltes miocènes ; CVS (Complexe volcanique supérieur) dans lequel ont été distinguées 2 : séquence de Durango avec sa structure de caldeira et 3 : séquence de Espinazo - El Salto ; CVB (Complexe volcanique basal) comprenant 4 : andésites et 5 : granodiorites.

Fig. II – Coupe géologique simplifiée de la Sierra Madre occidentale levée le long de la route.



Vue des affleurements de rhyolite de bordure orientale du fossé d'effondrement du bassin du rio Santiago, en rive droite de ce cours d'eau.

5 *La genèse de l'édifice volcanique de la Sierra Madre occidentale est liée à la subduction océan-continent qui a fonctionné, de façon non permanente, depuis le Crétacé supérieur (90 Ma) jusqu'à l'apparition de la tectonique en extension du* Basin and Range.

6 *La subduction était celle de la paléo-plaque océanique Farallon (elle occupait la partie orientale du Pacifique) sous la marge continentale de la plaque Amérique du Nord. Initiée dès le début du Crétacé supérieur, elle a engendré sur la bordure du continent un arc volcanique et plutonique, dont témoigne aujourd'hui le complexe volcanique de base de la Sierra Madre occidentale. Ce*

régime s'est achevé à l'Éocène alors que le Mexique enregistrait les effets de la tectonique laramienne, à l'origine notamment de la Sierra Madre orientale.

7 *L'Éocène est aussi la période durant laquelle ont été enregistrés, d'une part, une réorganisation du mouvement des plaques dans le Pacifique et, d'autre part, un ralentissement de la vitesse de convergence entre les plaques Farallon et Amérique du Nord. Ce ralentissement de la subduction, qui a entraîné une accentuation de l'angle de plongement de la plaque Farallon, a provoqué une distension dans le bord de la plaque continentale supérieure et, par voie de conséquence, a permis l'émission des magmas ignimbritiques caractéristiques du complexe volcanique supérieur de la Sierra Madre occidentale. Ce contexte s'est maintenu jusqu'à ce que, une fois disparue par subduction, la plaque Farallon, s'installe, il y a 20 Ma environ, en même temps que l'extension du* Basin and Range, *la nouvelle frontière de plaque transformante à l'origine de l'actuel système de San Andreas.*

BIBLIOGRAPHIE

Références

BURROWS R. H., 1949 – Geology of .northern México. *Bol. Soc. Geol. Mexicana,* 7 : 85-103.

DEMANT A., COCHENE J-J, DELPRETTTI P., 1989 – Geology and petrology of the tertiary volcanics of the northwestern Sierra Madre occidental, México. *Bulletin de la Société Géologique de France,* série 8, tome V, fascicule 4 : 86-94.

HOVEY E. O., 1907 – A geological reconnaissance in the Western Sierra Madre of the State of Chihuahua, México. *Amer. Mus. Nat. Hist. Bull.,* 23 : 401-442.

KING P. B., 1939 – Geological reconnaissance in northern Sierra Madre occidental of México. *Geol. Soc. of Amer. Bull.,* 50 : 1625-1722.

MCDOWEL F. W., KEISER R. P., 1977 – Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre occidental between Durango City and Mazatlán, México. *Geol. Soc. of Amer. Bull.,* 88 : 1479-1487.

ORDONEZ E., 1900 – *Las riolitas de México.* México Inst. Geol. De México, bol. 15, 76 p.

RANGIN C, 1986 – *Contribution à l'étude géologique du système cordillérain mésozoïque du nord-ouest du Mexique : une coupe de la Basse-Californie centrale à la Sierra Madre occidentale en Sonora.* Société Géologique de France, Mémoire n° 148, 133 p.

SWANSON E. R., MCDOWEL F. W., 1985 – Geology and geochronology of the Tomochic caldera, Chihuahua, México. *Geol. Soc. of Amer. Bull,* 96: 1477-1482.

SWANSON E. R., KEIZER R. P., LYONS J. I., CLABAUGH S. E., 1978 – Tertiary volcanism and caldera development near Durango City, Sierra Madre occidental, México. *Geol. Soc. of Amer. Bull.,* 89 : 1000-1012.

AUTEUR

MARC TARDY

Marc Tardy, professeur de géologie à l'université de Savoie.

Milieu naturel et peuplement dans la Sierra Madre occidentale

Introduction

1 La Sierra Madre occidentale peut-elle être considérée comme le château d'eau du nord-ouest du pays ?

2 Certes, mais tout est relatif et la pluviométrie est la plus importante (cf. fig. 4, p. 26, et fig. 25 p. 151) dans les bassins qui s'écoulent vers le Pacifique, là où le littoral est encore assez arrosé, au sud du tropique du Cancer (23° 27' N). Certaines stations reçoivent de fait plus de 1 500 mm de précipitations annuelles moyennes, et même les stations côtières ne reçoivent pas loin de 1 000 mm localement ; la saison sèche est longue (7-8 mois), ce qui donne à cette plaine littorale des caractères tropicaux secs (cactées, végétation complètement desséchée dès le mois de décembre), mais la pluie est suffisante pour assurer une bonne récolte de maïs, et même localement de canne à sucre, sans irrigation.

3 En revanche, au nord du 26° parallèle nord, la plaine côtière devient de plus en plus aride ; les précipitations ne dépassent pas 270 mm à Topolobampo et on passe ensuite progressivement aux paysages désertiques du Sonora, avec son pendant sur la péninsule californienne, elle aussi aride. De même, sur les plateaux intérieurs de l'altiplano nord-central mexicain, la pluviométrie décroît très vite par rapport à celle de la sierra ; les stations les plus hautes sont au-dessus des isohyètes 800, voire 1 000 mm suivant les altitudes (avec les valeurs les plus faibles au nord, mais celui-ci a aussi des températures plus basses, ce qui fait que l'évapotranspiration y est également plus faible), alors que dans la dépression centrale, la précipitation annuelle est de 400 mm au nord (Chihuahua) et au sud (Zacatecas), mais elle est localement inférieure à 200 mm dans le fond du Bolsón de Mapimí, partie sud du désert de Chihuahua.

4 Dans ces conditions-là, la Sierra Madre, même sans de gros abats d'eau annuels, est bien le château d'eau de tout le Nord-Ouest du pays, et même du Nord-Est. Le rio Conchos, affluent de droite du rio Bravo/Grande, fait nettement remonter le débit du fleuve frontière à leur confluent, et permet d'irriguer les vastes périmètres proches du fleuve, tant du côté mexicain (périmètre de Matamorors, État de Tamaulipas, 220 000 ha), que du côté texan.

5 Les gros barrages-réservoirs (cf. tabl. I, p. 27) témoignent de la relative abondance de l'eau venue de la montagne. On peut dire sans ambages que c'est elle qui constitue de nos jours, le principal trésor de la Sierra Madre.

6 Ce statut de montagne pourvoyeuse en eau sur ces deux flancs, on le retrouve, en Amérique du Sud, aux mêmes latitudes de l'hémisphère opposé. La fameuse « diagonale aride » qui part du littoral vers l'intérieur des terres en montant en latitude et dépend entièrement des Andes pour son approvisionnement en eau, se retrouve, en partie, du nord-ouest du Mexique vers l'intérieur de l'Ouest américain et les dépressions arides des Rocheuses centrales. Là aussi d'immenses barrages (le barrage Hoover et le Glen Canyon dam, sur le Colorado, stockent chacun plus de 30 km^3 d'eau) retiennent l'eau dans le but d'irriguer et de régulariser les débits, et de plus en plus, de pourvoir les grandes agglomérations à forte croissance de cette Sun Belt américaine, qui bat les records mondiaux de consommation d'eau par habitant.

7 En général, les montagnes apportent les ressources en eau nécessaires à l'irrigation sur un seul versant ; les eaux du Haut Atlas marocain, toutefois, arrosent aussi bien le Haouz et le Tadla, côté atlantique, que les oasis du piedmont saharien, avec les importants barrages construits depuis l'indépendance, sur le Ziz et le Draa.

8 L'Indus, les fleuves d'Asie centrale, les deux fleuves qui ont fait la Mésopotamie et le Houang-ho ont été, bien avant les fleuves américains ou nord-africains, exploités pour donner vie aux déserts, et pour permettre l'irrigation dans les zones arides ou semi-arides qui parsèment le pourtour et le centre de l'Asie. C'est du reste dans l'étude de ces anciennes civilisations que Wittfogel a forgé son concept de « société hydraulique », dont la pérennité serait basée sur le « despotisme oriental ». Les grands berceaux de l'agriculture irriguée (Mésopotamie, basse vallée de l'Indus, et bien plus tard, bas Huang-ho et Asie centrale) ont été le point de départ de grandes civilisations, car le contrôle des eaux supposait la mise en place préalable ou simultanée d'un État et d'une police pour faire respecter la gestion de l'eau, condition de survie de la société « hydraulique ». Plus récemment, Sandra POSTEL (1999) a montré, dans une passionnante histoire de l'irrigation, que ces sociétés hydrauliques ont pu être mises à mal, certes, par des déstructurations du système social qui assurait leur survie, mais aussi dans certains cas (Mésopotamie) par des changements climatiques, qui ont pu produire aussi des salinisations des sols accélérées conduisant à une rapide chute des productions agricoles et à la faillite de l'agriculture. Il s'en est suivi un effondrement des sociétés complexes et des villes déjà très peuplées, et finalement, des plus vieilles civilisations de la Planète. Cet auteur insiste beaucoup, du reste, sur l'Égypte, qui est le seul cas où on peut attester de l'existence d'une agriculture irriguée depuis plus de quatre millénaires, alors que les civilisations mésopotamiennes et de la basse vallée de l'Indus, plus anciennes, ont été un jour ou l'autre ruinées par un déséquilibre d'origine politique ou/et naturel. Dans ces deux cas, on a pu, des siècles ou des millénaires plus tard, voir resurgir des systèmes irrigués efficaces à l'origine de villes et de sociétés complexes ayant laissé de grands héritages culturels.

9 Sandra Postel décrit aussi les grandes « civilisations hydrauliques » américaines de la vallée de Tehuacán (dans les actuels États de Puebla et Oaxaca, au sud du Mexique), et du sud-ouest des États-Unis (les cités Pueblos et Hupi). Deux mille ans après celles-ci, les Espagnols ont trouvé en arrivant sur le plateau de l'Anahuac (la vallée de México), Tenochtitlán, la plus grande ville du monde d'alors, peuplée de plus d'un million d'habitants. Celle-ci relevait d'un régime très despotique basé sur le contrôle des eaux des lagunes de Texcoco et de Tenochtitlán. Là, point de cause naturelle à l'effondrement de tout le système économique et social devant quelques centaines de soldats espagnols. Le despotisme des souverains aztèques, s'appuyant sur des sacrifices humains de plus en

plus nombreux et décriés (était-ce une manière de contrôler la croissance démographique dans un espace fini à ressources limitées ?), n'a plus été soutenu par une frange importante de la société au moment où une « unité nationale » aurait été indispensable pour bouter l'envahisseur (GERBER, 1992). Mais les Espagnols avaient une vision prédatrice de la colonisation ; la situation actuelle où semble perdurer une économie « minière » est peut-être un héritage de ce que BRUNHES (1910, repris en 1947) nommait « rapt économique ».

10 Le sud du Mexique a conservé ses « sociétés hydrauliques » en dépit de la déstructuration politique et sociétale imposée par les conquistadores ; l'irrigation est pratiquée depuis trois millénaires, dans les vallées de Tehuacán, de l'Anahuac (États de México et Hidalgo), dans l'État de Michoacán ou encore celui de Guerrero.

11 L'eau est certes un déterminant essentiel pour l'apparition de nombreuses sociétés, a *fortiori* dans les zones d'excès ou de pénurie d'eau caractérisés. Mais dans une grande partie des montagnes tropicales, la fertilité des sols est un autre élément déterminant. En effet, après les « civilisations de l'eau » qui ont fleuri dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate, du Nil ou encore de l'Indus, certaines zones de montagne ont été des foyers d'occupation importants conduisant à de véritables cultures nouvelles, complètement adaptées à la montagne ; dans beaucoup de régions tropicales, les montagnes (comme autrefois autour du bassin méditerranéen) sont plus faciles à mettre en valeur que des zones côtières rendues inhospitalières par le climat et le contexte paludéen.

12 Une autre caractéristique mise en évidence par POULENARD ef *al.* (2003) est la localisation des sols très riches et fertiles constitués sur les cendres volcaniques ; la plupart de ces sols sont des andosols qui sont fragiles et très sensibles à l'érosion éolienne et hydrique. Ils ne couvrent que 1 % du total de la surface des terres émergées du globe, mais ils hébergent 10 % du total de sa population. En effet, l'Indonésie, les Philippines, les régions les plus peuplées d'Afrique tropicale (Rwanda, Burundi, une partie de l'Éthiopie) et de l'Amérique tropicale (Andes péruviennes, équatoriennes et colombiennes, et toute la chaîne volcanique centro-américaine, de l'ouest du Panama au sud-ouest du Mexique), possèdent de tels sols et ont pu devenir berceaux de civilisations. On pense bien sûr à l'île de Java de même qu'à Bali, à l'Éthiopie, à l'Empire inca et aux Empires mexicains (la vallée de Tehuacán et sa culture mixtèque, zone montagneuse de l'Empire maya, le Chiapas et le Guatemala actuels). Ces andosols sont du reste l'objet de l'étude hydrologique, commencée en 2002, dans le site de la haute vallée du Cutzamala (cf. « Eau et espace à Valle de Bravo. La bataille pour l'eau », p. 283).

13 La Sierra Madre est tout le contraire de ces berceaux de civilisations. Les ethnies et sociétés amérindiennes sont semi-nomades et d'implantation relativement récente (quelques siècles) dans un milieu où ni l'abondance ni la rareté de l'eau n'obligent à contrôler strictement la ressource et où les sols sont issus de terrains volcaniques bien plus anciens, qui n'apportent pas les bienfaits des sols sur cendres récentes. Du reste, marginalisées et isolées dans les montagnes, ces populations (Huicholes, Tepehuanes, Tarahumaras et Yaquis, du sud vers le nord) n'ont jamais été très nombreuses. Leur occupation de l'espace étant assez lâche et leur marginalisation ayant perduré jusqu'à nos jours malgré l'œuvre constructive, mais prématurément interrompue des Jésuites, on peut avancer que la colonisation de la Sierra Madre à partir de la fin du XIX^{e} siècle s'est effectuée sur une « frontière » à conquérir, comme ce fut le cas de l'autre côté de la frontière avec les États-Unis. Le nord du Mexique, aussi bien dans la montagne que dans

le désert de Chihuahua, n'a été mis en valeur à grande échelle que récemment ; il constitue à ce titre, comme l'Ouest américain ou canadien, un « pays neuf ».

14 Dans un tel contexte, il était presque naturel, pour un pays à forte croissance démographique, où la récente Révolution avait mis en évidence une véritable « faim de terres » de la part d'une paysannerie nombreuse et pauvre, de lancer une politique volontariste de colonisation de nouvelles terres. Cette politique s'est accompagnée, dès la Réforme agraire, dans les années 1936-1940, de la construction ou la mise en chantier de grands barrages-réservoirs destinés à irriguer de nouveaux périmètres et à permettre l'installation de petits paysans regroupés en *ejidos.*

15 Reste à définir la montagne « Sierra Madre » par rapport à sa perception dans le contexte nord-mexicain ; on est loin de montagnes d'Europe qui ont pu paraître « répulsives » suivant les époques. « La montagne était perçue comme horrible au Moyen Âge par exemple. On opposait alors souvent les "plaines délicieuses" et les montagnes "horribles et dangereuses" et ce jusqu'au XVIII^e^ siècle (voire au XIX^e^) » ... « Quant aux habitants de ces contrées, ils sont souvent perçus comme barbares, voleurs, voire crétins ou affligés de maladies endémiques liées à ce milieu hostile (par exemple, le goitre que De Saussure attribue à la "chaleur et à la stagnation de l'air" au fond de certaines vallées) » ... « Pour certains il existe même une gradation de la barbarie avec l'altitude » (VERNEX, 2001).

16 De nos jours bien sûr en Europe, en Amérique du Nord, en Asie orientale, les montagnes sont des zones de loisir, de recueillement, l'air y est pur et les sociétés développées y trouvent les aires de récréation qu'elles affectionnent. Dès le milieu du XIX^e^ siècle, « le milieu montagnard sera plus fréquenté, sera perçu comme un "riche potentiel naturel pour l'industrie et s'y développeront de nouvelles sensibilités dans la relation de l'homme à la nature. Image plus positive qui fait passer l'aménageur pour un héros »... « la montagne devient alors paysage touristique, elle s'intègre au territoire, elle devient le lieu de nouvelles expériences ». « L'image d'une montagne hygiénique et revivifiante fera progressivement passer du stéréotype du goitreux à celui de l'enfant "aux belles joues roses" » ; enfin, « La montagne est un "château d'eau" dans la mesure où, la température diminuant avec l'altitude, le point de saturation s'abaisse » (VERNEX, 2001).

17 Et là, on rejoint la perception de la Sierra Madre au nord du Mexique, qui est passée sans transition d'un espace non pas répulsif, mais vide par absence de colonisation, à une zone relativement attractive du fait de la meilleure qualité de ses pâturages, mais trop éloignée des villes pour devenir une zone de loisir. Cette montagne est d'ailleurs jugée peu sûre par les Mexicains des villes. Il est vrai qu'il y subsiste des zones de non-droit, et elle est considérée comme une des plus grandes zones de production de marijuana au monde.

18 Et surtout, elle est perçue comme la zone où l'eau et la forêt sont inépuisables. Il est vrai que la forêt est très étendue, mais il a suffi de trente années d'exploitation pour la réduire de moitié ; et en cinquante années d'exploitation des eaux de surface, les ressources ont été très fortement sacrifiées. Toutes les ressources renouvelables sont, de nos jours, exploitées dans l'ensemble de la chaîne. Dans de nombreux cas, comme dans le périmètre de la Laguna, sur le bas río Nazas, la nappe est surexploitée depuis plus de cinquante ans : des volumes trois à cinq fois supérieurs à la recharge naturelle y sont pompés suivant les années, entraînant une baisse de la nappe de 1,75 m par an en moyenne.

19 Cette première partie, où l'on aborde les relations entre l'Homme et son milieu, repose sur un thème éminemment géographique s'il en est, puisque le paysage est à un moment le résultat du modelage par l'Homme d'un milieu au départ « naturel ».

20 La perspective historique de la gestion des ressources en eau (cf. « Les ressources en eau dans le centre-nord du Mexique. Perspective historique », p. 49) est évidemment à la base de la situation actuelle, et nous permet de mieux comprendre le contexte ayant pu conduire à l'exploitation des ressources de la Sierra Madre. La pression démographique est loin de poser un problème comme dans la plupart des pays du Sud, puisqu'à l'inverse on assiste à une vaste déprise qui est étudiée par Béatrice Inard Lombard dans « Une montagne en voie d'abandon ? » (cf. p. 65). Elle introduit l'aspect humain au moment où l'on s'aperçoit que la montagne se vide très rapidement. La position démographique de cette région est comparée à celle de deux autres espaces agro-pastoraux (cf. encadré 3 « Un contexte démographique et économique de transition. Démographie comparée de la Sierra Madre avec celle de deux autres régions agro-pastorales », p. 83). Bien que peu colonisée jusqu'à la fin du XIX^e^ siècle, cette sierra n'en comporte pas moins des traces d'occupation ancienne (cf. « Le projet *Hervideros.* Un regard sur le passé préhispanique de la Sierra Madre occidentale du Durango, Mexique », p. 93. Cette partie se termine par la notion d'indianité (cf. encadré 4 « L'indianité et l'indigénisme au Mexique et dans la Sierra Madre occidentale », p. 115) qui n'est pas toujours très précise au Mexique comme dans le reste de l'Amérique.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BRUNHES J., 1947 – *La géographie humaine.* Paris, PUF, édition abrégée, 353 p.

GERBER A., 1992 – *Le jade et l'obsidienne.* Paris, Éd. Robert Laffont, 391 p.

POSTEL S., 1999 – *Pillar of Sand.* New York, Norton Worldwatch Books, 352 p.

POULENARD J., DESCROIX L, PODWOJEWSKI P., 2003 – Érosion des sols en montagne et activités humaines : conquête, surexploitation et déprise agricole (Andes septentrionales, Sierra Madre occidentale, Préalpes du Sud). Séminaire CARRTEL de la Station d'hydrobiologie lacustre (SHL) de Thonon-les-Bains, 24/6/2003.

VERNEX J., 2001 – *Introduction à la géographie.* Cours de l'université de Genève, Sciences Politiques et Relations Internationales.

WITTFOGEL K.A., 1981 [1957] – *Oriental despotism. A Comparative Study of Total Power.* New York, Vintage Books/Random House.

WITTFOGEL K.A., 1974. *Le despotisme oriental, étude comparative du pouvoir total.* Paris, éditions de Minuit.

Les ressources en eau dans le centre-nord du Mexique

Perspective historique

David Viramontes

---

1 Le centre-nord du Mexique est un territoire vaste où les habitants ont dû s'adapter à un contexte environnemental souvent difficile. La mise en perspective historique présentée ici montre comment les sociétés se sont disputées l'approvisionnement en ressources naturelles à tel point qu'aujourd'hui il existe une situation critique de surexploitation et de possible épuisement des ressources hydriques.

Une faible population et un vaste espace dans un contexte environnemental souvent difficile

2 Il existe peu de connaissances sur les premiers habitants du centre-nord du Mexique. Les populations indiennes méso-américaines qui peuplaient ce territoire du Nord avant l'arrivée des Espagnols étaient constituées de plusieurs groupes différents de Chichimèques (hommes-chiens) connus pour leur hostilité et férocité. Selon les écrits des Espagnols des XVI^e^ et XVII^e^ siècles, il s'agissait de plusieurs tribus de petite taille, dispersées, nomades, et barbares.

3 Étant donné le contexte d'aridité de presque tout le territoire, ces tribus nomades suivaient des chemins spécifiques en accord avec la disposition des ressources naturelles comme le long des rivières où ils pêchaient, chassaient et collectaient (HERNANDEZ, 1975 ; BARBOT et PUNZO, 1997). En effet, la vaste superficie du territoire pouvait faire vivre ces populations sans risque apparent de catastrophe écologique.

4 Les ruines de la ville de Paquimé à Casas Grandes Chihuahua est l'exception d'une forme de civilisation urbaine dans le centre-nord du Mexique.

5 Cette civilisation a disparu après un grand incendie en 1340 bien avant l'arrivée des Espagnols.

La colonisation, les luttes indiennes et l'établissement de la propriété privée et des grandes latifundia

6 Les trois siècles de domination espagnole ont été caractérisés par l'exploitation indienne et la concentration de terres et de ressources naturelles par les colons.

7 Comme conséquences de la conquête espagnole, les habitants du territoire mexicain ont dû souffrir de grands changements dans leur manière de vivre. Afin de peupler ce vaste territoire, la couronne espagnole donnait des terres à ses soldats et aventuriers nobles. Les systèmes d'appropriation de l'espace appelés la ***encomienda*** et le ***repartimiento*** permettaient aux colons de prendre des terres, des ressources naturelles et des Indiens pour leur service mais ils étaient obligés également d'enseigner la doctrine chrétienne. En effet, ce système a établi l'esclavage des Indiens par les colons.

8 L'absence d'un système économique national intégrateur a provoqué, pendant la colonie, le développement des haciendas ou **latifundia** sous forme d'unités de production périphériques aux économies régionales, et qui dépendaient politiquement du pouvoir central d'Espagne. Comme résultat de cette appropriation du territoire, à la fin du XVII^e^ siècle plus de la moitié des terres de culture et pâturage du Mexique étaient propriété des Espagnols. Simultanément lors de l'établissement de ces grandes propriétés, ont subsisté des zones habitées exclusivement par des populations **indigènes** avec différentes formes de mise en valeur collective.

9 Durant le XVII^e^ siècle la découverte des ressources minières des régions lointaines a attiré l'attention des colons. Cependant, le nord du Mexique avec une faible population indienne dispersée et « sauvage » ne pouvait pas être soumis aux conquérants. Depuis le début de la colonie, les attaques des Indiens « barbares » ont limité l'expansion démographique et l'extension des zones d'élevage (HARRIS, 1975 ; BARRAL, 1988 ; BARRAL et HERNANDEZ, 1992). On ne s'étonne pas de savoir que se soient déroulées (pendant des siècles) ici, et non dans les zones de grandes civilisations indiennes, les plus grandes batailles pour la colonisation (HERS, 1993).

10 Comme conséquence, presque toutes les sociétés indiennes originaires de cette région ont disparu pendant les premiers siècles de la colonie espagnole. Selon HERNANDEZ (1975), les différentes tribus de nomades qui habitaient La Laguna ont été exterminées pendant la période coloniale du fait des massacres organisés par les colons, des maladies et de la misère. Il n'existe plus de traces de ces tribus dans la population de cette zone. Les apports indiens dans la population actuelle sont la conséquence des vagues de migrations postérieures.

11 Du XVII^e^ siècle au début du XX^e^, les luttes pour la possession des eaux de rivières entre les colons et les Indiens sont décrites dans quelques documents. En 1842, les colons de Matamoros ont subi l'attaque des Apaches et des Comanches, lesquels venaient des États-Unis où ils étaient persécutés. En 1850, pendant la construction des premiers barrages du río Nazas, HERNANDEZ (1975) décrit l'édification d'une tour de surveillance contre les attaques des Indiens. Cette tour est en fait à l'origine du Rancho de Torreón et actuellement de la ville de Torreón, dans l'État de Coahuila.

12 Ainsi, à la différence du sud et du centre du Mexique où les grandes civilisations (Olmèque, Maya, Aztèque) ont bien marqué le paysage, l'histoire du nord du pays ressemble plus à celle de l'ouest des États-Unis. L'utilisation de l'espace par l'homme pour

des activités différentes de celles des groupes de chasseurs-cueilleurs n'a que quelques centaines d'années. En effet, les activités humaines actuelles n'ont débuté que durant la période coloniale, associées en général aux activités minières.

L'indépendance et les guerres contre l'invasion étrangère

13 Après la période coloniale, le Mexique a dû mener plusieurs guerres pour soutenir son autonomie : la guerre d'indépendance contre la couronne espagnole (1810-1821), la guerre contre les États-Unis (1845-1848), l'intervention française (1862-1867), en plus de guerres civiles entre les différents partis politiques et les révoltes indiennes. Le résultat de cette période a été la perte de la moitié du territoire (pris par les États-Unis), l'endettement, et la crise économique. D'après Coatsworth (1976) cité par KROEBER (1994), le Mexique avait deux problèmes de base : un réseau faible et peu efficace de transport et une mauvaise organisation économique. De ce fait et de par la faible population du nord du Mexique, les ressources naturelles ont été peu affectées.

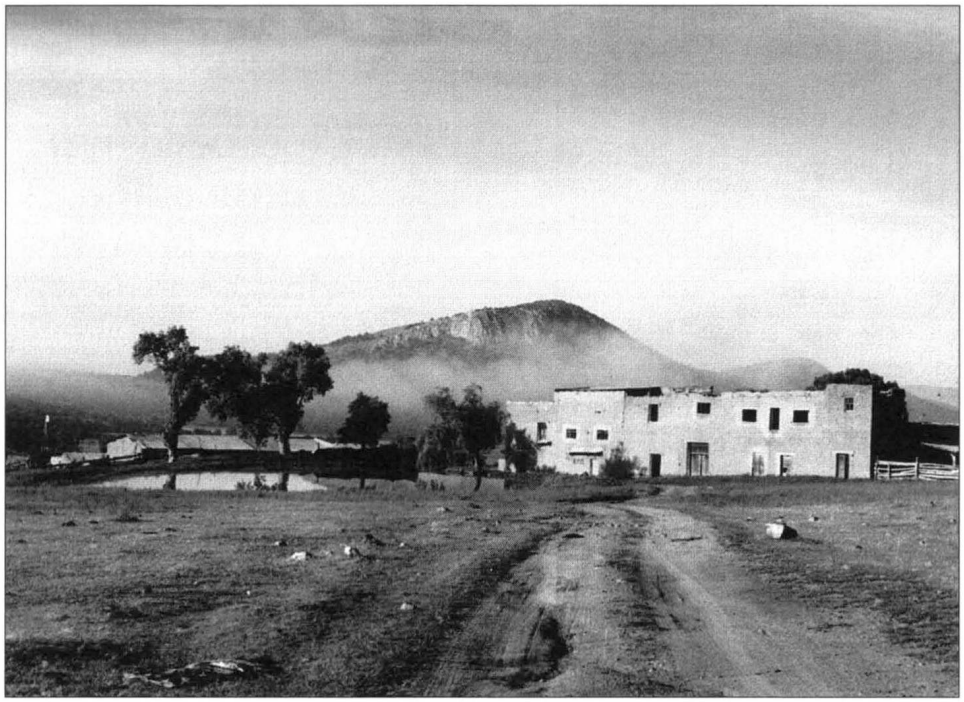
14 Néanmoins, entre les XVII^{e} et XIX^{e} siècles, quelques barrages en maçonnerie ont été construits dans les États du centre du Pays (Pabellón, Saucillo, San Blas, El Aguacate, y Loza de Padres entre autres). Tous ces barrages étaient destinés à l'irrigation.

Le régime de Porfirio Díaz. La réactivation économique du pays et le profit des grandes latifundia

15 Sous le gouvernement de Porfirio Díaz (fin du XIX^{e} et début du XX^{e} siècles), la construction des chemins de fer, l'ouverture de ports, la nouvelle politique d'intégration économique, et l'encouragement aux exportations ont créé les conditions pour le développement d'un nouveau marché dynamique, orienté aussi bien vers la consommation interne que vers l'exportation.

16 La politique hydraulique du Président Díaz a encouragé l'irrigation en donnant la préférence aux grands investisseurs capitalistes. En revanche, les petits producteurs agricoles et communautés paysannes n'étaient pas pris en compte dans ce système de développement (KROEBER, 1994). Les haciendas ainsi que les entreprises minières, pétrolières et forestières ont su profiter des facilités du gouvernement pour augmenter leur production et leur profit économique. Cependant, le résultat social de cette politique a été la misère, les maladies et l'esclavage des paysans dans la production des haciendas.

17 Pendant cette période, on observe pour la première fois que certains sites présentent des problèmes de surexploitations de ressources naturelles. Selon EZCURRA et MONTANA (1988) et SIMON (1998), la charge de bétail sur les prairies proches des zones habitées du centre du Mexique est devenue un problème généralisé. Néanmoins, dans le nord, l'élevage extensif n'existe pas loin des villes à cause de la peur des Indiens « sauvages ».



L'hacienda El Ojito, près de La Ciénega de Escobar, n'a été expropriée qu'en 1973, car elle appartenait au général Aguirre, ami de Pancho Villa.

La Révolution mexicaine et la période postrévolutionnaire

18 La Révolution mexicaine du début du XX^e^ siècle a provoqué, de ce fait, une sensible diminution des charges animales et une restauration relative des prairies endommagées. La réoccupation postérieure de ces parcours, faite avec des systèmes d'exploitation à très faible technicité et avec des critères d'« extraction minière », a débouché sur la situation actuelle de dégradation des ressources et de basse productivité.

19 Durant le gouvernement de Cárdenas (1934-1940), l'exploitation collective agricole a trouvé son institutionnalisation et sa reconnaissance légale sous la forme de ***comunidades***, et *ejidos.* Ces derniers ont été créés à la suite des expropriations des grosses haciendas. La politique officielle du Président Cárdenas a été d'orienter le développement de préférence vers les zones agricoles du pays : c'est le moment de la construction du barrage Lázaro Cárdenas (du nom même du Président), qui sera achevé sous Miguel Alemán en 1946, et donc de l'extension du périmètre irrigué de La Laguna. Le manque de crédits et la nécessité de concentrer les efforts sur les zones les plus peuplées et de production plus intensive, ont fait que les zones éloignées sans irrigation du nord du Mexique sont restées relativement moins prioritaires. En effet, il existe à ce jour dans le nord du Mexique des zones d'irrigation à haute technicité (dont La Laguna fait partie) et des zones beaucoup plus vastes sans irrigation qui gardent les mêmes systèmes traditionnels de production (l'élevage extensif partout, et des cultures sous pluie là où le climat le permet).

20 De cette façon, dans la Sierra Madre occidentale et particulièrement dans le haut bassin du Nazas, se sont créés des ***ejidos*** entre 1948 et 1970. La nouvelle forme de production communautaire a encouragé la population à développer la production dans l'optique

d'utiliser les espèces plus commerciales et d'augmenter la quantité de bétail. Chacun des ***ejidatarios*** a constitué son troupeau qui assurait un certain niveau de vie et qui lui donnait un statut social. De cette façon, l'élevage des chèvres et des moutons, moins intéressant du point de vue commercial, a diminué, et au contraire la quantité de vaches a beaucoup augmenté.

21 Par ailleurs, pendant le XX^{e} siècle la construction des grands barrages pour l'irrigation a été la forme d'adaptation aux besoins alimentaires de la population mexicaine. En 1926, fut créée la Commission nationale d'irrigation qui en vingt ans d'existence, a construit 136 barrages avec une capacité globale de 11 km^{3} d'eau. Cela a permis l'ouverture de grandes zones d'irrigation représentant un million d'hectares irrigables. Par ailleurs, la Commission fédérale d'électricité fondée en 1937 a construit plus de trente grands barrages qui y ajoutent une capacité de stockage de 50 km^{3}. De nos jours, la construction de nouveaux barrages se poursuit. Actuellement, le Mexique a un potentiel d'irrigation de près de sept millions d'hectares (OLIVA, 1999 ; VEGA ARGUELLES, 1999).

L'époque actuelle : une population en pleine expansion et une désertification des campagnes

22 Actuellement, le Mexique fait face à une contrainte démographique. En effet, la population mexicaine a connu une forte croissance : de 26 millions d'habitants en 1940, elle est passée à 67 millions en 1975 et plus de 100 millions de nos jours. Aujourd'hui encore, il y a un fort taux d'accroissement démographique qui atteint les 2 % par an.

23 À ces problèmes uniquement quantitatifs s'ajoutent les problèmes de croissance démesurée des principales villes du pays. Alors que les campagnes se désertifient, les besoins alimentaires des populations urbaines s'accroissent fortement. En effet, México, la capitale du pays, avec ses vingt millions d'habitants est l'une des villes les plus peuplées du monde. Dans le centre-nord du pays, la zone urbaine de La Laguna est passée d'environ 600 000 habitants en 1960 à 1 100 000 habitants en 1990 (SANTIBANEZ, 1992). Il est donc facile de deviner les problèmes qu'une telle augmentation laisse présager.

24 Mais si les villes croissent sans ou avec très peu de contrôle, la campagne, elle, se vide. Dans le cas de la sierra, la population a augmenté jusqu'aux années 1970-1980 puis elle a commencé à décroître, malgré un taux de natalité élevé. En effet, une très forte proportion de jeunes a choisi de partir, le plus souvent aux États-Unis. La plupart d'entre eux ne reviennent plus, ou bien, seulement pour les vacances. De ce fait, la population de la zone diminue sensiblement. Dans le tableau II nous observons une diminution de la population des quatre municipalités de la zone d'étude. La diminution de la population des *ejidos* est très rapide. Bien que nous n'ayons pas de statistiques précises, nous avons appris sur le terrain qu'il y a eu une diminution de plus de 100 % du nombre de professeurs d'écoles élémentaires à cause du manque d'élèves entre 1985 et 1998 dans les quatre communautés étudiées. De plus, dans ces quatre *ejidos* de la zone expérimentale du projet In if ap-IRD, plus de la moitié des foyers étaient déjà vides en 2000 (INARD LOMBARD et DESCROIX, 2003).

Tabl. II – Évolution de la population des quatre municipalités du bassin du haut-Nazas.

Municipalité	1980	1990	1995	2000
El Oro	18 461	14 815	13 516	12 247
Guanaceví	12 821	11 925	11 447	10 794
San Bernardo	7 563	5 629	4 883	4 147
Tepehuanes	14 740	14 942	13 588	12 937
Total	**53 585**	**47 311**	**43 434**	**40 125**

Source : INEGI, 1990, 1998 et 2000.

Tabl. III – Nombre de têtes de bétail dans l'État de Durango et les municipalités du bassin du haut-Nazas.

Municipalité	1970	1990	2000
État de Durango	1 037 857	1 102 045	1 429 965
Guanaceví	39 035	29 663	58 400
Tepehuanes	23 818	28 247	37 050
Santiago Papasquiaro	64 699	69 971	61 751
San Bernardo	28 002	25 710	41 984
El Oro	82 250	51 082	61 345

Source : INEGI, 1970, 1990 et 2001.

25 Cependant, la migration des gens n'arrête pas la production. Le tableau III montre l'évolution du nombre de têtes de bétail dans l'État de Durango et les municipalités de la zone d'étude. Entre 1970, 1990 et 2000 le nombre de têtes de bétail dans l'État de Durango a augmenté. Parmi les municipalités de la sierra, Guanacevi, Tepehuanes et San Bernardo ont vu augmenter leur cheptel de manière significative, par contre les municipalités d'El Oro et Santiago Papasquiaro ont vu diminuer la charge de bétail.

26 La politique actuelle du gouvernement motivée par le désir d'augmenter la production et de promouvoir le système capitaliste incite au départ des paysans vers les villes mexicaines ou dans la plupart des cas, vers les États-Unis. Néanmoins, les habitants qui restent dans les communautés reçoivent une aide économique de ceux qui sont partis. Ils gardent leurs troupeaux, qui sont, pour ainsi dire, subventionnés par leurs familles depuis le Texas, le Nevada, la Californie ou l'Illinois (principales destinations des migrants).

La politique agricole actuelle

27 À partir du début des années quatre-vingt, le gouvernement mexicain a engagé un programme de réformes structurelles très profondes de son économie. Désengagement de l'État, ouverture large des frontières (Aléna) et recours à l'action régulatrice de la

concurrence ont un impact certain sur le secteur agricole et le monde rural dans son ensemble.

28 Schématiquement, le projet de « modernisation » de l'agriculture promeut l'efficacité du secteur capitaliste. Les textes réglementaires de référence sont la Réforme agraire de 1992, la loi sur les eaux nationales de 1992 et les lois des eaux et d'écologie des différents États ainsi que les normes des municipalités. La réforme agraire a permis la formation des entreprises agricoles qui ont acheté les terres des *ejidos.* L'accès à la propriété est, selon les économistes, propice à encourager les initiatives constructives et la production.

29 Cependant, ces derniers changements socio-politiques au niveau national n'ont pas modifié la forme d'exploitation « minière » qui utilise l'espace jusqu'à l'épuisement des ressources. La politique agricole actuelle encourage la production, mais elle montre peu d'intérêt pour la pérennisation de l'exploitation.

30 Dans la Sierra Madre occidentale le paysage est actuellement coupé par les barbelés des parcelles individuelles. Les *ejidatarios* ne se pensent plus comme une communauté ; ils prennent leur part des zones de pâturage et des forêts en fonction de la loi du plus fort (plus on a de bétail et plus on prend de l'espace). Si on considère qu'il s'agit d'une forme d'exploitation extensive, le morcellement de terres et la demande de bétail posent de nouveaux problèmes et entraînent une pression encore plus forte sur les ressources naturelles et hydriques.

31 L'actuel gouvernement du Président Fox a lancé une initiative appelée « La croisade pour l'eau et la forêt ». L'objectif est d'arriver à une forme d'exploitation durable qui permette de soutenir la production forestière et l'usage des ressources hydriques dans leur ensemble. Dans cette logique, on a créé la Commission nationale forestière (Conafor) laquelle, avec la Commission nationale de l'eau (CNA), pourrait prendre en main et résoudre les problèmes graves de surexploitation des ressources du pays. Cependant, la logique économique productiviste reste la même. On considère peu les aspects sociaux et moins encore les conséquences de l'environnement dans son ensemble.

32 Dans les conditions du système économique actuel, la surexploitation des ressources naturelles est une caractéristique « normale » de survie de la population et des entreprises. Reste à savoir si la technologie et le nouvel ordre qui s'installent pourront faire face à l'augmentation continue des besoins en ressources naturelles. Dans ce contexte la prospection future des ressources en eau dans le centre-nord du Mexique est donc une priorité.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BARBOT Ch., PUNZO J.L., 1997 – Antiguos caminos en el noroeste durangueno. Supervivencia de una tradition prehispánica. *Trace* n° 31 : 22-34.

BARRAL H., 1988 – « El hombre y su impacto en los ecosistemas a través del ganado ». *In* Montana C. (ed.) : *Estudio integrado de los recursos vegetaciân, suelo y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimi. Ambiente natural y humano,* México, D.F. Instituto de Ecologia de México-MAB : 241-261.

BARRAL H., HERNANDEZ L., 1992 – « Reseña del poblamiento y de la ganaderia en el Bolsôn de Mapimi ». *In* Delhoume et Maury (ed.) : *Actas del Seminario Mapimi.* Instituto de Ecologia A.C.-Orstom-Cemca, México, D.F. : 257-269.

EZCURRA E., MONTAÑA C, 1988 – « La evolution del uso de los recursos renovables en el norte arido de México ». *In* Montana C. (ed.) : *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimi. Ambiente natural y humano,* México, D.F. Instituto de Ecologia de México-MAB : 269-277.

HARRIS III C.H., 1975 – *A Mexican family empire. The latifundio qf Sanchez Navarro, 1765-1867.* Texas, University of Texas Press, 234 p.

HERNANDEZ A.P., *1975 – ¿ La exploración colectiva en la Comarca Lagunera es un fracaso ?* México, B. Costa-Amic Editor, 353 p.

HERS M.A., 1993 - Investigaciones arqueológicas en Hervideros, Durango : primeros avances. *Transición* n° 13 : 4-12.

INARD-LOMBARD B., DESCROIX L., 2003 – Du village à Chicago : la migration des paysans de la Sierra Madre occidentale dans l'Illinois. *Bulletin de la Société neuchâteloise de géographie,* 47 : 23-46.

INEGI, Instituto National de Estadistica Geografia e Informática, 1970 – *VII Censo General de población y vivienda.* México, D.F.

INEGI, Instituto National de Estadistica Geografia e Informática, 1990 – *XI Censo General de poblaciôn y vivienda.* México, D.F.

INEGI, Instituto National de Estadistica Geografia e Informática, 1998 – *Anuario estadistico del Estado de Durango.* Gobierno del Estado de Durango. Aguascalientes, México.

INEGI, Instituto National de Estadistica Geografia e Informática, 2000 – *XII Censo General de poblaciôn y vivienda.* México, D.F.

INEGI, Instituto National de Estadistica Geografia e Informática, 2001 – *Anuario estadistico del Estado de Durango.* Gobierno del Estado de Durango. Aguascalientes, México.

KROEBER CLIFTON B., 1994 – *El hombre, la tierra y el agua. Las políticas en torno a la irrigación en la agricultura de México, 1885-1911.* México, IMTA-Ciesas, 274 p.

OLIVA C, 1999 – « Estado actual de las presas. Breve reseña histórica ». *In : El desarrollo de las presas en México-Avances en Hidrdulica 5 :* 33-37.

SANTIBANEZ E., 1992 – *Ensayo mono-gráfico de La Laguna.* Monografía publicada a cuenta del autor. México, Torreón, Coah., 240 p.

SIMON J., 1998 – *México en riesgo.* México, D.F., primera edición, éd. Diana, 302 p.

VEGA ARGUELLES O., 1999 – « El desarrollo de las presas en México ». *In : El desarrollo de las presas en México – Avances en Hidrdulica* 5 : 167-178.

AUTEUR

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

Encadré 2. Propriété privée et publique, gestion collective

Quelle politique patrimoniale ?

Luc Descroix

---

1 *Au fil des réflexions sur les causes du surpâturage que l'on observe un peu partout dans la Sierra Madre, et du reste dans presque tout le Nord-Mexique, on voit en filigrane se dessiner le changement de régime de propriété induit par l'abrogation, en 1992, de l'article 27 de la Constitution mexicaine, article qui instaurait la réforme agraire en 1936. Si cette abrogation était une condition* sine qua non *imposée par les Américains pour l'adhésion du Mexique à l'Alliance nord-américaine de libre-échange (Aléna), il faut aussi y voir un commencement d'adhésion d'une grande partie des responsables politiques et des techniciens du domaine rural à la « pensée unique »* que *représente le « consensus de Washington », cette espèce d'idéologie divulguée par l'ensemble de la presse mondiale qui veut que tout doit être à terme privatisé pour assurer un meilleur bien-être des populations. Il n'est pas lieu ici de dire si le libéralisme fait ou non dérailler les trains, provoque ou non des coupures de courant aux États-Unis, fait disparaître ou non, d'un coup de baguette magique, les classes moyennes de tel pays d'Amérique latine, ou entraîne ou non la mort de x milliers d'enfants chaque jour du fait de malnutrition.*

2 *Durant la dernière décennie au Mexique, le PRI (le Parti révolutionnaire institutionnel, au pouvoir de 1929 à 2000) a nettement changé de mentalité politique et s'est peu à peu rallié au néo-libéralisme.*

3 *Perçue par les élites politiques et en partie par les intellectuels comme un bienfait, cette libéralisation a déjà eu des conséquences sociales telles que la disparition progressive de la Sécurité sociale et l'arrêt des aides au paysan. Elle a accéléré la marginalisation des gens qui ne survivaient que dans une économie informelle (la moitié des Mexicains ?). Elle a appauvri les autres qui gardent la Sécurité sociale mais voient leurs salaires augmenter moins vite que l'inflation afin que le Mexique conserve ses « avantages comparatifs ». Elle a enrichi considérablement les élites économiques, au point de faire du Mexique le troisième pays au monde par son nombre de milliardaires (après les États-Unis et l'Arabie Saoudite). Le Mexique est, plus que jamais, un pays riche peuplé de gens pauvres.*

4 *Alors en quoi le régime de propriété peut-il influencer la conservation des ressources naturelles? On rejoint là les débats sur la fameuse « théorie de Hardin » concernant la « tragédie des communaux » (HARDIN, 1968).*

5 *En effet, en dehors du monde maintenant dit « occidental », la propriété privée était encore l'exception au début du XX^e siècle. « La colonisation au XIX^e siècle a introduit en Afrique le droit écrit, qui s'est surimposé aux pratiques coutumières. Dans les années 1930, considérées à tort comme vacantes et sans maître, les terres ont fait l'objet de textes instituant des divisions de l'espace souvent établies sans faire grand cas des pratiques existantes. Le foncier forestier est devenu foncier de l'État. Le droit du développement des années 1960 visait tout simplement à adopter un droit moderne, inspiré du modèle occidental, auquel les sociétés devaient s'adapter. La coutume devait disparaître si elle entravait l'État de droit. Ainsi les communautés indigènes tribales et montagnardes du sous-continent indien (SARIN, 1995) et les communautés rurales d'Afrique (en particulier, francophones) se sont vues privées de leurs prérogatives de gestion collective des ressources de l'espace forestier au profit, dans un premier temps, de l'État colonial, puis de l'État indépendant. Cette aliénation a entraîné des conflits qui persistent encore aujourd'hui dans certaines régions et très souvent aussi une destruction des forêts compte tenu de l'incapacité de l'administration à faire respecter ces nouveaux droits. Cet échec met en avant le foncier comme source du problème et espérons-le comme source de solution. La vision juridique a profondément été renouvelée. La régulation par le seul État a montré son insuffisance. On parle aujourd'hui de multijuridisme pour "traduire le fait que chaque individu est partie prenante, dans sa vie familiale, professionnelle ou publique, de multiples groupes dont les règles, règlements, habitudes ou habitus s'imposent à lui de manière plus ou moins concurrentielle" (LE ROY, 1993) ». Mais le biologiste HARDIN (1968) a voulu montrer que la propriété et la gestion collective conduisaient à la déperdition des biens collectifs (forêt, pâturages, etc.) : « En l'absence de règles et de contrôle de l'accès, c'est-à-dire lorsque l'accès est libre, les ressources subissent une surexploitation qui entraîne leur dégradation, voire leur disparition. Cette dynamique de l'accès libre est connue sous la dénomination de "tragédie des communaux" » (HARDIN, 1968). D'autres auteurs ont un point de vue moins tranché que Garrett Hardin ; ainsi, d'après BERKES* et al. *(1989), « il est aujourd'hui démontré que ressource commune n'est nullement synonyme d'accès libre et que de nombreuses ressources en propriété commune ont été et sont gérées de façon viable à long terme ».*

6 *La privatisation des ressources naturelles, et des terres en particulier, est de plus en plus souvent considérée par les bailleurs de fonds, guidés en cela par la Banque mondiale et le Fonds monétaire international, comme une condition préalable pour une allocation efficiente des ressources et pour donner une chance de succès au développement (BELLEFONTAINE* et al., *1997). Mais c'est bien là un consensus idéologique ; c'est exactement ce type de principe que la presse se dépêche de relayer de manière à ce que cela n'apparaisse plus comme un dogme mais comme un fait établi et si naturel qu'il peut devenir une base de réflexion. Ces mêmes auteurs en ont conscience, puisqu'ils affirment : « Ces considérations peuvent paraître simplificatrices et fâcheuses. En effet, il est démontré que la propriété privée, si elle est efficiente d'un point de vue marchand, peut très bien conduire au saccage des ressources lorsque le capital est mobile ou en cas de surinvestissement ».*

7 *Dans les quatre communautés rurales de la Sierra Madre étudiées ici, et qui sont en cela représentatives de l'ensemble de la chaîne, on constate surtout qu'il y a un consensus pour essayer de préserver l'avenir des pâturages, même si les* ejidatarios *sont conscients que pour le moment, la dégradation continue. Ils ont souvent, comme à Boleras, constitué des « réserves », zones de pâtures où il est interdit de mener le bétail durant la saison des pluies ; elles sont ouvertes au moment où, l'eau venant à manquer près des villages et des points d'eau habituels, il est judicieux de mener les*

*troupeaux plus loin, en le dispersant sur l'ensemble de cette réserve (à Boleras, elle représente 40 % de l'étendue de l'*ex-ejido, *soit 55 à 60 % des zones de pâturage. L'herbe y ayant poussé durant toute la saison des pluies, cette réserve représente à l'automne un gros volume de fourrage disponible ; en même temps, l'éloignement du troupeau permet de limiter le piétinement aux alentours des villages durant la saison sèche où le sol est peu protégé.*

8 *Ceci étant, il faut pouvoir introduire l'idée de « biens communs » comme on les appelle souvent dans notre monde de plus en plus global, et ils sont aussi le plus souvent des « biens collectifs » (la terre, l'air, l'eau, les océans). Et c'est là que le bât blesse : jusqu'où peut-on utiliser un bien commun ? Une étude publiée par un syndicat d'intérêts privés notait en 1999 : « Lorsque les biens environnementaux appartiennent à tous et que leur utilisation ne fait l'objet d'aucune concurrence, ils sont qualifiés de biens collectifs. L'air en constitue un bon exemple : personne ne peut se l'approprier, et la consommation d'un utilisateur ne gêne aucunement la consommation des autres utilisateurs. Un bien collectif est donc défini par deux caractéristiques :*

- *la non-rivalité, c'est-à-dire le fait que la consommation de ce bien par un individu ne puisse diminuer la consommation de ce même bien par d'autres individus,*
- *la non-exclusion, c'est-à-dire le fait que l'on ne puisse pas empêcher la consommation par l'instauration d'une interdiction.*

9 *Mais l'usage qui est fait d'un bien collectif par différents individus peut conduire au franchissement d'un seuil de saturation (phénomènes d'encombrement). L'usage de chacun gênant alors la consommation et la jouissance des autres, une rivalité pour l'utilisation du bien considéré commence à voir le jour. Il ne s'agit plus alors d'un bien collectif, mais d'un bien commun, dont l'usage fait l'objet d'une concurrence, conduisant à la raréfaction du bien et à l'apparition d'effets externes dans son utilisation ».*

10 *Et l'on revient à la fameuse théorie de Hardin, puisque les auteurs de cette étude concluent : « La compétition pour l'exploitation de ces biens communs se traduit dans de nombreux cas par leur épuisement, situation qualifiée de "tragédie des communaux" par le biologiste Garret Hardin en 1968. La définition de droits de propriété sur ces biens représente, lorsque cela est possible, un moyen de les gérer » (*SOLAGRAL*, 1999).*

11 *À partir des travaux de Hardin, qui constatait l'impasse de la croissance de la demande face à une offre en ressource inchangée, une autre théorie s'est construite. Celle-ci, développée par* OSTROM *(1990), indique que de nouveaux modes de gestion des biens communs doivent être organisés. Il s'agit d'échapper à la privatisation en affirmant le caractère indivisible de la ressource et en imaginant des modalités de gestion communes des ressources naturelles. Ceci est envisageable par la décentralisation du niveau d'organisation, et en se basant sur des règles coutumières plutôt que sur des règles centralisées fixées par l'État.*

12 *Cette école de pensée est apparue avant tout comme une réaction face aux échecs répétés des projets de développement conçus sans les communautés locales. Elle concerne surtout les pays en développement où de nombreux projets ont été implantés sans tenir compte des modes traditionnels et séculaires de gestion des ressources (*SOLAGRAL*, 1999).*

13 *Cette étude s'achève par le débat sur le rôle de l'autorité publique, qui est surtout perçue à travers les défaillances de ses interventions. La propriété publique sur un bien d'environnement implique que l'État puisse exclure n'importe qui de l'usage d'une ressource en fonction d'une réglementation d'origine politique précisant qui a le droit d'usage et le droit d'accès. Or, la capacité de l'État à veiller à cette exclusion peut parfois s'avérer trop coûteuse, conduisant inéluctablement à la tragédie des communs. Le rôle de l'État ne se limiterait donc qu'à la formulation de réglementations visant à restreindre les droits de propriété ?*

14 *Une fois de plus, on peut conclure, en revenant à l'exemple mexicain, qu'il y a (ou avait) culturellement deux Mexique :*

- *l'un, au sud où les communautés indiennes sont en place depuis des siècles, parfois plusieurs millénaires, et où la gestion collective des terroirs a en grande partie survécu à l'abrogation de l'article 27, car la gestion se fait ainsi depuis des générations et l'autorité des conseils de villages est admise depuis toujours. Le densité de certains secteurs peut faire penser aux « sociétés hydrauliques » chères à Wittfogel, car la survie de tous dépend du travail de chacun et de l'acceptation des règles par tout individu.*
- *l'autre, au nord, pays « neuf » où la gestion de l'espace est traditionnellement bien plus individualiste, et où tous les* ejidos *ont été dissous en quelques années après 1992, tout en conservant la plupart du temps un conseil* ejidal *et quelques domaines collectifs. À Boleras par exemple, on a maintenu la « réserve », et le système d'adduction d'eau potable continue à être géré par ce conseil.*

15 *Ainsi, même du temps des* ejidos, *on assistait fréquemment à des actes contraires à une bonne gestion commune : bergers menant de nuit leur troupeau dans la réserve et le laissant quelques jours hors période d'ouverture à l'insu du conseil* ejidal ; *maquignon rackettant les « indigènes » et les forçant à semer du cannabis pour leur compte ; « pistoleros » abusant de la peur qu'inspire leur armement pour utiliser l'eau potable afin d'irriguer leur mais ; jeune immigré de retour pour les vacances allant chasser de nuit, aux phares et à la mitraillette, etc. Dans un pays neuf, règles et conventions sont succinctes et restent souvent à construire. C'est encore parfois le cas dans la Sierra Madre occidentale. Le retour à la propriété privée intégrale après seulement une ou deux générations de vie* ejidal ne *va sûrement pas aider au développement de règles patrimoniales.*

BIBLIOGRAPHIE

Références

BELLEFONTAINE R., GASTON A., PETRUCCI Y., 1997 – Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches. *Cahier FAO,* Rome, série Conservation n° 32, 170 p.

BERKES F., FEENY D., MCCAY B.J., ACHESON J.M., 1989 - The benefits of the Commons. *Nature,* (340) : 91-93.

HARDIN G., 1968 – The Tragedy of the Commons. *Science,* 162 : 1243-1248.

LE ROY E., 1993 – « Les recherches sur le droit interne des pays en développement. Du droit du développement à la définition pluraliste de l'État de droit ». *In* Choquet C, Dollfus O., Le Roy E,, Vernières M. (dir.) : *État des savoirs sur le développement. Trois décennies de sciences sociales en langue française,* Paris, Karthala : 75-86.

OSTROM E., 1990 – *Governing the Common : The Evolution of Institutions for Collective Action.* New York, Cambridge University Press, 253 p.

SARIN M., 1995 – Cogestion des forêts en Inde : réalisations et défis. *Unasylva*, 46 (180) : 30-36.

SOLAGRAL, 1999 – « Commerce et environnement », étude Solagral, éditeur © Solagral.

AUTEUR

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

Une montagne en voie d'abandon ?

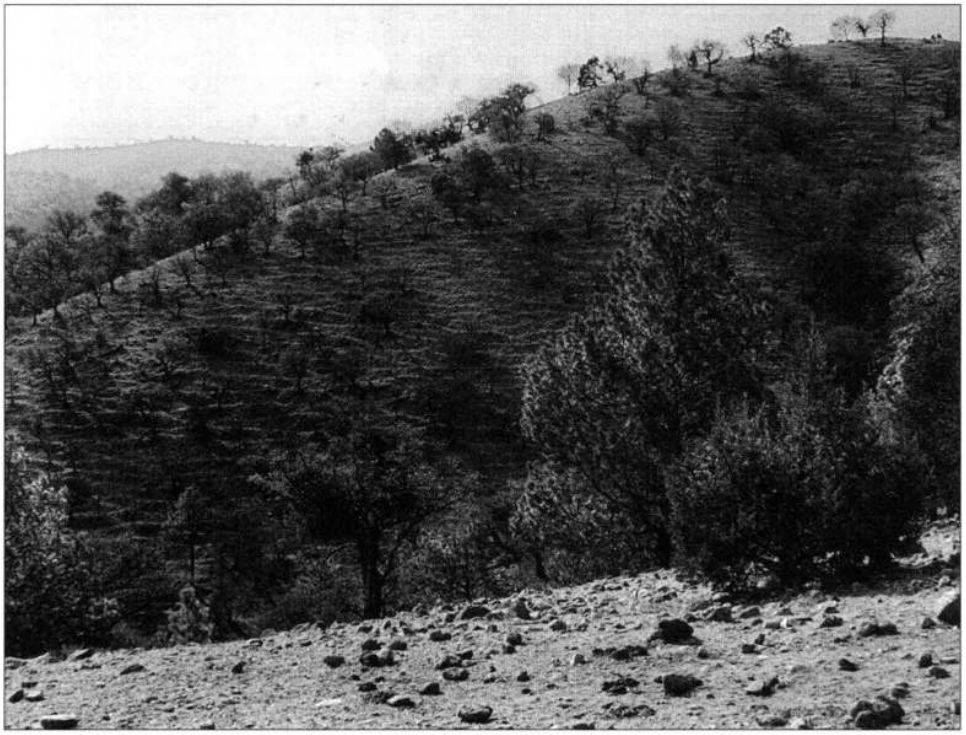
Béatrice Inard-Lombard

Un exode rural transfrontalier

1 À l'heure actuelle, une grande partie des zones rurales du Mexique se vide assez rapidement du fait des nouvelles lois agraires et, localement, de la sécheresse récurrente, qui se surimposent à la dynamique classique de l'exode rural. Dans le sud du pays, le mouvement est classiquement un exode rural, les paysans allant chercher travail et meilleures conditions de vie dans les villes ; cet exode se fait essentiellement en direction des plus grandes villes du Centre, México bien sûr mais aussi Guadalajara et Puebla. Dans le Nord (par extension, tout ce qui se trouve sur les hauts plateaux, au nord de la ville de Aguascalientes), et jusqu'à la frontière américaine, cette migration prend des formes différentes. On ne migre pas vers le sud, mais vers le nord, c'est-à-dire, soit vers la frontière, soit aux États-Unis ; et l'exode vers la frontière est plutôt le fait des gens venant des villes, l'exode aux États-Unis plutôt le fait des gens venant des zones rurales (ARROYO et PAPAIL, 1996). La frontière (en fait les villes mexicaines situées à la frontière, principalement Tijuana, Ciudad Juárez et Nuevo Laredo, secondairement Nogales, Ojinaga, Matamoros et d'autres villes moins importantes) et les États-Unis attirent (COMBESQUE, 1999) car il est actuellement facile d'y trouver rapidement du travail. Ce mouvement migratoire concerne les États-Unis, du fait de la forte croissance économique, et le nord du Mexique par extension puisque cette zone travaille majoritairement pour le marché américain.

Un exode direct

2 Cette région colonisée depuis peu au niveau agricole (l'élevage bovin extensif y est l'activité principale) souffre d'une gestion « minière » des pâturages qui a conduit à un surpâturage très aigu.



« Pieds de vache » sur un versant de savane d'altitude au-dessus du village de Boleras (route de Tepehuanes à Santa María del Oro).

Un exemple représentatif de la Sierra Madre occidentale

3 Notre propos est de montrer l'originalité de cette migration d'une zone rurale du Sud vers les cités du Nord (Nord au sens géopolitique), et d'insister sur la perméabilité de la seule frontière terrestre entre ces deux ensembles géopolitiques. Il s'agit d'indiquer comment le Nord-Mexique est devenu naturellement un bassin de main-d'œuvre pour les États-Unis, le départ vers « l'autre côté » étant perçu comme un moyen de sortir du milieu villageois, plus que de s'en sortir tout court, et aussi comme un rite ou une initiation.

4 Cette étude sur la dynamique migratoire a été réalisée dans quatre petits villages de la Sierra Madre occidentale, situés au nord de l'État de Durango (fig. 6 et 7). Ces quatre villages de 100 à 250 habitants font partie de deux communes (celles-ci ont la taille d'un département français) : la Ciénega de Escobar est une communauté rurale de la commune de Tepehuanes, alors que Escobar, Boleras et La Posta de Jihuites sont des *ejidos* de la commune de Guanacevi.

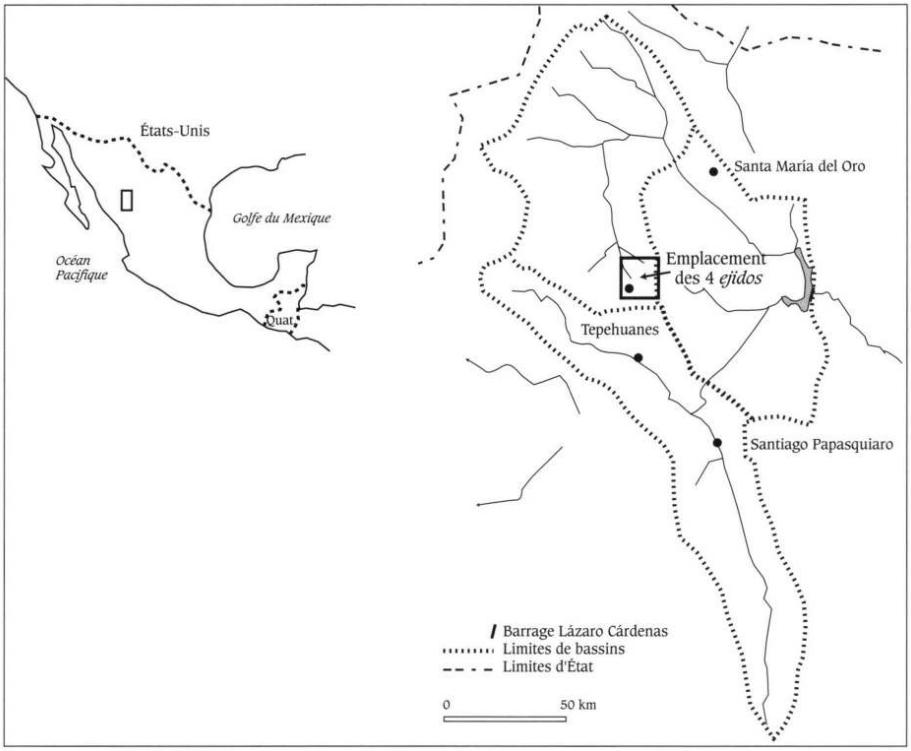


Fig. 6 – Localisation du site d'étude.

5 Ce site d'étude est représentatif de toutes les zones rurales de la Sierra Madre occidentale, qui connaissent un très fort exode (aucune ville, pourtant, ne dépasse 100 000 habitants dans la zone montagneuse), alors que c'est une région plutôt favorisée par les conditions naturelles (en particulier, les ressources en eau), par opposition aux plaines et plateaux arides du reste du Nord-Mexique.

Une analyse fondée sur des enquêtes

6 La méthode de travail a consisté en une enquête systématique auprès des habitants, ce que seule autorisait la petite taille de toutes ces communautés. Comme c'est parfois le cas en zone rurale, ce travail a été rendu difficile par la méfiance des gens, bien que ceux-ci fussent habitués à voir les chercheurs hydrologues évoluer sur leur territoire. Mais il y a toujours une certaine réticence, liée aussi au fait que l'on se trouve ici dans une zone de non-droit, où les trafics en tous genres sont particulièrement importants (RIVELOIS, 1992). Cependant, au fil des échanges, il s'est instauré un climat de confiance et il a été possible de faire la part des choses sur certains points qui paraissaient flous et aussi de déchiffrer des non-dits et des expressions consacrées souvent assez lointaines du castillan. Un grand nombre d'enquêtes a demandé un gros travail de réinterprétation, bien que tous les enquêtés, sauf deux personnes, parlaient parfaitement l'espagnol (la plupart des Indiens Tarahumaras sont scolarisés depuis plus d'une génération).

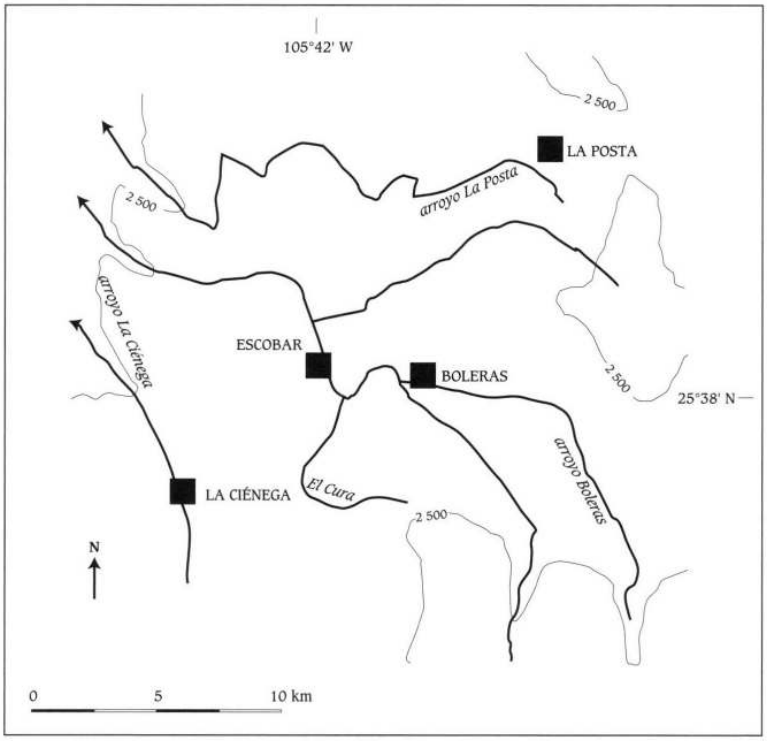


Fig. 7 – Localisation des quatre *ex-ejidos*.

Les causes et les formes de la migration

7 Un constat s'impose immédiatement lorsque l'on parcourt du regard les nombreuses zones abandonnées des villages et les maisons vides aux allures fantomatiques de la Sierra Madre occidentale. Les populations ont quitté leur maison pour aller chercher de meilleurs revenus ailleurs (tabl. IV). Cet exil volontaire s'est porté bien sûr vers une destination bien précise : les États-Unis (appelés ici « *el otro lado* », l'autre côté de la frontière). Cette émigration des populations rurales de la Sierra Madre occidentale vers les États-Unis (Illinois, Californie et Nevada) essentiellement, existe déjà depuis plusieurs décennies.

8 L'aspiration à un meilleur avenir pousse les populations rurales à quitter leur pays d'origine pour aller travailler « de l'autre côté », phénomène accéléré par la rapide « réussite » sociale des candidats au départ. Il s'agit d'un véritable exode rural des habitants (surtout la population active) de la Sierra Madre occidentale vers les villes des États-Unis (tabl. V).

Tab. IV – Évolution de la population de 1990 à 1995 sur les *ejidos* inclus dans la zone d'étude et les *municipios dont elle fait partie, ainsi que ceux de Santiago et Santa Maria.**

Ejidos	1990	1995	Estimations 1999
Escobar	220	134	120
Boleras	215	143	100
Posta	283	217	198
Municipio de Tepehuanes	14 942	13 588	12 937
Municipio de Guanaceví	11 925	11 447	10 794
Municipio de Santiago P.	42 150	42 993	43 517
Municipio de Santa Maria	14 815	13 516	12 245

Sources : DUFEU, 1998. Estimations : INARD LOMBARD, 2000, INEGI 2001.

Tabl. V – Répartition en 1997 de 234 chefs de famille recensés sur l'*ejido* de la Ciénega de Escobar en 1967.

Chefs de famille	Travaillent sur l'*ejido*	Vivent aux États-Unis	Décédés	Autres
Nombre	51	127	32	24
Pourcentage	22 %	54 %	14 %	10 %

Source : DUFEU, 1998.

Motivations au départ

L'appel des familiers ou amis déjà émigrés

9 L'implantation des familles de même nationalité sur un même territoire existe de longue date, ainsi la migration entraîne la migration. L'existence d'un réseau de connaissances familiales ou amicales dans une ville américaine facilite l'arrivée des individus dans cette ville. Un réseau de solidarité se met en place petit à petit et grandit à chaque nouvel arrivant. Les personnes nouvelles sont alors accueillies et dirigées vers les aides administratives. Certains ont déjà du travail avant même de traverser la frontière. Certaines personnes téléphonent régulièrement aux membres de leur famille restés au pays pour les informer qu'un emploi les attend dès leur arrivée aux États-Unis. Une famille du village de Boleras a vu partir un de ses membres à Hollywood pour travailler dans un restaurant casher (tenu par la mère de Stephen Spielberg). Aujourd'hui, on peut compter dix des hommes de cette même famille qui sont allés travailler dans ce même restaurant à un moment ou à un autre ; la patronne, au bout de quelques années, s'occupe de régulariser leur situation, en échange de l'acceptation de travailler quelques années au noir.

Un gagne-pain temporaire, souvent définitif

10 La migration temporaire est souvent établie sur le principe de l'aller-retour qui empêche de se fixer définitivement. Elle correspond aux personnes qui refusent de vivre de façon permanente sur le territoire américain. Celles-ci préfèrent gagner de l'argent pour ensuite l'investir dans leur village natal. Cette migration peut être dite saisonnière pour les travaux de type agricole ou intermittente pour les travaux de type industriel ou liés à la restauration. Beaucoup, jeunes et vieux, sont embauchés plusieurs mois d'affilée pour la récolte des légumes (au Texas ou en Caroline du Nord la plupart du temps) ; beaucoup de ceux qui travaillent dans la restauration et l'industrie ne restent que quelques mois, ils y retournent chaque année ou tous les deux ans, en fonction des besoins d'argent de la famille. Le départ est considéré le plus souvent comme volontaire et temporaire. Si la migration est définitive, elle fait référence à des facteurs d'ordre économique et à un choix de s'installer ailleurs dans l'espoir de trouver des conditions de vie meilleures. Le niveau de vie étant actuellement assez élevé dans la sierra (du fait de l'apport des émigrés), le choix est plus dicté par un besoin urgent de liquidités, une envie d'indépendance vis-à-vis de la famille, et la curiosité de voir les États-Unis. C'est également, il faut bien le dire, une espèce de rite : ceux qui partent pour la première fois (vers 18 ans en général et donc sans papier), quittent le village de manière à passer la frontière le 3 juillet ou le 24 décembre au soir (à la fin d'un semestre scolaire), au moment où elle est le moins surveillée en raison des festivités.

Les causes de départ

11 L'histoire de la migration des habitants de la Sierra Madre occidentale se découpe en deux temps.

12 Dans un premier temps, la migration était réservée aux chefs de familles. Ils partaient travailler pour une durée de quelques mois afin d'amasser un pécule en vue de retourner au village. Par la suite, la demande d'une main-d'œuvre féminine s'étant accrue, les femmes mexicaines sont également parties de l'autre côté de la frontière.

13 Dans un second temps, les émigrés de la seconde génération sont les jeunes qui partent vers dix-huit ans (ceci a été observé quel que soit le village natal) rejoindre leurs parents de l'autre côté ; n'ayant pas vécu leur enfance aux États-Unis, ils constituent en fait une seconde « première génération ». Leurs parents étant souvent clandestins, ils n'ont effectivement pas la possibilité de faire jouer le regroupement familial.

14 On présente ci-dessous les résultats des enquêtes menées durant l'été 1999 auprès de tous les foyers des quatre villages concernés. Les résultats des enquêtes ont été classés par thèmes ; les thèmes ont été triés à partir des réponses les mieux documentées au niveau géographique et sociologique ; celles-ci correspondaient le plus souvent aussi aux réponses les plus fiables de la part des personnes qui ont participé à cette collecte de renseignements.

- Les individus partent essentiellement (77,8 %) pour trouver un travail qui leur permette de gagner de l'argent. Les raisons évoquées comme le travail et l'argent sont données très spontanément avec une conviction déterminée.
- Une autre cause de départ est liée à la volonté d'un regroupement familial. Les personnes âgées qui n'ont plus de famille au village ont tendance à rejoindre les membres de leur famille qui vivent aux États-Unis.

- Dernière cause : les personnes partent par nécessité de rembourser un prêt. La pratique d'emprunter de l'argent pour construire sa maison ou acheter du matériel de travail incite les individus à partir chercher de l'argent ailleurs lorsqu'ils sont trop endettés.

15 Durant la période de l'enquête, de nombreuses personnes ont quitté les quatre villages pour aller chercher du travail de « l'autre côté ». La migration des Mexicains de la Sierra Madre occidentale s'est considérablement accélérée durant l'été 1999, certaines maisons étant complètement abandonnées. La sécheresse de cet été 1999 a sans doute été un facteur d'accélération du processus migratoire.

Une émigration de travail

16 La figure 8 permet de constater que les émigrés de la première génération ont essentiellement travaillé dans le domaine de la restauration et dans le secteur de l'industrie. L'économie des États-Unis demande une main-d'œuvre importante, d'où le recrutement de travailleurs mexicains. Le domaine de la restauration a toujours été un secteur propice aux travailleurs clandestins étant donné qu'il est relativement facile de cacher les personnes derrière les cuisines. Beaucoup sont en cuisine durant quatre ou cinq ans, et leur employeur leur facilite ensuite l'accès à la carte de résident ; ils peuvent alors devenir serveurs. Pour le travail de l'agriculture, il s'agit de travaux saisonniers tels que les vendanges ou le ramassage des fruits et du coton.

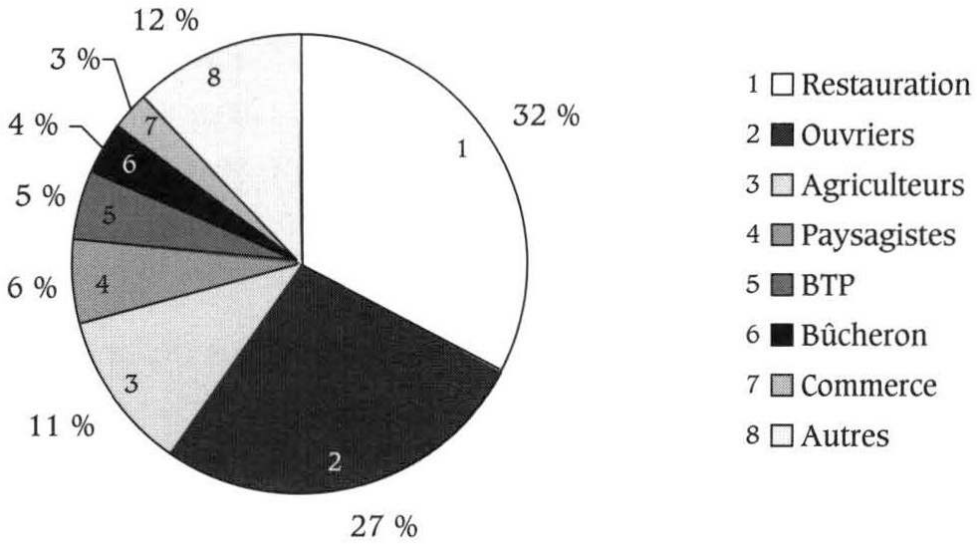


Fig. 8 – Répartition professionnelle des émigrés mexicains de la première génération.

17 La seconde génération travaille (fig. 9) essentiellement dans les mêmes domaines qui sont, par contre, inversés, avec en premier l'industrie et ensuite la restauration. Cette situation reflète clairement le besoin croissant de main-d'œuvre manifesté par les États-Unis (du moins au moment de cette enquête, en 2000).

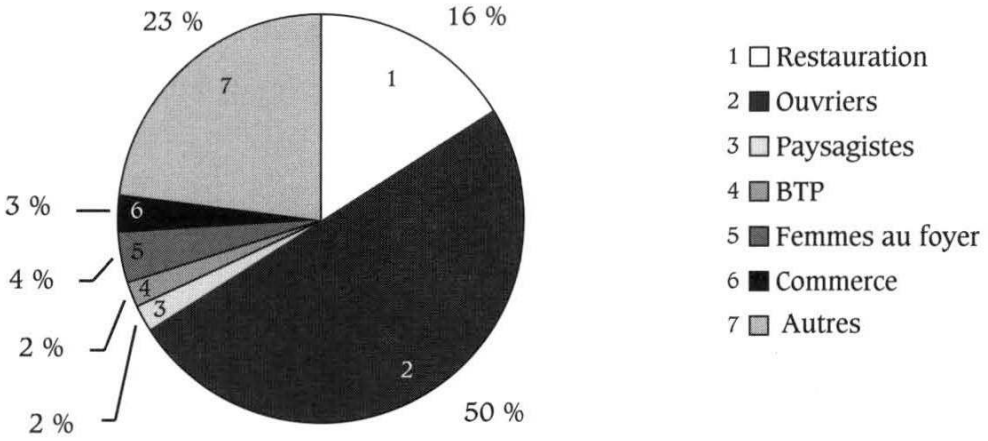


Fig. 9 – Répartition professionnelle des émigrés mexicains de la seconde génération.

18 La moitié des émigrés de la seconde génération travaille dans le domaine de l'industrie qui concerne en réalité le travail à la chaîne dans des fabriques d'assemblage. Ce pourcentage d'individus travaillant dans le secteur de l'industrie est sans doute plus élevé si l'on considère le pourcentage important de personnes dont nous n'avons pu déterminer la profession (car les parents ne la connaissaient pas). Pour les Mexicains, travailler dans une fabrique ou dans le domaine de la restauration représente un échelon supplémentaire dans la hiérarchie professionnelle. L'augmentation de salaire qui en découle est une incitation malgré les conditions de travail souvent très dures.

Une forte attraction de Chicago

19 La première génération d'émigrés de l'enquête a principalement choisi l'État de l'illinois et ensuite, l'État de Californie comme lieu d'émigration. Près des trois quarts des émigrés de la seconde génération originaires des quatre communautés mexicaines s'installent dans l'État de l'Illinois. Ainsi, cette deuxième génération reproduit le même schéma que la première. Les personnes qui choisissent l'État de l'Illinois sont de plus en plus nombreuses. Un effet de mode se produit avec le choix d'un lieu commun pour s'installer aux États-Unis.

20 Il semble qu'il existe une filière qui pousse la plupart des habitants de ces quatre villages de la Sierra Madre occidentale à choisir l'Illinois, et plus précisément la ville de Chicago. Le regroupement familial est une donnée très importante dans le choix du lieu d'émigration des Mexicains de la Sierra Madre occidentale. Si les individus ne partent pas tous ensemble, ils se retrouvent généralement dans un lieu précis. De plus, les familles étant très nombreuses (le nombre de cousins et de cousines dans un même village est très élevé) et les populations des villages peu importantes, il est logique que beaucoup d'entre eux se retrouvent finalement en une ville identique (ici, Chicago) et même dans les mêmes quartiers. En 1990, la population totale des émigrés mexicains représentait environ 13,2 % de la population totale de l'agglomération de Chicago.

Une émigration particulière

Le maintien de liens affectifs, culturels et économiques

21 Comme on l'a vu, si les habitants fuient leur village, le nombre de vaches a très peu diminué ; cette diminution est liée à la sécheresse (on vend ce qu'on ne peut plus nourrir) bien plus qu'à l'émigration. En effet, l'émigrant conserve le plus souvent des bêtes qu'il confie à ses familiers restés au village ; il garde ainsi des liens avec sa terre.

22 Par ailleurs, les mariages sont l'occasion de se retrouver et de revenir au village. Il n'est pas rare de constater que de jeunes couples mariés partent pour les États-Unis quelques jours après leur mariage. Pour la plupart des jeunes filles, quitter le Mexique toute seule ne serait ni respectable ni souhaitable. Par contre, lorsque la famille décide d'émigrer, tous les enfants, qu'ils soient filles ou garçons, suivent leurs parents. Pour ces derniers, il n'est pas question de laisser leurs enfants au Mexique.

Un pays neuf qui se vide

23 Jusqu'au XIX^e^ siècle, cette région du Mexique était habitée par des Indiens Tarahumaras et Tepehuanes vivant dans des petits villages disséminés de la Sierra Madre occidentale. À la fin du XIX^e^ siècle, des populations étrangères venues du sud du pays et composées d'éleveurs de bétail colonisent ces terres et vont pratiquer un élevage extensif sur d'immenses propriétés privées. Ces grands propriétaires avaient une logique particulière qui consistait à exploiter la terre sans chercher à pérenniser leur mode d'exploitation. L'ère de la Réforme agraire de 1936, lancée par le président Cárdenas, va changer cette logique. Les communautés de paysans, autrefois sous la tutelle des grands propriétaires, vont revendiquer leur droit à la terre. C'est la naissance de *Yejido*. Le principe de cette nouvelle forme d'exploitation de la terre consiste à attribuer des terres collectives à un groupe d'agriculteurs qui s'engagent à les mettre en valeur et à respecter certaines règles établies par la communauté, afin d'éviter le démantèlement (MUSSET, 1990).

24 Cette région du Mexique dont le peuplement est récent assiste aujourd'hui à un dépeuplement précoce et en même temps au démantèlement des *ejidos.*

Quel avenir pour la Sierra ?

25 Les ruines de quelques maisons disséminées dans les villages attestent d'une occupation ancienne. Mais les maisons abandonnées seront d'ici peu de temps aussi nombreuses que les maisons habitées (fig. 10 et 11). Le départ de familles entières et le délaissement des terres ne laissent pas présager un retour au village. Les terres cultivables laissées en friche posent le problème d'une déprise de l'environnement. L'abandon de ces dernières, combiné à la réforme agraire, entraîne un changement radical pour leur gestion. Les *ejidos* sont en train de disparaître, dissous par la privatisation des terres, et ainsi chaque propriétaire cultivera sa parcelle indépendamment des autres. Actuellement, les personnes ont le droit de choisir entre acheter et/ou vendre les terres ou bien rester en système *ejidal.* Mais dans ce dernier cas (très peu représenté au nord du Mexique), si les villageois partent ils perdent alors leur droit de cultiver les terres « ejidales ». Par conséquent, les personnes émigrées qui voudraient revenir au village devront investir des sommes importantes dans l'achat de terres. De plus, les terres non cultivées depuis plusieurs années se sont transformées et il faudrait une somme considérable de travail

pour les cultiver à nouveau. Tous ces aspects ne favorisent pas vraiment le retour des émigrés.

26 Le peu de gens qui resteront pourront vivre décemment car ils auront regroupé des surfaces de terres suffisantes pour affronter le marché économique nord-américain ; ils auront ainsi reconstitué les grandes propriétés contre lesquelles s'est battue la génération de leurs parents ou grands-parents, durant les années cinquante et soixante.

27 Les flux de capitaux en retour des États-Unis s'inscrivent dans le paysage à travers l'amélioration de l'habitat et les signes extérieurs de richesse (antenne parabolique, véhicule, etc.) ; de fait, le niveau de vie est bien supérieur ici à celui de la moyenne des zones rurales du Mexique, surtout pour une zone de montagne à forte proportion de population « indigène ». D'après HABEL (1999), « les millions de Mexicains envoient chaque année près de 5,5 milliards de dollars au Mexique pour atténuer le dénuement des leurs, demeurés au pays ». Les émigrés de la Sierra Madre (surtout ceux de seconde génération) semblent plus à l'aise dans la société américaine que ces « chicanos dont la communauté cherche ses racines et lutte pour définir son identité, formée à partir de son origine mexicaine et du processus d'adaptation et d'assimilation de la culture américaine » qu'évoquent CASTILLO et BUSTAMANTE (1989). Il est possible que la relative proximité du village avec la frontière leur épargne l'impression de vivre dans la « prison d'or » dont parle DURAND (1996) au sujet de leurs conditions de vie. Mais il est vrai que beaucoup, par fierté, n'iront pas dire, dans leur village, la dureté de leur vie « *del otro lado* ».

Fig. 10 – État d'occupation des maisons à Pilitas de Arriba (gauche) et à Pilitas de Abajo (droite) en septembre 1999.

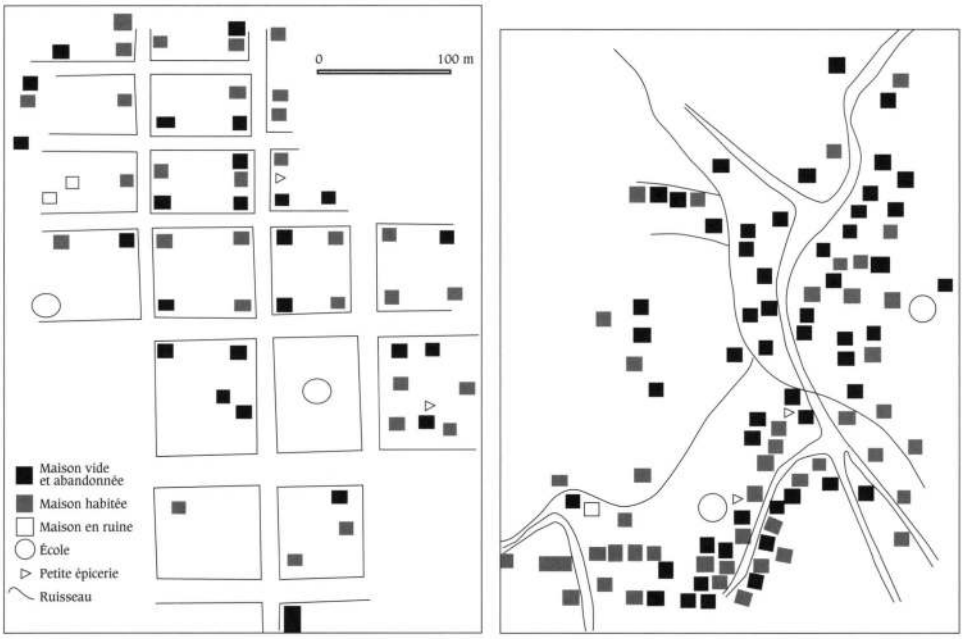


Fig. 11 – État d'occupation des maisons à Escobar (gauche) et à La Posta de Jihuites (droite) en septembre 1999.

28 L'avenir de ces quatre villages reste donc bien incertain en terme d'occupation. Seuls un changement socio-économique et l'offre d'emplois correctement rémunérés pourraient faire rester les candidats au départ. Mais encore faudrait-il que les salaires s'alignent sur ceux des États-Unis. Ces dernières possibilités semblant lointaines, la dépopulation reste d'actualité.

Comparaison du processus migratoire entre l'Europe et les États-Unis

29 La présence d'une frontière terrestre entre un pays du Nord (le plus puissant qui plus est) et un pays du Sud est un cas unique. Mais l'Europe, malgré la présence de la Méditerranée, a connu et connaît encore un courant d'immigration important venu du Sud, principalement en provenance des pays d'Afrique du Nord pour ce qui concerne les trois grands pays d'Europe du Sud (France, Italie, Espagne). Ces deux migrations sont comparables d'une part, par l'ancienneté du phénomène migratoire et, d'autre part, par le fait que chacune fut soumise à l'influence de faits économiques et sociaux.

Principales différences

30 Toute l'Amérique est chrétienne, même si des rites pré-hispaniques survivent de manière très intense au Mexique et dans les pays andins. En revanche, la majorité des migrants africains et nord-africains en Europe sont musulmans ou animistes. En dehors de ces considérations culturelles, l'émigration vers l'Europe diffère de celle vers les États-Unis sur deux points essentiels.

La frontière, obstacle physique

31 La présence d'une mer rend évidemment les conditions de passage plus délicates, a *fortiori* pour un clandestin ; mais les obstacles physiques installés par les autorités de migration américaines pour s'opposer à l'entrée des clandestins atténuent grandement cette différence. Il est de plus en plus dangereux de franchir la frontière mexicano-états-unienne. Si on estime que plus d'un millier de personnes disparaissent chaque année dans le détroit de Gibraltar, officiellement plus de 400 personnes meurent chaque année en voulant passer la frontière sud des États-Unis ; les principales causes de décès sont les exactions de la police américaine et l'abandon pur et simple des candidats à l'exil dans le désert de Chihuahua (le cas de ce fermier du Nouveau-Mexique qui organisait des parties de « chasse à l'émigré » de nuit à l'aide de projecteurs est officiellement resté unique).

Le statut du migrant

32 À la frontière nord de l'Amérique latine, la majorité des migrants sont mexicains et volontaires pour l'exil. Seuls, des réfugiés du Salvador et du Guatemala, pays soumis à des guerres civiles atroces durant les années 1980 et 1990, ont pu émigrer pour des raisons politiques ou plus simplement pour sauver leur propre vie ou celle de leurs proches.

33 En Europe du Sud, aux migrants « économiques » d'Afrique du Nord s'ajoutent depuis une dizaine d'années une partie des 5,4 millions de migrants de l'Afrique subsaharienne qui avaient le statut officiel de réfugiés, et dont certains parviennent à atteindre les villes côtières d'Afrique du Nord (par le Niger et l'Algérie, ou bien par le Niger et la Libye, ou encore par le littoral de l'ex-Sahara occidental ou par les Canaries) ; de plus, d'autres personnes étaient déplacées dans des circonstances voisines de celles des réfugiés mais sans avoir officiellement le statut de réfugiés (FOOT *et al.,* 1996).

Principales similitudes

La distance

34 La proximité des frontières implique des allers-retours fréquents au cours de l'année. Cela permet aux personnes seules, ou aux familles, une fois leur statut régularisé, de partir travailler durant une période et de rentrer dans le pays de départ pour une durée de quelques mois. Mais dans un cas comme dans l'autre, le temps aujourd'hui nécessaire à une régularisation de leur statut conduit une grande partie des migrants à s'installer dans la durée et parfois à s'acculturer.

La transition démographique

35 Les deux zones (le Maghreb, principal point de départ des migrants d'Europe du Sud, et le Mexique), étant en pleine transition démographique avec un taux d'accroissement naturel encore élevé, représentent une évolution démographique similaire. La population du Maghreb a été multipliée par 5,2 au cours du siècle dernier. En 1900, les Maghrébins étaient 12,3 millions ; en 1950, ils étaient 23 millions et en 1990, on en recensait 65 millions (GAMBLIN, 1995).

36 De son côté, le Mexique est, en raison de son important potentiel démographique, le premier pays de départ des pays du Sud. En 1993, la population mexicaine aux États-Unis

représentait environ 10 % de la population américaine totale (STALKER, 1995). Elle en représente aujourd'hui plus de 13 %.

37 Par ailleurs, on peut aussi comparer, en terme de provenance, d'une part le Maghreb et le Mexique qui restent les pays gros pourvoyeurs, où l'argent des émigrés est une manne, depuis plusieurs décennies déjà ; et d'autre part, l'Afrique subsaharienne et le reste de l'Amérique latine (l'Amérique centrale avant tout), qui sont les pays plus défavorisés, jouxtant les premiers au sud. Dans un cas comme dans l'autre, la proportion des migrants venus de l'ensemble le plus méridional s'accroît, et la proportion de clandestins y est, également plus grande.

Le volume

38 Le volume des migrants a été similaire jusqu'à la fin des années soixante-dix. Les deux flux migratoires, du Mexique vers les États-Unis d'une part, du Maghreb vers l'Europe de l'autre, comptaient alors des millions de personnes pour les régions en question (tabl. VI, pour le Maghreb). À l'heure actuelle, les flux sont plus importants en ce qui concerne le « flux américain » qui ne cesse de s'accroître. À l'inverse, du fait d'une situation économique moins favorable en Europe, le flux migratoire depuis le Maghreb est devenu bien plus faible.

Tabl. VI – Évolution de la population maghrébine à l'étranger.

Années	Marocains	Algériens	Tunisiens	Maghrébins
1970	200 000	600 000	100 000	900 000
1974	450 000	850 000	280 000	1 580 000
1981	850 000	900 000	350 000	2 100 000

Source : SIMON, 1983.

39 Ces chiffres sont déjà anciens, mais n'ont pas beaucoup évolué depuis, car le flux s'est ralenti en raison de la politique européenne et des politiques restrictives de chaque pays. En outre, de plus en plus de migrants demandent la nationalité du pays d'accueil, ce qui ne facilite pas la comparaison avec les États-Unis où il est plus facile de devenir citoyen, mais plus difficile d'obtenir la nationalité. D'autre part, une difficulté apparaît du fait qu'en France, comme dans d'autres pays, les recensements ne permettent pas de connaître l'origine et/ou la religion des gens à partir du moment où ils sont français. Trois millions d'immigrés africains vivent en France (ROBIN, 1997), où on estime la population de confession musulmane à 5 millions ; on peut en déduire qu'une petite majorité des immigrés provenant d'Afrique ont déjà acquis la nationalité française. Par ailleurs, la difficulté à estimer le nombre des clandestins (plusieurs millions) persiste entre les deux côtés de l'Atlantique ; pour la France, les estimations varient de 0,5 million à un peu plus d'un million.

La crise économique et les migrations internationales

40 Les problèmes concernant la qualité de vie sont déterminants dans le choix des populations à l'émigration. Le tableau VII mentionne des données spécifiquement

subsahariennes ; il est à noter que la situation s'est plutôt détériorée depuis 1985. Comme le précise AMIN (1995) : « *It is obvious that migrants are rational beings who move towards those regions where there is a chance of earning better money* » (« *il est évident que les migrants sont des êtres rationnels qui vont vers les régions où il existe une chance de mieux gagner leur vie.* »). La migration de travail, qu'elle soit régionale ou internationale, répond à des inégalités de répartition des revenus entre deux pays ou régions (TAPINOS, 1993 ; MASSEY, 1993 ; STALKER, 1995). En effet, l'émigration des Mexicains et des Maghrébins est conditionnée par la recherche d'un travail.

41 La population de notre zone d'étude ainsi qu'une partie des Maghrébins ont émigré d'un milieu rural vers une grande ville américaine ou européenne. Le milieu rural ne favorisant pas la possibilité de trouver une autre activité professionnelle que celle de la terre, il est plus facile de trouver du travail dans une grande ville.

Tabl. VII – Quelques indicateurs globaux de la pauvreté en milieu rural africain, 1985.

Indicateurs	Ensemble pays en développement	Afrique subsaharienne*
Part de la population rurale en-dessous du seuil de pauvreté (1985)	37 %	65 %
% des besoins journaliers en calories (1985)	109 %	92 %

Source : PNUD, 1992, 1994.
Note *†

La durée de l'émigration

42 Cette migration internationale de l'Afrique du Nord (et de plus en plus, d'Afrique subsaharienne), dominée par une migration de travail, est généralement considérée comme temporaire et de plus ou moins longue durée. L'idée de départ est de partir dans un autre pays pour travailler et ensuite, de revenir au pays natal. La suite est bien souvent différente puisque les émigrés choisissent souvent de rester dans le pays d'accueil. De même, la durée de la période de migration s'allonge (RUSSEL *et al.,* 1990 ; RUSSEL, 1998). Cela ressemble aussi beaucoup à ce qui prévaut de l'autre côté de l'Atlantique.

Évolution du type de migrants

43 Au départ, la migration implique surtout des hommes de 15 à 34 ans qui occupent des postes faiblement rémunérés. Au Maghreb, depuis plusieurs années déjà, on observe une augmentation de la migration féminine dans un but de réunification familiale (RUSSEL et *al.,* 1990 ; RUSSEL, 1998). Une telle évolution a aussi été évoquée, plus haut, à propos de l'émigration des Mexicains et des Latino-Américains aux États-Unis.

Synthèse

44 On retrouve beaucoup de similitudes entre la migration des Africains (en particulier, les Maghrébins) en Europe et la migration des Mexicains aux États-Unis. Ces deux migrations sont largement conditionnées par une insatisfaction du niveau de vie et par la recherche d'un travail permettant une amélioration des conditions de vie.

45 L'évolution tend vers une migration durable et, de plus en plus, vers une migration définitive. Les migrants partent pour satisfaire les besoins familiaux tout en conservant des liens très forts avec leur famille et leur village natal. L'importance du regroupement familial est une donnée qui pousse les femmes (et leurs enfants) à rejoindre leurs maris dans le pays d'accueil.

46 De plus, la différence des salaires entre le pays de départ et le pays d'émigration est toujours très élevée. Cela permet aux migrants d'envoyer de l'argent aux familles restées au pays et par là, de faire vivre le village. En 1991, près de 5 % des Maghrébins résidaient hors du territoire national et alimentaient un flux de devises estimé à plus de dix milliards de francs (SIMON, 1983), provenant essentiellement du revenu du travail. Depuis, cette somme, augmentée des apports des migrants d'Afrique subsaharienne, a dû se rapprocher des 5,5 milliards de dollars apportés par l'émigration mexicaine aux États-Unis.

47 Dans les deux cas, on est passé d'une migration temporaire à une installation définitive et les migrants ont apporté de nouveaux éléments culturels, en même temps qu'ils s'appropriaient les traits culturels du pays du Nord où ils se sont installés. De plus, la migration économique, de travail, est devenue un apport indispensable à la vie économique, sociale et culturelle du Nord.

Conclusion

48 De l'autre côté de la frontière, la vie de ces émigrés mexicains est bien loin du « rêve américain ». Pour la plupart, après avoir traversé la frontière de façon clandestine, ils travaillent dans des fabriques et vivent entre Mexicains de la même famille et du même village. Leur intégration dans la vie américaine est faible à la première génération ; certains ressentent cela comme une véritable injustice. Par contre, dès la régularisation de leur situation, les émigrés s'assimilent très vite aux habitants des États-Unis, surtout au sud, qui appartenait au Mexique jusqu'en 1848.

49 Mais sur place, l'abandon de la Réforme agraire et le départ des trois quarts des habitants ont transformé les villages, où les conditions de vie se sont nettement améliorées, mais pour un nombre très restreint d'habitants.

BIBLIOGRAPHIE

Références

AMIN S., 1995 – « Migrations in Temporary Africa. » *In* Baker J., Aina T.A. (eds) : *The Migration Experience in Africa,* Stockholm, Sweden, The Nordic Africa Institute : 25-36.

ARROYO ALEJANDRE J., PAPAIL J., 1996 – *Migración mexicana a Estados-Unidos y desarrollo regional en Jalisco.* Universidad de Guadalajara -Centro Universitario de Ciencas Económico Administrativas, 163 p.

BOLLERY A., 1999 – *Comportement hydrodynamique de deux versants dans La Sierra Madre occidentale.* Mémoire Maîtrise, (géographie), université Joseph Fourier, Institut de géographie alpine, Grenoble, 139 p.

CASTILLO P., BUSTAMANTE A., 1989 – *México en Los Angeles.* México Conacult, coll. Las colecciones noventa, Alianza.

COMBESQUE M.A., 1999 – « Comme des papillons vers la lumière ». (Zones franches et rideaux de fer), cité dans *Le Monde Diplomatique :* 16-17.

DUFEU R., 1998 – *Les paramètres du ruissellement et de l'érosion : impact du surpâturage dans la Sierra Madre occidentale.* Mémoire de fin d'étude, Istom, Cergy Pontoise, 73 p.

DURAND J., 1996 – *Migrations mexicaines aux États-Unis.* Paris, CNRS-Éditions, 214 p.

FOOT K., HILL K. *et al.,* 1996 – *Changements démographiques en Afrique subsaharienne.* Paris, Travaux et Documents Ined, PUF diffusion, 371 p.

GAMBLIN A., 1995 – *Maghreb Moyen-Orient mutations. Dossiers des images économiques du Monde.* Paris, SFDS, 348 p.

HABEL J., 1999 – Entre le Mexique et les États-Unis, plus qu'une frontière (Zones franches et rideaux de fer). *Le Monde Diplomatique :* 16-17.

INARD LOMBARD B., 2000 – *Les causes et conséquences de l'émigration de la population de quatre communautés rurales de la Sierra Madre occidentale (Nord-Mexique).* Mémoire de maîtrise de géographie, université Joseph Fourier, Grenoble, 118p.

MASSEY D., 1993 – Theories of international migration : a review and appraisal. *Population and Development Review,* 19 (3) : 431-466.

MUSSET A., 1990 – *Le Mexique.* Paris, Masson, collection géographie, 255 p.

POULENARD J., DESCROIX L., JANEAU J.L., 1996 – Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre occidentale (nord-ouest du Mexique). *Revue de Géographie alpine,* 84, 2 : 77-86.

RIVELOIS J., 1992 – *Les liaisons dangereuses dans l'État clientéliste libéral. Pouvoir, corruption et drogue à partir du Chihuahua (Mexique).* México, Rapport Orstom, 11 p.

ROBIN N., 1997 – *Atlas des migrations ouest-africaines vers l'Europe, 1985-1993.* Paris, Éditions de l'Orstom (IRD), 109 p.

RUSSELL S.S., 1998 – *Migrations between developing countries in sub-saharan Africa and Latin America.* Proceedings of the UN experts group meeting on Population Distribution and Migrations, Santa Cruz, Bolivia, 18-22 janvier 1993. New York, Nations unies : 228-244.

RUSSELL S.S., JACOBSEN K., STANLEY W.D., 1990 – *International Migrations and development in sub-saharan Africa.* World Bank Discussion Paper n° 160, Banque mondiale, Washington : 345-366.

SIMON G., 1983 – *Les transferts de revenus des travailleurs maghrébins vers leur pays d'origine : essai d'évaluation.* (Communication table ronde. Transferts de revenus et projets immobiliers de travailleurs migrants dans les pays en voie de développement). CIEM, 20 p.

STALKER P., 1995 – *Les travailleurs immigrés : une étude des migrations internationales de main-d'œuvre.* Genève, BIT, 346 p.

TAPINOS G., 1993 – *Les populations au-delà de leurs frontières.* Paris, Ined/PUF, 314 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, 450 p.

VIRAMONTES D., DESCROIX L., 2000 – Dégradation progressive du milieu et conséquences hydrologiques : étude de cas dans la Sierra Madre occidentale (Nord-Mexique). *Revue de Géographie alpine,* n° 2, t. 88 : 27-42.

NOTES DE FIN

.** Les ***municipios sont les communes dont dépendent les villages. Boleras, Escobar et la Posta dépendent du *municipio* de Guanacevi. Les *municipios* ont une taille comprise entre celle des arrondissements et celle des départements en France.
†. En dehors de Maurice, des Seychelles, de Djibouti, du Cap-Vert et de Sao Tomé.

AUTEUR

BÉATRICE INARD-LOMBARD

Géographe, agent de l'aménagement et de l'environnement à la mairie de Seyssins (Isère).

Encadré 3. Un contexte démographique et économique de transition

Démographie comparée de la Sierra Madre avec celle de deux autres régions agro-pastorales

Luc Descroix

---

1 *Le milieu anthropisé auquel on s'intéresse ici est aujourd'hui dans une situation originale de transition démographique et socio-économique. L'émigration a vidé les villages de leurs habitants et plus encore de leur force de travail, mais la surexploitation de l'espace persiste, voire s'aggrave du fait de la pression pastorale. Ce type de surexploitation des pâturages est-il représentatif d'une région ou d'une période ? Il est intéressant de voir ce qui se passe ou ce qui s'est passé, ailleurs dans un passé plus ou moins récent. Dans certaines régions, la surexploitation de l'espace fait partie du passé et les paysages montrent des signes évidents de dégradation dus à la déprise ; ailleurs, on observe seulement de nos jours les premières traces de surcharge pastorale. L'accès à l'eau et aux herbages est décidément un problème permanent de ces cultures.*

2 *Cette région est replacée dans le contexte global de la mondialisation qui a accéléré les migrations et les mutations des espaces dues à des causes lointaines. Une étude comparative est effectuée* avec deux autres régions d'économie agro-pastorale, *sur deux autres continents :*

- *les Préalpes du Sud où la « transition démographique » est achevée depuis longtemps et où la déprise rurale est aujourd'hui à l'origine de la plupart des problèmes d'aménagement ;*
- *le Boundou, région agro-pastorale du Sénégal oriental où la natalité et la croissance démographique sont encore très élevées et où l'espace est depuis quelques décennies occupé à 100 %, ce qui rend délicat un accroissement des ressources (*DESCROIX*, 2002).*

Surexploitation ou mauvaise gestion de l'espace : de la crise foncière à la déprise

Les Préalpes du Sud

3 *On constate que, dès le XVI^e siècle, les Archives des paroisses rurales des Alpes du Sud rapportent de nombreuses plaintes et demandes des responsables et des habitants portant sur les dégâts causés par l'érosion et la torrentialité, et les attribuant au trop grand nombre de troupeaux en alpages.*

4 *Au XIX^e siècle, les ingénieurs du Génie rural et des Eaux et Forêts ont tant et si bien fustigé le cheptel ovin et caprin, « destructeur des forêts », que le reboisement a été considéré comme le remède idéal à l'accentuation des ravages dus au ruissellement : on a peu à peu interdit d'immenses territoires aux troupeaux, et profité de la main-d'œuvre pléthorique des paysans obligés de réduire leurs troupeaux, pour effectuer les reboisements des parties les plus dégradées des versants. Mais la formidable progression des forêts est due à 80-90 % à la repousse spontanée des broussailles, puis des arbustes et des arbres (des pins essentiellement), sur les cultures et les pâturages abandonnés par les troupeaux.*

5 Le débat soulevé au XIX^e siècle sur le rôle des troupeaux dans la dégradation des terrains en montagne s'est poursuivi tout au long du XX^e siècle, animé par géographes, forestiers, administrateurs, historiens, les uns défendant les troupeaux, les autres les vouant aux gémonies ; il est clair qu'il y a eu surexploitation des terrains : surpâturage, mais aussi essartage inconsidéré et de nombreuses coupes à blanc sous l'effet de la pression démographique et de la « faim » de terre. Il s'agissait, c'est vrai, parfois, de constituer de nouveaux pâturages.

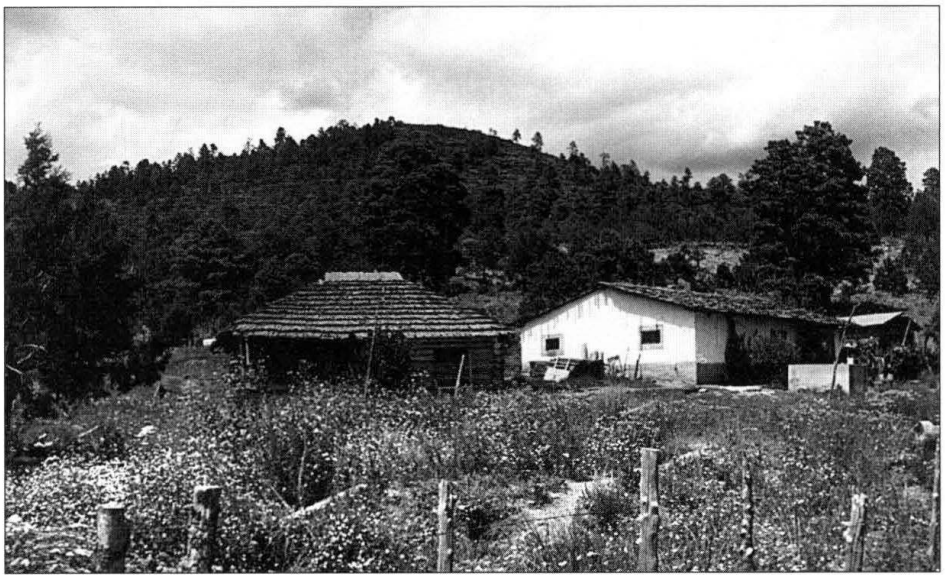
6 *Les ravines des « terres noires » sont très étendues et sont les stigmates omniprésents de cette période de surexploitation de l'espace. Elles continuent à être fonctionnelles (les marnes noires des bad-lands des Alpes du Sud connaissent une ablation de 5 à 10 mm/an), mais aujourd'hui, le plus préoccupant, c'est l'abandon des terrains, des terrasses, des canaux, des chemins, des haies, qui provoque, en plus d'une dégradation d'un paysage construit, des problèmes de stabilité des versants liés à la solifluxion. Le défaut d'entretien des drains et canaux, et l'accroissement des coefficients d'infiltration dû à l'embroussaillement sont des questions majeures qui se posent aujourd'hui à l'aménageur dans les Préalpes du Sud dépeuplées et désertifiées (même dans la vallée de Barcelonnette où on a observé le retour de certains émigrés, parfois enrichis, en particulier les « Mexicains »). On continue néanmoins de pratiquer l'élevage ovin traditionnel dans les Préalpes avec, suivant l'altitude, transhumance des troupeaux vers les Alpes en été, et, dans les secteurs les plus élevés, accueil des troupeaux de la plaine. Mais la charge pastorale, bien que localement en progression ces dernières années, est bien plus faible qu'au XIX^e siècle (et surtout que sous l'Ancien Régime, où les communautés rurales louaient leurs secteurs pastoraux aux éleveurs de Provence pour obtenir du numéraire). Elle s'exerce essentiellement sur des terrains abandonnés par l'agriculture, et non plus sur les terrains, bien plus pentus, qui surplombent ces anciens terroirs. Elle est passée de 1-2 ha par ovin à 2-4 ha/tête en un siècle, d'où la création de « contrats territoriaux » avec les éleveurs, afin qu'ils maintiennent l'espace ouvert (ALLAIRE et al., 1996).*

7 *Dans ces terrains bien plus résistants (rhyolites, en particulier), la même surexploitation des pâturages dans la Sierra Madre n'a pas entraîné les mêmes conséquences. Il semble, de fait, que le surpâturage y soit récent : si les grandes haciendas pratiquèrent en général l'élevage bovin (et bien souvent aussi l'élevage ovin), il apparaît d'après les témoignages recueillis auprès des habitants,*

qu'à partir de l'instauration des ejidos *il y ait eu, peu à peu (sans qu'on puisse en déterminer la cause : mauvaise gestion des pâturages ou réelle surcharge pastorale), amenuisement des réserves fourragères et, souvent, érosion des sols. Ceux-ci, de fait, apparaissent dès le début de la saison sèche parfois, souvent à nu sur des étendues de plus en plus grandes autour des villages, alors que, à 2 ou 3 km seulement des villages, des pâturages intéressants restent inexploités. Les ravines sont assez rares dans le paysage et semblent autant dues à des concentrations de l'écoulement (caniveaux, drains) en liaison avec la construction des routes ou avec les cultures qu'au surpâturage.*

Le haut bassin du Nazas

Chemin desservant les hameaux isolés de la sierra La Concepción au-dessus de Tepehuanes.



Le petit hameau de Toro Quemado au-dessus de Tepehuanes, très isolé au centre de la Sierra Madre occidentale.

8 *Comme c'est le cas dans les Alpes (surtout hors Préalpes), le piétinement du bétail se traduit par la formation de petites terrasses parallèles, appelées « pieds de vache »* ou *parfois mais à tort « terrassettes » (c'est le terme utilisé ici par analogie au terme espagnol, voir* DERRUAU *1974, où la distinction entre pied de vache et terrassette est très clairement décrite) sur les versants, de 20 à plus de 45° parfois (comme à La Posta de Jihuites). On les trouve même dans des secteurs qui ne semblent plus surpâturés aujourd'hui, témoignant peut-être des anciennes surcharges pastorales.*

9 *On observe aussi que les abords des routes (et, en particulier, l'espace compris au bord des routes, entre la chaussée et les clôtures de barbelé) sont souvent bien plus pâturés que les pâturages voisins, ce qui pourrait être dû à l'abondance de l'herbe favorisée par l'eau venue de l'**impluvium** formé par la route.*

10 *Par ailleurs, bien souvent, les limites* d'ejidos, *ou, dans un même* ejido, *les limites de* **potreros** *(vastes enclos de pâture pour le bétail) se voient très bien dans le paysage par la différence de pacage de part et d'autre des barbelés, l'un des côtés montrant un sol quasiment nu du fait du surpâturage, l'autre côté conservant un abondant manteau herbeux.*

11 Le surpâturage semble se poursuivre aujourd'hui, le nombre de vaches se maintenant, sans qu'il y ait extension des pâturages ni modification de la gestion. À noter que certains *ejidos* (comme Pilitas) sont suffisamment étendus pour que les éleveurs passent les mois de saison des pluies dans un ***rancho*** situé dans une partie lointaine de l'*ejido* pour soulager les pâturages proches du village, suivant le même principe que celui des montagnettes et des alpages dans les Alpes, mais sans aucun étagement altitudinal : cela permet de profiter des pâturages les plus éloignés du village, à plus d'une journée de marche. La charge pastorale théorique est en moyenne de 5 ha par vache (UGB), mais le manque de points d'eau amène souvent à de trop grandes concentrations autour des villages et des ***arroyos***. Comme la charge souhaitable est de 15 ha/UGB en moyenne, la densité est trois fois trop élevée.

12 De *plus, la forêt, sans reculer (les coupes à blanc sont interdites au Mexique), perd une grande partie de sa valeur économique et dans d'immenses secteurs la forêt de pins, fierté de l'État de Durango, est cinq à dix fois moins dense qu'à l'état naturel. En revanche, dans les secteurs*

surpâturés (savane à chênes), le nombre d'arbres a été multiplié par 2 et même par 4 de 1974 à 1994. Cette augmentation ne concerne que de jeunes pins, et non des chênes qui sont la formation climacique. Cette reconquête très rapide par les pins serait en fait un signe de dégradation de l'écosystème, les jeunes pins, non appétants pour le bétail et n'étant plus concurrencés par l'herbe disparue, peuvent pousser alors que les chênes sont broutés très rapidement.

13 *Une série d'années sèches et très sèches (1994, 1995, 1997, 1998, 1999, 2000 et 2001) et la Réforme agraire de 1992 (rétablissant la propriété privée sur toutes les zones rurales) ont accéléré le processus migratoire (cf. « Une montagne en voie d'abandon ? », p. 65).*

14 *La surexploitation semble installée depuis des décennies, et l'état des sols (cf. 3e partie) laisse peu de doute sur celle-ci ; il est d'autres régions où les traces de surexploitation des pâtures sont récentes (parfois dues à la sécheresse) mais pourraient aussi conduire à de graves modifications du milieu. Ce type de surexploitation est encore plus sévère dans un autre système agro-pastoral tropical, le Sahel, où la croissance démographique, supérieure à 3 %/an en zones rurales, exacerbe les conflits pour l'espace et pour les ressources.*

Le Boundou

15 *Dans cet ancien royaume du Sénégal oriental, situé au contact de la vallée de la Falémé, affluent de gauche du Sénégal à la frontière avec le Mali, l'économie pastorale est confrontée chaque jour davantage à la diminution de surface des pâtures au profit des cultures.*

16 *Bien qu'ils soient installés sur des plateaux extrêmement plats, les villages du Boundou (Goudiry Foulbé, Sinthiou Boubou, Sinthiou Alassane, Doulouyabé, Dakaba ont entre 50 et 350 habitants) n'en connaissent pas moins des problèmes de dégradation des sols, en partie liés à la gestion des troupeaux. La charge pastotale est ici de 5-6 ha par bovin ; pendant l'hivernage (saison des pluies de juillet à octobre), le troupeau est au village ; de fin octobre à février (saison sèche fraîche), le troupeau part en « petite transhumance » à 5 ou 30 km vers le sud-est (en direction de la vallée de la Falémé). De mars à juin (saison sèche chaude), 30 % du troupeau part en « grande transhumance », également vers le sud-est dans un rayon de 50 à 130 km, les autres bêtes restant au village. Les points d'eau sont assez rares, et de ce fait, le piétinement dans leurs alentours est important : les photographies aériennes de la zone soudano-sahélienne montrent la convergence des sentiers du bétail vers ces points d'eau, et les tâches de plusieurs km² parfois de sol nu qui les entourent, du fait de la surcharge pastorale. Entre 1953 et 1982, on a observé :*

- *la progression (à peu près proportionnelle à la croissance démographique) de 50 à 100 % de la superficie des terroirs villageois : champs de case et surtout champs de villages ;*
- *la stabilisation, voire la régression de la superficie des champs de brousse (ouverts dans la forêt claire tous les 2-3 ans et abandonnés ensuite plusieurs décennies à la repousse, - jachère longue -) ;*
- *l'extension rapide des zones ravinées autour des villages, surtout sur les rebords des plateaux, là où le bétail passe quotidiennement pour aller s'abreuver aux points d'eau (les puits sont, logiquement, situés dans les bas-fonds).*

17 *La surcharge pastorale n'est pas trop forte en temps normal : il y a globalement équilibre entre ressources et bétail. Mais le nombre d'années sèches ayant beaucoup augmenté ces dernières décennies, une nette surexploitation des pâturages est apparue ; la conséquence première a été la surmortalité bovine. Malgré tout, le cheptel s'est assez vite reconstitué grâce à l'argent de l'émigration, après les plus dures années de sécheresse. Cette dégradation s'observe partout au Sahel, mais elle est plus drastique lorsque le prélèvement herbager s'accompagne d'un déboisement destiné à alimenter les villes en bois de cuisine (comme autour de Dakar ou de Niamey).*

18 *Le point commun des trois types d'exploitation et des dégradations constatées sur l'espace rural est* le surpâturage. De *fait, l'élevage extensif est habituellement l'activité dominante des zones rurales peu peuplées. Dans la phase antérieure à la transition démographique, les sociétés rurales connaissent un accroissement des densités de population qui se traduit par une intensification d'un système souvent ancien mais adapté à de faibles densités. Cette évolution provoque assez rapidement une diminution de la productivité des herbages.*

Conséquences de la déprise et de la mauvaise gestion de l'espace

19 *La dégradation des terroirs et des écosystèmes est le fait autant de la surexploitation que, parfois, de la déprise. Si la situation des Préalpes du Sud évoque une évolution biostasique croissante, du fait d'un fort développement de la surface boisée, elle n'en cache pas moins un profond problème de stabilité des terrains et de certaines formations végétales secondaires, dont la présence est liée à la déprise agricole. L'évolution vers les formations primaires ou climaciques est-elle assurée, ne va-t-on pas vers un enrésinement qui pourrait apporter d'autres déséquilibres (incendies, invasions par la chenille processionnaire, etc.) ? La progression très rapide du manteau forestier et des broussailles semble aller de pair avec l'accroissement des déséquilibres du terrain. Ceci est lié à la fois au manque d'entretien des terroirs (drains, canaux, murets, etc.) et à la progression du couvert végétal qui accroît l'infiltration des eaux.* Ces *processus ont aussi pu être observés dans les Alpes du Nord.*

20 Malgré un renouveau démographique constaté localement depuis une vingtaine d'années, et lié au développement d'activités de loisir, la déprise est ici totale. Elle se traduit par une baisse de la population, une diminution importante du cheptel, un défaut d'entretien des terroirs et une reconquête de la forêt et également par des déstabilisations de versants.

21 *Dans la Sierra Madre occidentale, des déséquilibres flagrants se font jour depuis quelques décennies, mais on est là dans une phase de surexploitation de l'espace : surpâturage et déboisement massif entraînent (comme au XIX^e siècle en France et au moment du maximum démographique, semble-t-il) une dégradation des sols qui elle-même rendra plus difficile la reconstitution des ressources fourragère ou forestière. La sensible progression du nombre des arbres sur les parcours (ceux qui voient la formation des « terrassettes » de surpâturage) est en fait un signe de dégradation, puisqu'ils témoignent d'une disparition de la concurrence de l'herbe pour la pousse des jeunes pins. Les revenus de l'extérieur permettent un niveau de vie amélioré, ce qui pour le moment a évité une crise ouverte due au manque de ressources renouvelables.*

22 Dans ce cas, la déprise est partielle ; on assiste à une très forte diminution de la population par émigration (dans certains villages, les trois quarts des maisons sont abandonnées), mais le cheptel se maintient, et avec lui le surpâturage, qui s'aggrave même du fait que les pâturages sont de moins en moins bien gérés, faute de main-d'œuvre.

23 *Au Sénégal oriental, le cumul de la croissance démographique restée forte et des années de sécheresse a provoqué un déséquilibre du* système *agraire traditionnel, basé sur l'élevage extensif, l'agriculture villageoise et l'agriculture itinérante sur brûlis. La jachère longue a dû être raccourcie, les troupeaux augmentés peu à peu, avant l'apparition de la terrible sécheresse des années 1968-1985. Cela s'est traduit par une exploitation accrue d'un système dont la production primaire baissait alors pour des raisons climatiques. La dégradation des formations végétales est*

difficile à cartographier, mais l'extension des zones érodées, au rebord des plateaux en particulier, est visible dans le paysage : elle est bien le signe d'une surexploitation qui n'aurait peut-être pas été mise en évidence immédiatement, sans la péjoration climatique de ces dernières décennies.

24 La pression sur le milieu se maintient et s'accroît même localement, du fait d'une hausse de la population (et du cheptel) ; surpâturage et surexploitation devraient se poursuivre les prochaines années, et le risque d'une crise sociale est élevé, en particulier en cas de nouvel épisode de sécheresse.

25 *On peut donc clairement distinguer les trois régions et illustrer leur évolution en terme d'occupation de l'espace. Cette évolution est schématisée par la figure III. Le Boundou (chiffre 1) commence à peine sa transition démographique, et l'utilisation de l'espace y est régie par le besoin d'alimenter un nombre croissant d'habitants : l'espace cultivé croît, bien que de manière très modérée. L'accélération dans la rotation des cultures et la baisse des rendements agricoles concomitants n'apparaissent pas. En revanche, la figure III montre clairement que la pression sur l'espace se traduit par une dégradation des sols (augmentation des secteurs érodés). Les communes de la Sierra Madre (chiffre 2) ont entamé depuis deux ou trois décennies leur transition démographique ; mais elles ont été presqu'aussitôt vidées d'une grande partie de leurs habitants, ce qui n'empêche pas le maintien du surpâturage et une déforestation rapide (la vente des lots de bois rapporte des sommes supplémentaires aux villageois). « Les cailloux poussent », ainsi s'expriment les habitants de la sierra devant l'amincissement des sols liés au surpiétinement. Cette expression était courante également au XIX^e^ siècle dans les Alpes du Sud (chiffre 3), région où la transition démographique est achevée, et où les problèmes de stabilité des terrains, souvent liés à un défaut d'entretien de l'ancien terroir, ont remplacé les ravinements et la torrentialité qui a donné bien du fil à retordre aux générations de paysans jusqu'au début du XX^e^ siècle. Le reboisement, surtout spontané, y est la conséquence la plus visible de la déprise.*

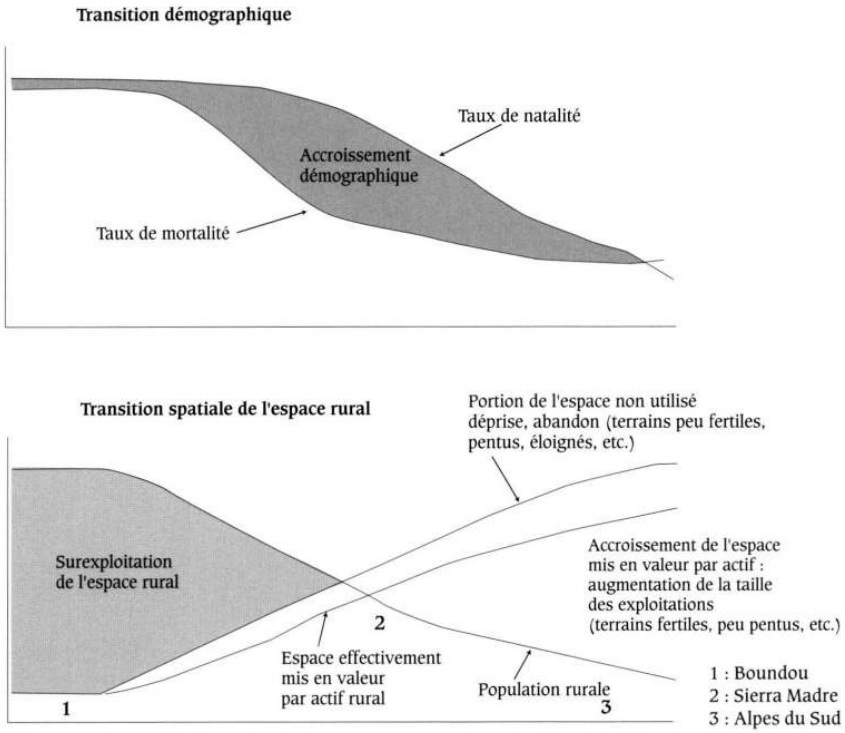


Fig. III – Transition démographique et transition spatiale de l'utilisation de l'espace rural.

Conclusion

26 *L'occupation de l'espace et l'équilibre des ressources sol-végétation-eau qui en résulte dépendent bien sûr des conditions naturelles et des conditions d'exploitation du milieu. Ils dépendent beaucoup de la manière dont l'utilisation de l'espace se développe en fonction des conditions naturelles.*

27 *À ce sujet on peut facilement distinguer :*

- *un Mexique du Nord « neuf », ancienne « frontière » où l'homme a parfois gardé l'esprit pionnier qui fait que la ressource (l'espace, le sol, la végétation, l'eau, les richesses minérales, etc.) est souvent appropriée par le premier qui l'utilise (comme dans le cas de ce qui est devenu entre temps le modèle de l'Ouest américain) ;*
- *un Mexique du Centre et du Sud où de très anciennes civilisations (l'irrigation est attestée depuis plus de trois millénaires dans la vallée de Tehuacán (États de Puebla et Oaxaca) et l'agriculture depuis plus de 2 000 ans dans les alentours de México) ont à la fois façonné les paysages et permis aux paysans et aux habitants d'adapter les systèmes culturaux aux conditions naturelles : les andosols y sont à la fois très riches et fertiles mais fragiles et ils nécessitent des pratiques demandant une forte intensité de main-d'œuvre à l'hectare afin de réserver ces bonnes conditions naturelles.*

28 *La Sierra Madre occidentale est jusqu'à maintenant typique du premier groupe, car les populations amérindiennes qui l'occupent parfois depuis des millénaires n'ont été sédentarisées que récemment. En dehors des enclaves minières (celles qui ne sont pas devenues des villes fantômes se sont transformées en grandes exploitations à ciel ouvert), la colonisation « mexicaine » pourtant très récente (un siècle au maximum sous forme d'haciendas, une cinquantaine d'années de système* ejidal,) *n'a mis qu'une ou deux générations à arriver à la surexploitation de l'espace.*

BIBLIOGRAPHIE

Références

ALLAIRE G. (éd.), HUBERT B. (éd.), LANGLET A. (éd.), 1996 – *Nouvelles Jonctions de l'agriculture et de l'espace rural. Enjeux et défis identifiés par la recherche.* Paris, Inra-DIC, 313 . (Actes du colloque final de l'Action Incitative Programmée 1993-1995)

DERRUAU M. 1974 – *Précis de géomorphologie.* Paris, Masson, 452 p.

DESCROIX L., 2002 – Le rôle de l'homme dans l'entretien et la dégradation des sols des régions à faible densité de population, analyse à travers trois cas de figures. *Revue de Géographie du Québec,* (46), 128 : 215-235.

AUTEUR

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

Le projet Hervideros

Un regard sur le passé préhispanique de la Sierra Madre occidentale du Durango, Mexique

Marie-Areti Hers et Oscar J. Polaco

Une région frontalière

1 En 1992, la *Universidad Nacional Autónoma de México* commençait le projet *Hervideros* (mot signifiant « fourneaux ») dans le but d'étudier l'histoire ancienne d'une région aux confins septentrionaux de la Méso-Amérique : la portion nord de la Sierra Madre occidentale de l'État de Durango[1].

2 Rappelons tout d'abord que l'aire dite « méso-américaine » correspond à l'ensemble culturel et linguistique qui comprend le sud du Mexique et le nord-ouest de l'Amérique centrale ; elle regroupe les grandes civilisations telles que celles des Toltèques, des Olmèques, des Mayas, des Totonaques, des Aztèques, etc.) ; elle a connu de fortes fluctuations sur sa frontière septentrionale. Durant le premier millénaire de notre ère, elle a atteint son extension maximale, suivie à partir du IX^e^ siècle de divers mouvements de contraction et expansion. À l'arrivée des Espagnols, la frontière se trouvait des centaines de kilomètres plus au sud, le long des fleuves Lerma-Santiago y Moctezuma-Pánuco. Au-delà de cette limite, l'immense territoire était occupé par des peuples nomades, appelés génériquement les Chichimèques. De l'ancienne Méso-Amérique septentrionale ne restait plus que la partie correspondant à la Sierra Madre occidentale et à la côte du Pacifique. Ainsi, tout au long de cette histoire fort mouvementée, la Sierra Madre occidentale a joué un rôle d'intermédiaire pour l'avancée vers le nord des peuples et du mode de vie méso-américains et pour l'établissement des liens avec les lointaines contrées de ce que l'on appelle actuellement le sud-ouest des USA (et que nous nommerons ici « South West » pour éviter des confusions).

3 Pour comprendre la dynamique d'une frontière aussi fluctuante dans le temps et dans l'espace, il était indispensable de couvrir une région très vaste qui témoigne à la fois de la grande variété des milieux naturels qu'offre la cordillère et de la diversité des peuples et

cultures mis en contact dans cette zone frontalière. De ce fait, le projet fut divisé en une dizaine de sous-projets dont les aires de recherches respectives se sont distribuées sur une étendue d'environ 200 km nord-sud et est-ouest et qui comprend tant les vallées du flanc oriental, que les hautes terres froides de la partie centrale de la sierra et les profondes ***quebradas*** (canyons) du versant ouest[2].

4 Dans la Sierra Madre occidentale, la présence méso-américaine ne s'est pas traduite, comme ailleurs, par de grandes villes avec pyramides et palais somptueux. Elle se reconnaît néanmoins par des caractéristiques essentielles comme une économie basée sur le maïs, une organisation sociale propice à une forte humanisation de l'espace constitué surtout de terrasses, et un réseau commercial complexe et dense sur de très grandes distances. Cette présence se distingue par un bagage technologique particulier en ce qui concerne l'industrie lithique et la céramique, un ensemble de croyances religieuses, de pratiques rituelles et de symboles qui se reconnaît au-delà de ce qui fut probablement une grande diversité ethnique et linguistique.

5 Dans leur avancée vers le nord, ces Méso-Américains frontaliers sont rentrés en contact avec des peuples fort différents. À l'est, en particulier dans le bassin du Nazas en aval de la confluence des fleuves Ramos et Santa Maria del Oro et juste à l'est de la lagune de Santiaguillo, les terres étaient trop arides et inhospitalières pour les agriculteurs méso-américains, mais elles accueillaient des peuples nomades de chasseurs-cueilleurs qui n'ont pas encore fait l'objet d'études (fig. 12).

6 À l'ouest, l'archéologie de la plaine côtière du Sinaloa est encore très mal connue. On y a détecté de fortes fluctuations de la frontière culturelle méso-américaine, mais on ignore encore pratiquement tout des occupants non méso-américains. Durant plus d'un millénaire, la limite apparente du territoire fut le bassin du río Piaxtla dans la portion sud de l'État. Puis, entre le X^e^ et le XIII^e^ siècle, à l'inverse de ce qui s'est passé sur le plateau central, a eu lieu une formidable expansion, sur plus de 300 km, jusqu'au río Fuerte à la limite actuelle des États de Sinaloa et de Sonora. Finalement, quelque temps avant l'arrivée des Espagnols en 1530, on constate une contraction vers le sud sur près de 200 km, jusqu'au bassin du río Culiacán. Là, les troupes du conquérant Nuño de Guzman arrivèrent à l'ancienne Culiacán, ville commerciale prospère et dernier bastion méso-américain sur la longue route qui menait aux lointaines terres de Cibola (Zuñi, dans l'actuel Nouveau-Mexique) (fig. 12).

7 Au nord, au-delà du Durango colonisé par des peuples méso-américains, il faut traverser le vaste État actuel de Chihuahua, encore très mal connu, avant d'atteindre le territoire des peuples de cultures Hohokam et Pueblo Ancestral[3] du South West avec lesquels les Méso-Américains septentrionaux de culture chalchihuites ont entretenu de fortes relations. Il est fort probable que ces liens se soient établis par des sentiers le long de la Sierra Madre occidentale considérée, à juste titre et comme le projet *Hervideros* l'a amplement confirmé, comme la voie naturelle la plus favorable (fig. 12 et 13). C'est dans le bassin du haut rio Florido, à la limite actuelle entre le Durango et le Chihuahua, près de la bourgade de Villa Ocampo, que se trouve le site de Loma San Gabriel, l'établissement méso-américain de culture chalchihuites le plus septentrional reconnu pour l'instant. À partir de là, s'ouvrent deux routes possibles pour atteindre le South West. Au nord, le flanc oriental de la Sierra Madre occidentale, et au nord-est, l'ample bassin du río Conchos dont fait partie le Florido et qui traverse les terres arides du Chihuahua pour rejoindre un des axes principaux de l'aire culturelle du South West, le rio Grande ou Bravo (fig. 12).

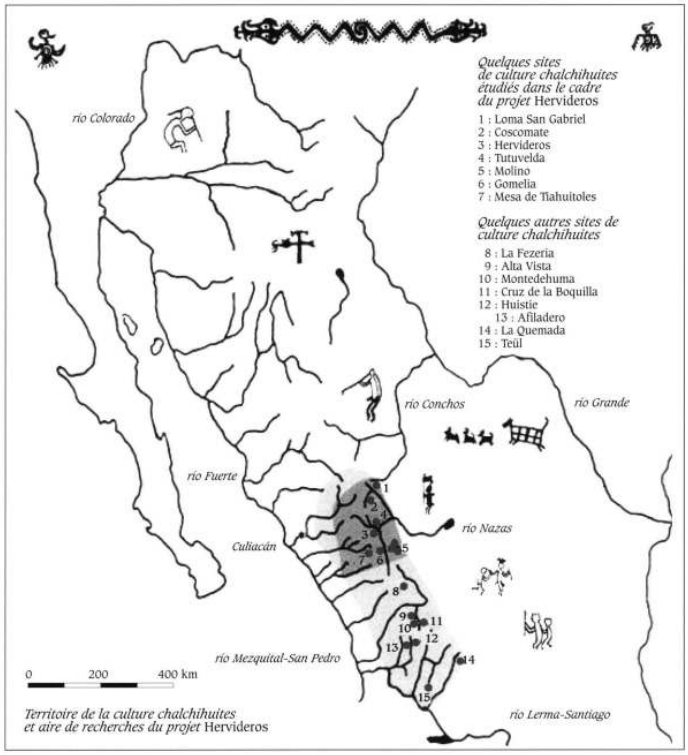


Fig. 12 – Projet *Hervideros* dans le contexte général de la Méso-Amérique et du sud-ouest des USA.

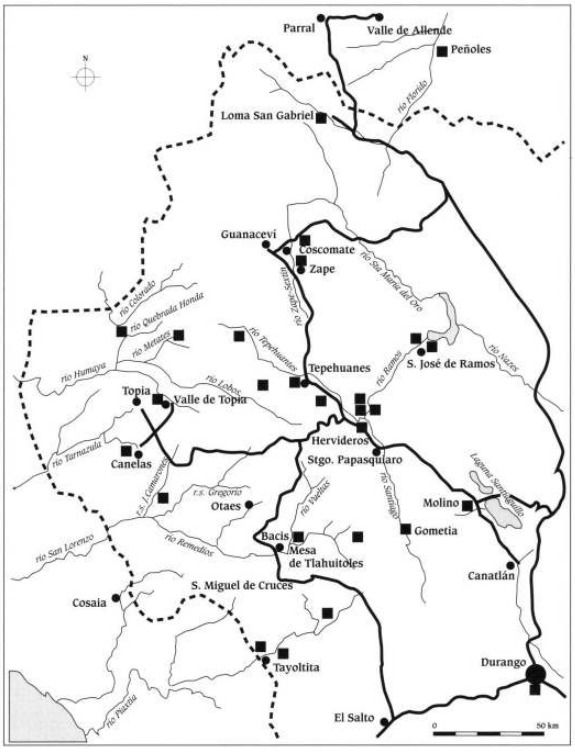


Fig. 13 – Aire du projet *Hervideros* dans le nord-ouest du Durango.

8 En plus des routes naturelles qui ont mis les peuples des confins mésoaméricains du Durango en contact avec les ancêtres des Indiens Pueblos, comme nous le verrons, le Nord

et, en particulier le bassin du rio Fuerte, ont signifié aussi pour la Sierra du Durango la voie d'entrée des Tepehuanes originaires des terres arides du Sonora.

Un projet interdisciplinaire

9 Pour comprendre la Sierra Madre occidentale comme agent actif de l'histoire, en raison des défis qu'elle présente à l'occupation humaine et des opportunités qu'offre son extrême variété de ressources, la perspective interdisciplinaire était indispensable. Les recherches ont donc porté sur l'archéologie et l'histoire de l'art ainsi que sur les paléo-environnements. Nous en présentons ici les principaux résultats[4].

Une période ancienne mal connue

10 L'étude des occupants antérieurs à la présence méso-américaine est difficile parce que leurs vestiges, en surface, se résument à des concentrations de matériaux lithiques. Les études, encore en cours, concernent certains de ces sites et une série d'ensembles de peintures rupestres (FORCANO I APARICIO, 2000 : 489-510 ; BRANIFF et *al.,* 2001 : 65-70). D'une manière fort préliminaire nous pouvons attribuer à ces anciens occupants de la sierra un rôle important à un niveau macro-régional. C'est par leur intermédiaire qu'a dû se transmettre la tradition agricole mésoaméricaine jusqu'au sud-ouest des USA durant le premier millénaire avant notre ère. En effet, les anciennes manifestations d'art rupestre témoignent de contacts avec le South West. Il s'agit d'un art essentiellement abstrait, caractérisé par de longues bandes horizontales coupées d'éléments verticaux où s'intercalent des motifs astraux, des pointes de projectiles ou quelques animaux. La superposition de motifs chalchihuites sur certaines de ces anciennes peintures rupestres témoigne de leur antiquité.

11 Ce sont ces peuples qui, d'une certaine manière, ont freiné durant la première moitié de notre ère l'avancée méso-américaine le long de la Sierra Madre. En effet, dans la portion méridionale de la cordillère (États de Zacatecas, Jalisco), depuis le début de l'ère avait fleuri une culture originaire du Sud et pleinement méso-américaine, appelée chalchihuites. Ainsi durant près d'un demi-millénaire, l'unique fleuve qui traverse la cordillère, le Mezquital-San Pedro, a joué un rôle de frontière dont la nature et la dynamique nous échappent encore complètement. Sur le haut bassin de ce fleuve, s'étend un immense champ de lave, appelé La Breña, à la confluence d'affluents provenant du nord et du sud.

La colonisation méso-américaine de la culture chalchihuites

12 Les affluents du Sud irriguent une partie importante du territoire chalchihuites[5] colonisé dès le début de l'ère, et dont les vestiges se retrouvent par exemple sur les sites de Cruz de la Boquilla, près de Sombrerete, de Cerro Montedehuma près de Gualterio ou d'Alta Vista près de la petite ville de Chalchihuites (fig. 12). Au contraire, les affluents qui proviennent du nord et du nord-ouest traversent des terres sur le piémont oriental de la cordillère où l'on ne reconnaît aucune trace de population méso-américaine antérieure à 600 de notre ère. Il est difficile de savoir le rôle joué par La Breña au cours de cette longue période durant laquelle les colonisateurs ont freiné leur avance le long du flanc oriental de la Sierra Madre. Toujours est-il que vers 600 de notre ère, la Sierra du Durango a connu

des changements considérables. Les colonisateurs chalchihuites ont pénétré dans La Breña et y ont laissé une marque indiscutable de leur présence. Ils ont gravé sur le sol de lave, des doubles cercles semblables à ce que l'on considère comme des marqueurs astronomiques caractéristiques de la grande ville de Teotihuacán. On peut dès lors considérer que l'expansion chalchihuites dans le Durango est liée en quelque sorte à la grande diaspora culturelle qui a suivi la fin tragique de cette grande métropole à la fin du VI^e^ siècle et qui se retrouve dans les régions les plus diverses de la Méso-Amérique. D'une certaine manière, par leur caractère de marqueurs spatiaux-temporaires à la hauteur du tropique du Cancer, ces gravures sur le sol de La Breña renferment la signification symbolique que revêtaient probablement pour les Méso-Américains les horizons illimités du septentrion. Malheureusement, nous sommes encore loin de pouvoir la déchiffrer.

13 On ignore encore les motifs qui poussèrent ces peuples du Sud à occuper tout le nord-ouest du Durango, avec ses vallées qui longent le flanc oriental de la Sierra Madre, ses terres hautes et froides couvertes de pins et ses *quebradas* extrêmement escarpées qui se succèdent sur le versant ouest, dominant la plaine côtière. Par ailleurs, le caractère d'intrusion coloniale est attesté par le trait abrupt de cette présence méso-américaine, sans antécédents locaux. Au contraire, l'origine méridionale de ces nouveaux occupants est, elle, solidement confirmée par les similitudes évidentes que l'on constate dans tous les domaines comme, par exemple, la structure de l'habitat, l'architecture, l'industrie lithique, ou la céramique.

14 Par l'abondance de vestiges de toutes sortes et par la forte humanisation de l'espace naturel qui les caractérise, ces peuples chalchihuites originaires du Sud sont les plus faciles à étudier. En effet, malgré l'absence d'une architecture monumentale caractéristique de la Méso-Amérique nucléaire, les vestiges sont abondants et facilement détectables. Les terrasses d'habitat qui se succédaient sur les flancs et les sommets des élévations choisies pour assurer la sécurité des sites d'habitats et les plates-formes qui soutenaient chacune des constructions sont en général bien conservées. Elles ont ainsi protégé efficacement les sites de l'érosion et les fondations en pierre des divers types d'édifications restent encore bien visibles en surface, ce qui permet de lever des plans précis et relativement complets des établissements. Au moyen de ces plans nous disposons en quelque sorte de fenêtres ouvertes sur l'organisation sociale de ces populations, avant même d'entreprendre des fouilles. De plus, les remblais de ces terrasses et de ces plates-formes regorgent de vestiges en tous genres (outillage lithique et restes de céramique, mais aussi matériaux moins résistants comme ossements, fragments de murs et de sols en terre crue, foyers, restes végétaux). Finalement, la coutume méso-américaine d'enterrer les morts sous le sol de la maison et de rester ainsi en étroite relation avec les ancêtres permet de localiser facilement les inhumations et la riche documentation qui les accompagne.

15 Nous savons de la sorte que les colonisateurs méso-américains provenaient du territoire chalchihuites au sud. La manière dont les sites s'inscrivent dans le paysage nous permet de reconnaître les routes qu'ils ont suivies pour occuper le vaste territoire. La partie de la sierra la plus favorable semble avoir été celle des vallées du flanc oriental où les établissements se succèdent le long des cours d'eau. Néanmoins, ces agriculteurs se sont adaptés aussi aux terres froides des hauteurs et dès le début, ils ont commencé à s'installer dans les profondes *quebradas.*

16 L'ampleur des sites varie considérablement selon la qualité des terres disponibles et les ressources pour assurer un système efficace de défense. Leur étendue oscille de la sorte

entre 0,5 et plus de 30 ha. Dans tous les cas, l'unité de base est le ***patio*** ou espace ouvert et aplani de plan quadrangulaire, entouré de longues plates-formes disposées en angle droit et destinées à soutenir les constructions. Entre celles-ci, on établit difficilement une hiérarchie qui permette de distinguer le temple ou la demeure de quelque dignitaire d'une simple maison. En général, la façade est pourvue d'une étroite banquette qui semble avoir servi de base à un portique derrière lequel s'alignent deux à quatre pièces contiguës. Souvent, au centre du *patio*, se dressait un petit autel quadrangulaire soutenu par une plate-forme peu élevée. Quelle que soit l'étendue des sites, ils sont tous formés d'une agglomération de *patios* refermés sur eux-mêmes qui semblent avoir correspondu aux unités parentales qui structuraient une organisation sociale, de prime abord largement égalitaire sur le plan économique mais, comme le suggère l'art rupestre, fort complexe sur le plan religieux et/ou politique.

17 Certains types de constructions ont un caractère public et cérémoniel bien marqué. Il s'agit, par exemple, du jeu de balle qui, dans ces confins de la Méso-Amérique, avait une forme particulièrement simple. Il s'agit de deux plates-formes parallèles, basses et étroites qui encadraient une aire de jeu fort modeste, en moyenne de 4 à 5 m de large sur une douzaine de long. Ces dimensions modestes nous révèlent que les équipes devaient sans doute se réduire au strict minimum, probablement seulement à deux joueurs de chaque côté, et c'est ainsi d'ailleurs que se trouve représentée une partie de jeu de balle sur un site de gravures rupestres chalchihuites des centaines de kilomètres plus au sud, sur le haut río Chapalagana. Ces jeux de balle se retrouvent sur certains des sites les plus grands mais aussi sur des petits hameaux. Ils attestent de la présence dans ces confins d'une activité sportive, à la fois rituelle et religieuse qui avait gardé toute son importance à l'arrivée des conquérants espagnols, comme nous le rapportent les témoignages des missionnaires jésuites parmi les Indiens xiximes et acaxees. La pratique du jeu de balle, qui a de profondes racines dans la Méso-Amérique nucléaire, s'est répandue jusqu'au sud-ouest des USA avec des formes architecturales diverses et est considérée comme un des éléments les plus éloquents des relations du South West avec l'aire méso-américaine, sans aucun doute établies par l'intermédiaire des colonisateurs chalchihuites du Durango.

18 Un autre type d'espace cérémoniel se retrouve entre autres à Hervideros, à la confluence des rios Santiago et Tepehuanes et à la Chancaca, en aval d'Hervideros, près de San José de Ramos (fig. 13). Il s'agit dans chaque cas de constructions fort simples et très amples : un espace quadrangulaire de plus de 30 m de côté, au sol plat et dégagé, entouré d'un simple mur bas et étroit. Nous en ignorons la fonction précise mais ces espaces semblent fort propices à de grandes assemblées.

19 Ailleurs encore, comme sur le site de La Ferreria, dans la vallée de la ville de Durango et sur une série de sites sur les hautes terres, le sommet rocheux a été mis à profit pour lui donner l'apparence d'une grande pyramide en adossant à ses quatre flans une succession d'échelons rectilignes.

20 Sur d'autres sites, comme à Molino dans le bassin du lac de Santiaguillo, on reconnaît les espaces publics par l'ampleur exceptionnelle de certains *patios* qui ont dû être le siège de cérémonies particulièrement importantes (TSUKADA, sous presse).

21 Dans ces cérémonies, deux aspects de l'existence de ces colonisateurs devaient sous doute se refléter : la guerre et le rythme saisonnier du maïs. La guerre devait avoir une certaine importance dans leur existence, dans la mesure où les systèmes de défense ont marqué clairement la manière dont ils se sont installés dans le paysage. Ceci est surtout visible sur le flanc oriental de la sierra, c'est-à-dire celui exposé aux possibles incursions des groupes

nomades qui occupaient les terres proches plus à l'est, là où la sécheresse constituait une barrière infranchissable pour les agriculteurs méso-américains. L'accent est mis principalement sur le contrôle visuel ; ainsi les établissements occupent les hauteurs d'où l'on domine les panoramas les plus amples et où l'on peut voir une série de sites complémentaires afin de contrôler les mouvements sur une grande distance aux alentours. Dans certains cas, des murs protecteurs viennent renforcer les dispositifs défensifs. Sur les hautes terres froides, les colonisateurs ne semblent pas avoir dû se protéger car les établissements n'ont pas de système défensif tandis que dans les *quebradas*, certains établissements situés sur des lieux particulièrement escarpés nous indiquent une situation aussi précaire que dans les vallées orientales.

22 Le maïs et le rythme des saisons et des travaux agricoles étaient fort probablement à la base de toute leur vie cérémonielle. Dans les vallées orientales, l'emplacement des sites nous indique en toute clarté que ces colonisateurs suivaient leurs traditions du Sud et leurs préférences pour les terres où l'on pouvait pratiquer les cultures humides et l'irrigation. Il ne s'agissait certes pas d'œuvres de canalisation importantes. On n'en a trouvé aucune trace et la force torrentielle de ces fleuves de montagne les aurait d'ailleurs immanquablement effacées. Il s'agissait d'ouvrages d'irrigation modestes, refaits chaque année et destinés à apporter un supplément d'eau face aux pluies souvent capricieuses sous ces horizons, une garantie minimale de succès face aux rigueurs de la sécheresse pour obtenir une récolte par an.

23 Nous n'avons certes aucune preuve directe de cette pratique modeste mais efficace d'irrigation. Nous disposons seulement des indices indirects que nous procure la structure de l'habitat tournée décidément vers les terres irrigables et organisée en établissements relativement denses et stables. De la sorte, le panorama est assez semblable à celui de l'habitat actuel et contraste fortement avec celui des Tepehuanes, qui, comme nous le verrons, étaient ouvertement tournés vers l'agriculture exclusivement pluviale.

24 Pour l'instant, ce sont les fouilles dans les abris rocheux de Zape Chico qui ont fourni le plus d'informations sur les cultigènes et les plantes sylvestres utilisées par ces colonisateurs méso-américains[6]. En plus d'une grande variété de haricots et de cucurbitacées, le maïs domine la triade traditionnelle de l'alimentation méso-américaine et est représenté, entre autres par les variétés appelées Cristalina de Chihuahua, Harinoso de Ocho, Pima-Papago, Onaveño, Reventador, Chapalote, et Toluca Pop. Le fait que ces colonisateurs aient réussi aussi à adapter leurs cultures aux rigueurs du climat des terres hautes (altitude moyenne de 2 200 m) démontre la riche tradition agricole dont ils étaient les héritiers (PUNZO, 1999 et sous presse ; BARBOT et PUNZO, 1997).

25 Ces cultigènes sont encore pour la plupart en usage dans la région et jusque dans le South-West. Il faut néanmoins préciser que comme il s'agit de vestiges qui ne remontent pas au-delà du VII^{e} siècle de notre ère, ils ne peuvent nous éclairer sur la longue et complexe histoire des origines de l'agriculture dans le South West où l'on dispose de preuves de pratiques agricoles beaucoup plus anciennes. De la sorte, tout est encore à faire pour documenter la manière dont s'est transmise l'agriculture à partir de la Méso-Amérique nucléaire dès le premier millénaire avant notre ère, c'est-à-dire, bien avant que les populations méso-américaines elles-mêmes aient pris les sentiers du Nord.

26 Au-delà de ces informations liées à la subsistance, l'art rupestre nous renseigne sur ces peuples chalchihuites, sur leur manière de penser et de symboliser leur paysage, de ratifier leurs alliances, de marquer leurs routes. Les ensembles de gravures et de

peintures sont fort nombreux et déterminent un style caractéristique qui semble avoir fleuri surtout entre 600 et 900 de notre ère. Les sites sont en général associés à l'eau, aux rivières, et aux sources d'eau chaude. Ils peuvent se trouver directement liés aux sites d'habitat ou à mi-chemin entre deux sites.

27 Le thème dominant est sans conteste celui des quadrilatères verticaux à la manière de grands boucliers, parfois avec un personnage masqué placé derrière ou sur le côté. Ces boucliers semblent être essentiellement des marqueurs sociaux, des références à des associations dont la nature est difficile à préciser : groupes de parenté, fraternités guerrières et/ou religieuses, ou unités territoriales. Toujours est-il que ces assemblages de boucliers servaient à la fois, semble-t-il, à ratifier les alliances entre les groupes qui se retrouvaient dans ces sanctuaires régionaux mais aussi à souligner les différences qui permettaient de les reconnaître, car aucune décoration de bouclier pratiquement ne se répète. De plus, leurs agencements donnent forme à ce qui semble avoir été des hiérarchies bien marquées entre ces groupes, symbolisées par la taille des boucliers tandis que leurs relations sont exprimées par des superpositions qui les enchevêtrent et par des lignes qui les relient.

28 Parmi les nombreux autres thèmes de cet éloquent art rupestre chalchihuites, on ne peut manquer de citer ceux qui témoignent sans équivoque des étroites relations que ces peuples avaient établies avec les habitants du South West. En particulier, on reconnaît le fameux flûtiste, populairement et erronément appelé Kokopelli, qui symbolise par excellence les cultures du South West où il apparaît dans l'art rupestre vers les mêmes dates et persiste de nos jours tant dans les rites que dans les images sacrées des Indiens pueblos et en particulier des Hopis et des Zuñis. Ici comme au South West, il se présente sous des formes et dans des attitudes les plus diverses. Un autre motif tout aussi important est celui du personnage féminin coiffé avec la caractéristique coiffure du « papillon », soit deux grands cercles de chaque côté de la tête. Cette image qui apparaît également vers 600 de notre ère dans le South West y a gardé encore de nos jours sa signification puisqu'il s'agit de la coiffure des jeunes filles hopis.

29 Ces témoignages de l'art rupestre ne viennent que confirmer ce qui avait déjà été établi quant aux relations entre la Méso-Amérique et le South West (CAROT et HERS, sous presse) et soulignent cette autre caractéristique tellement méso-américaine de la population chalchihuites : le goût pour les échanges, pour intégrer dans la vie de tous les jours des éléments exotiques, l'art d'établir d'intenses réseaux commerciaux sur des distances considérables. Que ce soient des fines lames prismatiques d'obsidienne provenant de quelque source lointaine de l'Axe néovolcanique, des sonnailles en cuivre, des ornements en amazonite[7], des coquillages et de la céramique de la côte du Pacifique, des roches les plus diverses pour leur outillage, les paysans chalchihuites, malgré leur relatif isolement et dispersion, ne se contentaient jamais des seuls biens qu'ils pouvaient se procurer sur place.

30 Il est curieux à ce sujet que la route de la turquoise qui a été proposée pour expliquer la présence de cette pierre verte dans les sites chalchihuites des États de Zacatecas et Jalisco, au sud, n'a pas été confirmée par les travaux dans le Durango. Son absence ou grande rareté, en effet, est surprenante puisqu'on supposait que la turquoise provenait du South West. Or, bien que les liens avec cette région aient été amplement confirmés, ces échanges n'ont pas compris celui de la turquoise et la question de savoir d'où vient l'abondante turquoise réunie par les peuples chalchihuites du Sud avec qui ceux du Durango étaient pourtant étroitement apparentés, du moins à leur origine, reste posée.

Les trois étapes de la présence chalchihuites

31 On reconnaît trois grandes étapes durant l'occupation méso-américaine de ces confins[8].

32 Entre le VII^e^ et le X^e^ siècle, les colonisateurs s'installent sur toute l'étendue de la sierra et jusqu'aux sources du Florido dans le bassin du haut Conchos, si ce n'est plus au nord encore. C'est à cette époque d'apogée, que s'établit un pont de relations très étroites avec les peuples du South West comme en témoigne l'art rupestre.

33 Durant le IX^e^ ou X^e^ siècle, les colonisateurs du Durango ont ressenti les effets d'un phénomène encore mal expliqué : l'abandon de la majorité des établissements chalchihuites du Zacatecas et Jalisco et l'occupation des lieux par des peuples du Nord, culturellement fort différents comme le furent, par exemple, les Zacatecos plus liés à la chasse et la cueillette qu'à l'agriculture et la vie sédentaire. Le territoire du Durango, lui, continue à être occupé par les Chalchihuites et, de la sorte, se transforme en une enclave méso-américaine relativement isolée.

34 Entre le X^e^ et le XIII^e^ siècle, on constate apparemment une baisse démographique dans les vallées orientales. Les sites les plus grands sont abandonnés totalement ou partiellement. Par ailleurs, l'enclave du Durango reçoit l'impact de l'expansion méso-américaine sur la côte du Sinaloa (qui correspond à ce que l'on appelle le Complexe Aztatlan). C'est l'époque apparemment de l'occupation la plus dense dans les *quebradas* et de la construction de sites monumentaux spectaculaires. Les contacts avec le South West prennent un autre aspect. On les reconnaît, par exemple, par la présence dans la sierra du Durango de nombreuses constructions dans les abris sous roche, similaires aux fameux *cliff dwellings* du South West et, en sens opposé, par l'arrivée des clochettes de cuivre méso-américaines dans cette dernière région.

35 Au XIII^e^ siècle, une autre migration transforme radicalement le panorama. Un peuple originaire du Sonora, probablement au travers du río Fuerte, pénètre le long des vallées orientales, apparemment déjà abandonnées par ses anciens habitants chalchihuites. Par contre, dans les terres hautes et les *quebradas de* l'Ouest, on constate une continuité qui permet de reconnaître les peuples xiximes et acaxees décrits par les Espagnols comme les héritiers des anciens colonisateurs de culture chalchihuites du VII^e^ siècle. À cette époque, ce sont les grandes villes tahues de la côte du Sinaloa qui dominent les relations avec la Méso-Amérique au sud et le South West au nord et en particulier l'ancienne Culiacán qui prospère telle un Tombouctou sur la route côtière qu'emprunteront les premières expéditions espagnoles vers les terres mythiques de Cibola.

Les Tepehuanes, peuple originaire du Nord

36 Les travaux récents dans le Durango ont démontré que l'hypothèse d'une culture locale, appelée Loma San Gabriel (fig. 12), antérieure à la Chalchihuites (fig. 14), qui aurait perduré sans rupture majeure, depuis un lointain passé millénaire remontant à la Culture du Désert et jusqu'à la réalité actuelle des Tepehuanes n'est plus soutenable. D'une part, les sites attribués hypothétiquement à cette culture sur la base de travaux extrêmement préliminaires, se sont avérés appartenir pleinement à la culture chalchihuites, à partir en particulier d'études détaillées de leur architecture, de leur industrie lithique, de leur céramique et de leur art rupestre, en plus de fouilles dans certains cas. Qu'il s'agisse de

sites majeurs comme Hervideros (fig. 15) ou plus modestes comme, par exemple, Coscomate (fig. 16), La Chancaca, La Candela (fig. 17) ou Loma San Gabriel, dans tous les cas cette hypothétique culture Loma San Gabriel s'est avérée être le fruit d'un manque de travaux quelque peu approfondis et d'une idée préconçue selon laquelle plus on se dirige vers le nord, plus l'occupation est « primitive » et « simple ».

37 Par ailleurs, un nouvel aspect de l'histoire ancienne du Durango commence à être connu en définissant dans sa pleine originalité l'origine des Tepehuanes et la culture qu'ils ont développée lors de leur arrivée tardive au XIII^e^ siècle dans les vallées orientales de la Sierra de Durango (BARBOT, en préparation ; BERROJALBIZ, 2005, sous presse-a). Sur tous les aspects, ils se différencient diamétralement de leurs prédécesseurs méso-américains : ils installent leur demeure sans modifier le terrain, leurs constructions sont extrêmement fragiles et n'ont pratiquement pas laissé de traces. Les Tepehuanes ne se concentrent pas, mais se dispersent au contraire en fermes isolées, aux abords des terres de culture. Ils éloignent leurs morts et ne se préoccupent apparemment pas d'établir des réseaux commerciaux importants. Le plus singulier est certes leur agriculture qui dénote leur lointaine origine dans les terres arides du Sonora. Ces nouveaux venus apportent en effet avec eux un nouveau type de culture, sans irrigation et sans intérêt pour les terres riveraines. Une agriculture pluviale et un mode de vie particulièrement bien adapté à la sécheresse, que les conquérants espagnols auront bien du mal à comprendre et à définir selon leurs propres critères. Mais, faut-il le rappeler, cette dernière immigration (celle venue d'Espagne) dans la Sierra du Durango fut particulièrement destructrice. Les épidémies, les travaux dans les mines, l'écrasement sans pitié des mouvements de résistance et en général le chaos culturel entraîné par cette dernière invasion ont provoqué en quelques décennies la disparition de la majorité des peuples indiens qui peuplaient la région.

Fig. 14 – Mesa del Comal, *municipio* de Guanaceví, État de Durango, superposition d'un motif chalchihuites sur un ensemble ancien, (relevé de M-A Hers)

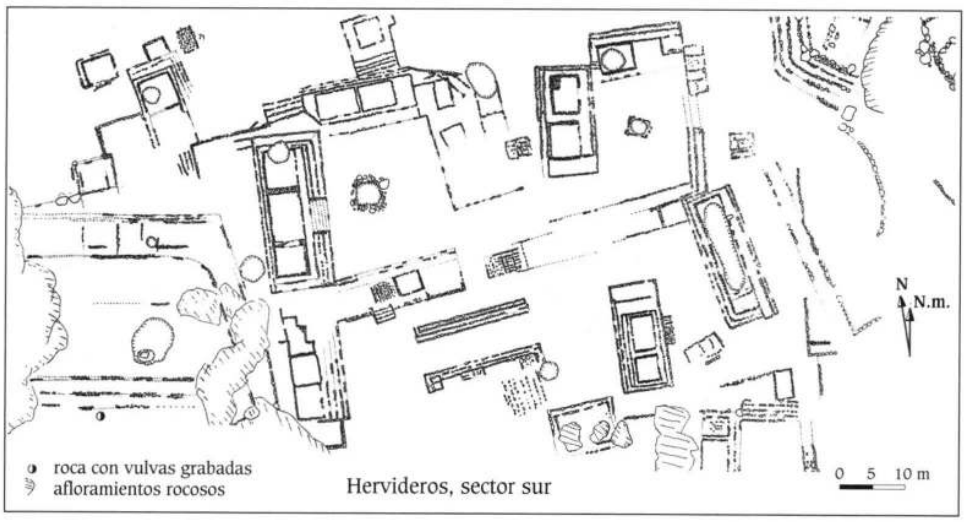


Fig. 15 – Plan du secteur sud du site de *Hervideros, municipio* de Santiago Papasquiaro, État de Durango. On reconnaît une série de *patios* rectangulaires avec l'autel respectif au centre et un jeu de balle. (Plan levé par M-A Hers)

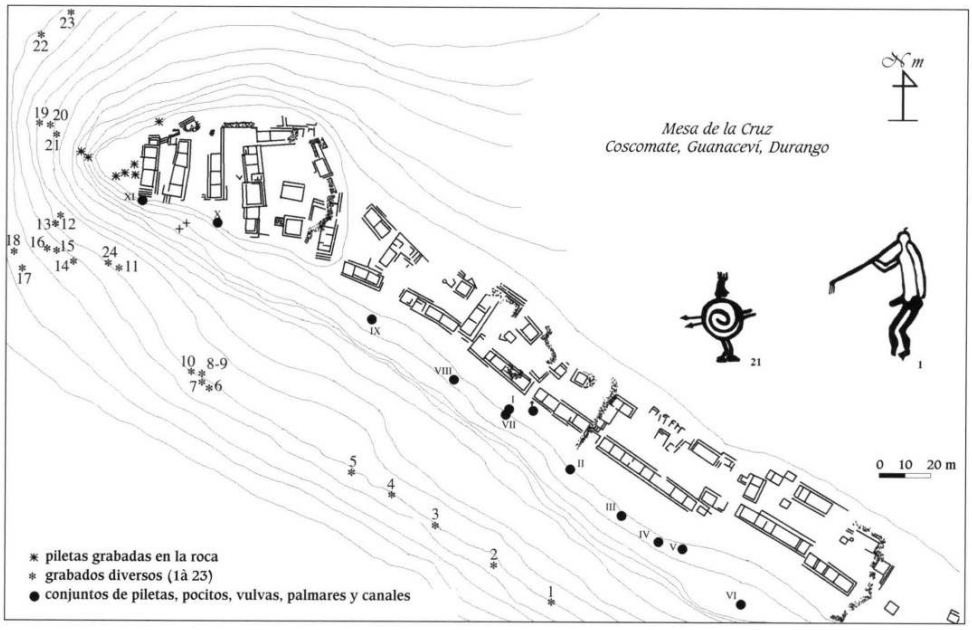


Fig. 16 – Plan du site de la Mesa de la Cruz, Coscomate, *municipio* de Guanacevi, État de Durango. (plan établi par l'auteur, avec la collaboration de Leslie Zubieta et Nina Meilin ; relevé des gravures par l'auteur en collaboration avec Luis Miguel Quintero et Felix Hernandez)

Fig. 17 – Un des nombreux panneaux gravés de La Candela, *municipio* de Tepehuanes (relevé de l'auteur).

Les paléopaysages

38 Généralement, on attribue à des facteurs climatiques ces grandes fluctuations de la frontière méso-américaine en raison de la menace de sécheresse qui pèse de nos jours encore sur cette région. Dans le cas du Durango, il s'agirait de trois périodes de profonds changements : la colonisation chalchihuites du sud au nord et dans toute la Sierra de Durango, à partir de 600 ; ensuite, l'abandon des terres du sud (Zacatecas et Jalisco) vers 850 et l'isolement consécutif de l'enclave du Durango et, finalement, la migration tepehuane originaire du nord-ouest durant le XIII^e^ siècle. Cependant, il est fort probable que ces changements radicaux soient plus le fruit de phénomènes sociopolitiques très complexes et encore très mal documentés, que la conséquence de modifications significatives de l'environnement. Le point de vue des biologistes nous est indispensable pour avancer dans la solution de ce problème central.

39 Le flanc est de la Sierra Madre occidentale présente une diversité remarquable d'écosystèmes engendrée par la topographie. Parmi ceux-ci, on trouve les zones semi-arides caractérisées par la présence de végétation épineuse, les plaines couvertes de pâturages, les *barrancas* au fond desquelles coulent des fleuves pérennes avec une végétation riveraine semi-tropicale, les systèmes lacustres de grande extension, les bois de pins, de genévriers et de chênes typiques des terres hautes et une grande quantité de ruisseaux de montagne. En raison de cette variété du relief et de la végétation, on trouve également une faune fort diversifiée qui peut être mise à profit.

40 La complexité écologique de la région ainsi que son caractère frontalier, tant dans le temps que dans l'espace, et la grande diversité de ses modes de vie, rendaient

indispensable le développement d'un sous-projet d'études de paléopaysages. Au cours de nombreuses campagnes sur le terrain, au rythme des saisons, les travaux se sont orientés vers quatre champs d'observation. L'étude des nids sous-fossiles et récents de rats des agaves du genre *Neotoma* est destinée à préciser la faune et la flore des alentours, au moyen de l'analyse des restes végétaux et fauniques contenus dans ces nids, et de la datation. Par ailleurs, on établit un inventaire qui recouvre une aire représentative de la variété écologique de chacune des zones étudiées par les divers sous-projets archéologiques. On dispose ainsi d'un schéma de référence de la faune et de la flore actuelles pour le comparer avec les données obtenues dans les nids et les fouilles. Le matériel de la faune et de la flore recueilli en fouilles est analysé pour établir les milieux mis à profit par les anciens occupants et les ressources dont ils disposaient. De plus, les colonnes de sédiments permettent de déterminer la possible séquence d'éventuels changements climatiques à partir des restes de faune qu'elles contiennent, principalement des mollusques terrestres. Finalement, nous comptons compléter ces études par une analyse de pollens et phytolithes recueillis en fouilles.

41 Parmi les premiers résultats obtenus, nous avons pu établir que la région comprise entre les villes de Canatlán et Tepehuanes est constituée par une série de vallées qui représentent une extension du désert de Chichuahua. Les vallées où se trouvent Santiago Papasquiaro et Tepehuanes sont parcourues respectivement par les fleuves Santiago et Tepehuanes, lesquels s'unissent à la hauteur du site d'*Hervideros* pour former le Ramos (fig. 13). Malgré la présence de ces cours d'eau, la flore et surtout la faune correspondent à celles du désert semi-aride de Chihuahua et se transforment progressivement à mesure que l'on monte dans la sierra. Celle-ci présente une stratification bien marquée, pour le moins, en quatre communautés végétales (CORRAL DIAZ, 1994).

42 Ces communautés sont déterminées par l'usage des sols, l'altitude et la précipitation pluviale annuelle. On doit y ajouter en plus leurs zones respectives de transition. Selon l'altitude, on trouve :

43 – La végétation des aires d'agriculture et d'élevage qui se situent entre 1 700 et 1 900 m d'altitude, généralement le long des marges du Santiago et du Tepehuanes. Traditionnellement, on y cultive le maïs et le haricot, avec ou sans irrigation, en plus des plantes potagères, des vergers et des cultures fourragères. L'agriculture traditionnelle est en nette diminution face à l'élevage en pâturages de bovins et de chevaux et, à moindre échelle, de moutons et de chèvres. La végétation dominante dans ces zones se caractérise par un mélange de *huizache (Acacia schaffneri), mezquite (Prosopis juliflora), nopales (Opuntia* spp.), *ocotillo (Fouquieria splendens), biznagas (Echinocactus* sp., *Echinocereus* sp., *Coryphanta* sp., *Mamilaria* sp., entre autres) et de nombreuses broussailles associées à ces cultures, en plus des autres modifications apportées par l'activité humaine.

44 C'est dans ce type de végétation que se trouve le site d'*Hervideros*, au sommet de la colline du même nom, laquelle présente un substratum rocheux en général bien drainé avec beaucoup de *huizaches*, diverses espèces de graminées et de cactacées, ce qui nous indique son caractère semi-désertique.

45 – Les bois de genévriers, de pins à pignons et de chênes qui se situent entre 1 900 et 2 300 m. Parmi les éléments caractéristiques, on trouve les chênes *(Quercus emoryi, Q. chihuahuana* et *Q. arizonica)* et le pin de pignons *(Pinus cembroides).* On observe encore beaucoup de *huizaches* et les genévriers *(Juniperus erythrocarpa).* On note également une diminution du *mezquite* et du *nopal de Durango (Opuntia durangensis)* bien que d'autres

espèces soient encore communes, en particulier le *nopal cardon (O. streptacantha)* dont les fruits sont fort appréciés dans la région pour leur douce saveur.

46 – Les bois de pins, de chênes et d'arbousiers qui sont observés entre 2 300 et 2 600 m. Les changements que l'on distingue dans la communauté des espèces consistent en la présence d'autres chênes (*Quercus* spp.), de pins (*Pinus* spp.) et d'arbousiers (*Arbutus* sp.). De plus, la réduction du nombre de cactacées est notable, pour le moins sur les lieux de nos observations.

47 – Les bois de pins, de chênes et de sapins Douglas qui apparaissent dans la partie la plus élevée de la Sierra Madre, entre 2 600 et 3 000 m où l'association des pins et des chênes se maintient avec la différence que dans les lieux plus humides et les plus froids, on peut trouver le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et le pin *ayacahuite* (*Pinus ayacahuite*). De même, le tascate ou genévrier se présente sous la variété de *Juniperus deppeana.*

48 – La végétation riveraine qui se présente le long des fleuves Tepehuanes, Santiago et Ramos, ainsi que des principales rivières tributaires qui descendent de la montagne, et contraste avec les aires voisines qui sont des terres de culture. La flore est plus variée grâce à la présence de l'eau toute l'année. On y remarque en particulier les peupliers (*Populus fremonti*), le saule (*Salix bonplandiana*), l'if ou *ahuehuete* (*Taxodium mucronatum*) et l'osier (*Chilopsis linearis*).

49 Bien que l'échantillonnage soit réduit, l'analyse archéozoologique de la région d'Hervideros témoigne d'un accès à ces différents milieux et l'éventail des espèces utilisées suggère que la chasse s'est maintenue comme une activité importante même pour les agriculteurs qui, dans ce domaine, ont pu entrer en compétition avec les chasseurs-cueilleurs.

50 Parmi les vestiges archéologiques, on trouve les coquillages marins provenant de l'océan Pacifique sous forme d'ornements. Parmi les vertébrés, les poissons sont représentés par trois taxa locaux : les silures (*Ictalurus* sp.), les Ciprinidae (G/Va sp.) et les Catostomidae. Ces dernières ne se trouvent pas dans la région actuellement. Parmi les reptiles, on note le serpent à sonnette (*Crotalus* sp.) et les tortues d'eau douce (*Kinosternon* sp.). Pour les oiseaux, la présence des cailles et des canards nous indique l'utilisation saisonnière des ressources. Parmi les mammifères, soulignons parmi d'autres, la présence de l'ours grizzli (*Ursus arctos*) qui était certainement chassé sur les contreforts de la sierra, le cerf *berrendo* (*Antilocapra americana*), le cerf *cola blanca* (*Odocoileus virginianus*), le rat *rata montera* des zones arides (*Neotoma albigula*) et les lapins.

51 Du milieu semi-aride, on reconnaît le lièvre (*Lepus callotis*), le rat *rata montera* et le cerf *berrendo*, bien qu'il existe la possibilité que celui-ci ait été importé parce qu'historiquement il n'a pas été enregistré dans la région.

52 Des *barrancas* à la végétation riveraine, on remarque le mapache ou raton laveur (*Procyon lotor*), le tatou (*Dasypus novemcinctus*) et la loutre (*Lontra longicaudis*), en plus des poissons, des tortues et la palourde d'eau douce (*Anodonta* sp.) qui nous indiquent leur habitat dans les fleuves.

53 Des bois, proviennent fort probablement le puma (*Puma concolor*), le cerf *cola blanca*, l'ours grizzli, l'écureuil des bois *(Sciurus aureogaster),* et le lapin (*Sylvilagus floridanus*). Le renard gris (*Urocyon cinereoaergenteus*), le *cacomixtle* ou bassaride (*Bassariscus astutus*) et la moufette (*Conepatus mesoleucus*) peuvent provenir de n'importe lequel de ces milieux.

54 Les conditions de distribution de ces ressources naturelles dans l'aire géographique ont permis tant aux peuples chasseurs-collecteurs qu'aux agriculteurs de les exploiter tout au

long de l'année sans avoir à parcourir de grandes distances. En effet, dans la sierra, la variété des ressources est accessible toute l'année en se déplaçant seulement en hauteur, depuis le fond des *barrancas* jusqu'aux terres froides et boisées des sommets.

55 Quant à l'étude de la faune actuelle, elle nous a confirmé la présence des espèces mentionnées, certaines spécifiques de milieux particuliers. De plus, elle nous a permis de certifier que *les changements observés dans la région (fluctuations de l'humidité) n'ont pas affecté la distribution générale des écosystèmes,* en raison de la pérennité des fleuves et des rivières, et malgré de possibles variations strictement locales dans leur extension. Elle nous a également montré que les changements constatés actuellement dans la zone sont le produit de la pression démographique et de la modification du milieu créée par l'activité humaine.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BARBOT C., en préparation – *Habitat et populations agricoles préhispaniques dans le bassin du río Tepehuanes, Durango, Mexique*. Tesis doctoral en arqueología, université de Paris-1.

BARBOT C, PUNZO J. L., 1997 – Antiguos caminos en el Noroeste durangueño : supervivencia de una tradiciôn prehispánica. *Trace*, 31, Cemca, México : 22-34.

BERROJÁLBIZ F., 2005 – *Formas de asentamiento en el valle del río Santiago Papasquiaro, Durango.* Tesis doctoral en Antropología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autonóma de México.

BERROJÁLBIZ F., sous presse-a – « Desentrañando un norte diferente : los tepehuanes prehispánicos del alto río Nazas ». *In* Cramaussel C. (ed.) : *Asentamientos y movimientos de población en la sierra tepehuana desde la prehistoria hasta nuestros días,* Simposio internacional, Santa Maria Ocotán, abril del 2000, Zamora, El Colegio de Michoacán.

BERROJALBIZ F., sous presse-b – « Avances en la cronologia del Noroeste de México desde el proyecto Hervideros, Dgo. » *In* Daneels A., coord. : *Actas del V Coloquio Pedro Bosch Gimpera* (junio del 2001), Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autonóma de México, México.

BRANIFF B., CORDELL L., GUTIERREZ M.D.L., HERS M.-A., VILLALPANDO E., 2001 – *La Gran Chichimeca ; el lugar de las rocas secas.* México y Milano, Jaca Books y Conaculta : 65-70.

BROOKS R. H., KAPLAN L., CUTLER H. C, WHITAKER T. W., 1962 – Plant Material from a Cave on the Rio Zape, Durango, México. *American Antiquity, 27* (3) : 356-369.

CAROT P., HERS M.-A., sous presse – « La gesta de los toltecas chichime-cas y de los purépechas en las tier-ras de los antiguos indios Pueblo ». (Primer Coloquio Internacional *Las Vías del Noroeste,* (México, febrero del 2002), Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

CORRAL DIAZ R., 1994 – *Status report on* Talinum Humile *in México.* Unpublished report prepared for U.S. Fish and Wildlife Service. Albuquerque, New México.

CRAMAUSSEL C, (ed.), sous presse – *Asentamientos y movimientos de población en la sierra tepehuana desde la prehistoria hasta nuestros dias.* El Colegio de Michoacán,

CUTLER H. C, 1978 – « Appendix : Corn from Seven Durango, México, Caves ». *In* Riley C, Hedrick B. C. (eds) : *Across the Chichimec Sea, Papers in Honor of J. Charles Kelley,* Southern Illinois Press, Carbondale: 186-189.

FORCANO I APARICIO M., 2000 – « Las pinturas rupestres de Potrero de Cháidez, Dgo ». In Hers M.-A., Mirafuentes J. L., Soto M. D., Vallebueno M. (eds) : *Nómadas y Sedentarios en el Norte de México, homenaje a Beatriz Braniff,* México, Institutos de Investigaciones Antropológicas, Estéticas, e Históricas, Universidad Nacional Autônoma de México : 489-510.

HERS M-A., SOTO M. D., POLACO O. J., 1998 – Reactivar la arqueologia durangueña : *Hervideros,* un proyecto en curso. *Transition,* Durango, Instituto de Investigaciones Histôricas, Universidad Juárez del Estado de Durango.

HERS M.-A., sous presse « Durango y Sinaloa : estado actual de la cronologia de la ocupaciôn mesoamericana ». *In* Braniff B., coord : *Cronologia historiográfica del Octidente,* Centro de Estudios Antropôlogicos del Occidente Nogueras, Universidad de Colima y Centro INAH Colima, Colima.

KELLEY J. C, 1971 – « Archaeology of the Northern Frontier : Zacatecas and Durango ». *In* Wauchope R., (ed.) : *Handbook of Middle American Indians,* vol. 11, part 2, Austin, University of Texas Press : 768-801.

PUNZO J. L., 1999 – *La Mesa de Tlahuitoles en lo Alto de la Sierra Madre occidentale de Durango : apuntes para la historia antigua xixime.* Tesis de licenciatura en Arqueologia, Escuela Nacional de Antropologia e Historia, México.

PUNZO J. L., sous presse – « Una larga secuencia de ocupación mesoamericana en la sierra sisime ». *In* Cramaussel C. (ed.) : *Asentamientos y movimientos de población en la sierra tepehuana desde la prehistoria hasta nuestros dias,* (Simposio internacional, Santa María Ocotân, abril del 2000), Zamora, El Colegio de Michoacán.

TSUKADA Y., sous presse – « Estudio comparativo de dos grandes asentamientos chalchihuiteños en Durango : Molino y Hervideros ». *In* Cramaussel C. (ed.) : *Asentamientos y movimientos de población en la sierra tepehuana desde la prehistoria hasta nuestros dias,* (Simposio internacional, Santa Maria Ocotán, abril del 2000), Zamora, El Colegio de Michoacán.

NOTES

1. Le projet *Hervideros* est mené par l'i*nstituto de Investigaciones Estéticas* de la Unam, en collaboration avec l'*Instituto de Investigaciones Antropológicas* de la même université, le Centre d'études mexicaines et centraméricaines (Cemca), la *Subdirecciôn de Laboratorios y Apoyo Académico* de *l'Instituto Nacional de Antropologia e Historia,* la *Universidad Juárez del Estado de Durango,* le *Centro Interdisciplinario de Investigaciôn para el Desarrollo Integral Regional-Unidad Durango du Instituto Politécnico Nacional.* Les travaux ont reçu l'appui financier du *Consejo Nacional de Ciencia Tecnologia (proyectos* 0451-H9108 y 3286-H9308) et de la *Direction General Asuntos del Personal Académico de la* Unam (*proyecto* IN 402494).

2. Les responsables des divers sous-projets sont Christophe Barbot (étude extensive du bassin du Tepehuân), Fernando Berrojalbiz (étude intensive du haut-Ramos), Marta Forcano (art rupestre

sur toute l'aire du projet), Marie-Areti Hers (étude approfondie du site de *Hervideros,* art rupestre sur le Zape et prospections archéologiques sur le Zape et le Ramos), José Luis Punzo (Mesa de Tlahuitoles, hautes terres des xiximes entre le San Lorenzo et le Piaxtla), Dolores Soto (les chasseurs-collecteurs dans les terres froides du haut-Humaya) et Yoshiyuki Tsukada (étude du site majeur de Molino et de la région du lac de Santiaguillo). Dans les *quebradas,* nous avons effectué collectivement diverses enquêtes dans les bassins du haut-Humaya, du haut-San Lorenzo et du haut-Piaxtla. Pour une présentation de chacun des neuf sous-projets et de leur stratégie particulière de recherches, cf. HERS et al., 1998.

3. Appelée autrefois culture anasazi.

4. Pour une bibliographie archéologique exhaustive du projet *Hervideros,* cf. BRANIFF *pt al* (2001) et CRAMAUSSFI (sous presse)

5. Pour certains auteurs qui proposent une définition spatialement fort restreinte de la culture chalchihuites, il s'agit précisément du territoire de cette culture.
Cf. KELLEY, 1971 : 768-801.

6. Les abris de Zape Chico sont à mettre en relation avec l'établissement qui occupe le sommet de la meseta. Celui-ci, tout comme les abris rocheux sont des sites de la culture chalchihuites et sont datés du VII[e] siècle. Cf. BROOKS *et al.,* 1962 ; CUTLER, 1978.

7. Cette belle pierre verte provenait sans doute du sud du Chihuahua : étude en cours du géologue Ing. Ricardo Sánchez, du laboratoire de géologie de la Direction de laboratoires et appui académique de *l'Instituto Nacional de Antropología e Historia.*

8. Pour une révision de la chronologie du Durango préhispanique, cf. BERROJALBIZ, sous presse-b ; HERS, sous presse.

AUTEURS

MARIE-ARETI HERS

Professeur d'archéologie à l'Unam (Universidad Nacional Autónoma de México), México.

OSCAR J. POLACO

Professeur d'archéologie à l'Unam (Universidad Nacional Autónoma de México), México.

Encadré 4. L'indianité et l'indigénisme au Mexique et dans la Sierra Madre occidentale

Luc Descroix

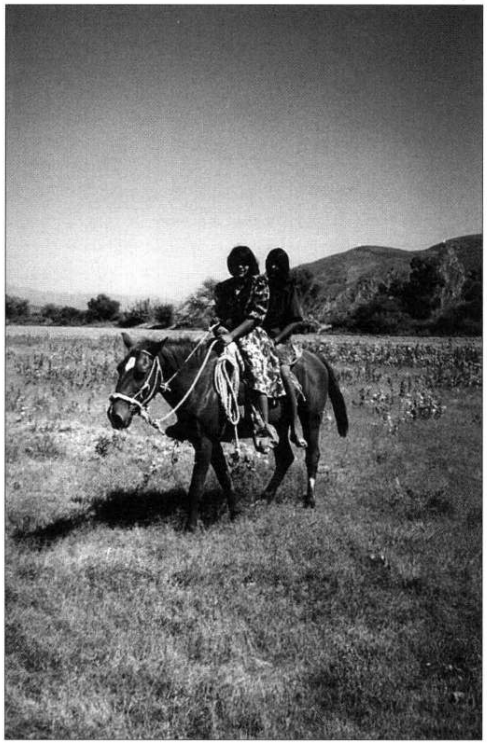
1 *Les Indiens sont et font le Mexique, dans la mesure où 90 % de la population a des origines indiennes, en général très majoritaires. En fait, seule une frange minoritaire de la population est majoritairement d'origine européenne (avec aussi d'importantes minorités d'origine arabe ou japonaise, surtout dans le Nord).*

2 *La culture mexicaine est fondamentalement un syncrétisme des traditions indiennes et des apports européens,* ce *qui fait que tout l'art, le folklore, l'artisanat, l'architecture, la cuisine, mais aussi les spectacles, le cinéma, l'animation de rue, etc., sont à la fois très riches et très variés. Le Mexique est indéniablement un des pays où la richesse et la diversité culturelle sont les plus grandes à l'échelle mondiale.*

3 *C'est un peu moins vrai dans le Nord, beaucoup moins peuplé que l'ensemble du pays (10 à 30 hab./km² suivant les États pour une moyenne nationale de 50 hab./km²). Mais comme dans l'ensemble du pays, les Mexicains appellent indigènes les gens dont la langue maternelle est indigène. Ceux d'entre eux qui ne parlent pas l'espagnol sont aujourd'hui peu nombreux du fait de l'énorme effort de scolarisation mené par le Mexique depuis la Révolution.*

4 *Un article de* Courrier international *du 18 août 2003 fait état d'un rapport des Nations unies insistant sur la ségrégation dont sont victimes les populations indiennes du Mexique, se basant sur des enquêtes menées auprès de toutes les ethnies importantes ; concernant la Sierra Madre, cette enquête a touché les Yaquis, les Tarahumaras, les Tepehuanes et les Huicholes. Cela va à l'encontre de l'évolution générale de la société mexicaine qui a hérité de ses racines amérindiennes et européennes une solide tradition démocratique, comme en témoigne l'important usage des pétitions, manifestations, sit-in, etc. La lutte des « zapatistes » au Chiapas et au Guerrero est issue aussi de cette tradition, et malgré les heurts violents et les massacres qui ont émaillé cette lutte, il n'y a jamais eu de volonté véritable de l'État fédéral de l'anéantir ; on peut supposer pourtant qu'il avait les moyens d'y parvenir.*

5 *Dans la Sierra Madre, il n'y a pas eu de problèmes d'appropriation de terres, car les ethnies étaient semi-nomades et peu importantes numériquement. Mais indéniablement, on peut parler de condescendance, voire de ségrégation de la part de la majorité des habitants (qui ont eux-mêmes, là encore, une origine essentiellement indigène), vis-à-vis des populations dites « indigènes » (c'est-à-dire qui ne parlaient pas l'espagnol). Ils sont parfois isolés dans leur village d'origine, où personne ne vient s'installer. Quand eux-mêmes demandaient à intégrer un* ejido, *ils étaient en principe en droit d'acquérir un terrain s'ils étaient installés antérieurement sur le territoire de* l'ejido *sans en faire partie formellement.*



Deux jeunes cavalières dans la vallée du río Santiago.

6 *Même s'ils parlent espagnol, ils continuent à souffrir de leur manque d'instruction et d'ouverture à l'économie marchande. Ils sont fréquemment abusés par les narco-traficants, qui leur font miroiter des sommes d'argent pourtant dérisoires pour les convaincre - sans difficulté en général - de planter de la marijuana ou du pavot. Et ils se font souvent dénoncer par les mêmes commanditaires, peu scrupuleux, et désireux d'éloigner les soupçons.*

7 *Les habitants du village de La Ciénega de Quelites, près de La Posta de Jihuites (fig. 7, p. 68 et fig. 50, p. 251), ont ainsi pendant longtemps semé de la marijuana pour le compte de négociants des villages et villes alentour, qui profitaient du relatif isolement du village (3 heures de mauvaise piste à partir de Santa Maria del Oro avant le goudronnage de la route en 2002). En 1995, l'armée est intervenue, a brûlé toutes les cultures illicites, et a occupé le village durant toute la saison des pluies, pour éviter les re-semis. Les hommes se sont cachés tout l'été dans la forêt, alimentés la nuit tombée en* frijoles, *tortillas et en eau par leur femme, à l'orée du bois. Les deux années suivantes, un programme de l'INI (Institut national indigéniste) a visé à substituer à la marijuana des cultures de légumes ; faute de marché sur place et de moyens de transport, ces légumes s'avérèrent invendables. Dès 1998, la Ciénega a re-semé de la marijuana.*

8 *Les commanditaires eux, ne risquent rien ; le fils du maquignon du village voisin a été arrêté durant ce même été 1998 avec son camion à ridelles plein d'herbe de marijuana fraîche ; dès le paiement de la caution, il a été libéré et n'a plus jamais été inquiété.*

9 *Par ailleurs, les traditions perdurant, les commanditaires qui font souvent supprimer des indigènes (paysans récalcitrants, trop bavards ou trop gourmands) sont peu nombreux à être poursuivis.*

BIBLIOGRAPHIE

Référence

Courrier international, 18/8/2003.

AUTEUR

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

Les sols et l'eau : précipitations et ruissellement dans la Sierra

Introduction

1 La Sierra Madre occidentale a cela d'original qu'elle est à la fois peu et surexploitée. D'un côté, son espace est géré de manière extensive par des agro-systèmes peu productifs mais qui fournissent des récoltes suffisantes pour des populations somme toute peu importantes, clairsemées (densités rurales : 1 -2 hab./km²) et en forte diminution. D'un autre côté, elle est surexploitée dans la mesure où elle a subi une gestion parfois peu patrimoniale des ressources naturelles, à une période plus récente.

2 C'est aussi un espace privilégié à l'échelle du Nord-Mexique, avec une pluviométrie et un climat expliquant la présence d'un sol bien plus profond et fécond, et d'une couverture végétale naturelle bien plus fournie que ceux des zones avoisinantes, qui sont bien plus arides, tant sur la bordure Pacifique du Mexique, semi-aride au nord du 26° parallèle, que sur l'Altiplano, où le plus grand désert nord-américain descend jusqu'à la latitude 24° nord pratiquement.

3 Paradoxalement, cet espace « privilégié » n'est pas une zone de peuplement. Si les ethnies « montagnardes » que sont les Huicholes, les Tepehuanes, les Tarahumaras et les Yaquis, s'y sont partiellement sédentarisées, c'est en partie pour échapper aux exactions des colons espagnols et aussi des ethnies nomades vivant souvent sur le grand altiplano (Comanches, Apaches). Et ces populations sont restées peu nombreuses.

4 Les Espagnols ne s'y sont installés que parce qu'ils y ont trouvé ce qu'ils étaient venus chercher en franchissant l'Océan, à savoir les minerais rares. Ces minerais allaient temporairement enrichir la couronne d'Espagne, et plus durablement, collaborer à l'accumulation capitalistique qui permettrait le décollage économique de l'Europe du Nord.

5 Mais ces enclaves de colonisation qu'ont été les villes minières parfois dès le début du XVII e siècle (Durango en premier lieu, Guanacevi, Santa Maria del Oro, Parral, Topia, Canelas, etc.) ne sont absolument pas exclusives de la sierra et on les trouve aussi dans le désert de Chihuahua et ses abords. Mapimí, petit bourg endormi de 5 000 habitants situé à 50 km de l'agglomération millionnaire Torreón-Gómez Palacio, a donné son nom à la vaste cuvette qui englobe une grosse moitié sud du désert de Chihuahua (le Bolsón de Mapimí). Peñoles, Pedriceha, Real de Catorce, Sierra Mojada existaient aussi depuis deux ou trois siècles lorsque Gómez Palacio est apparu en 1887 (apparition d'un périmètre irrigué sur

l'emplacement d'une oasis de piedmont) et Torreón en 1907 pour les besoins ferroviaires (pont sur le Nazas).

6 La colonisation ne s'est donc faite que ponctuellement en fonction de la localisation des filons, et ce n'est que vers la fin du XIX^e^ siècle que simultanément les plaines de l'altiplano (peu à peu « sécurisées » par le massacre des dernières tribus apaches) et les pâturages de la montagne, ont commencé à être exploités, non par volonté politique, mais spontanément par des paysans ou des investisseurs en quête d'espace lors de la phase de renforcement de la nation mexicaine (Réforme, **porfiriat**, période révolutionnaire et période actuelle). Le volontarisme et une réelle politique d'occupation des vides n'apparaissent que localement, dès la seconde moitié du XIX^e^ siècle, avec l'implantation des Mennonites dans les dépressions intra-et circum-montagnardes du flanc oriental de la sierra (régions de Canatlán dans l'État de Durango, région de Fresnillo dans celui de Zacatecas, région de Cuauhtemoc dans l'État de Chihuahua).

7 On est loin a *priori* des situations de surpopulation qui ont caractérisé les montagnes péri-méditerranéennes de l'Europe du Sud dans les siècles passés (et celles de l'autre rive de la Méditerranée depuis quelques décennies) ou les pays du Sahel depuis le début de la « Grande Sécheresse » (en 1968 approximativement). Ces phases de surpopulation permettent d'expliquer aisément la dégradation du milieu (diminution des couvertures végétales et érosion consécutive des sols) que l'on y observe ensuite.

8 À l'heure actuelle, en dépit de la faible densité de population de cette chaîne d'origine volcanique, le milieu paraît dégradé, la végétation clairsemée, les sols en grande partie érodés, et les ressources en eau menacées. Les paysans perçoivent cette dégradation, d'abord dans la productivité herbagère des pâturages, qui semble avoir baissé considérablement, dans la gestion des eaux de ruissellement, qu'ils ont du mal à maîtriser à l'échelle locale, puis dans la gestion des eaux tout simplement. En effet, les écoulements durent moins longtemps, les réserves du sol s'épuisent plus vite qu'auparavant (d'après nos relevés partout dans la Sierra Madre). Des problèmes d'érosion des sols sont drastiques alors que la lithologie (rhyolites et ignimbrites, roches résistantes) se prête peu au départ des particules et à l'affouillement.

9 Les pâturages de la Sierra Madre ont naturellement, du fait de la pluviométrie supérieure, une productivité plus élevée que ceux du piedmont oriental de la chaîne et a *fortiori*, que ceux du Bolsín de Mapimi. Le territoire des communautés rurales de cette région atteignait fréquemment plusieurs centaines de milliers d'hectares, ce qui n'était pas excessif lorsqu'on sait qu'il faut dans cette zone de 20 à 30 ha par tête de bétail bovin. Dans la Sierra Madre, on estime que la charge souhaitable est de 10 ha par tête, soit la même valeur que sur le piedmont intérieur, car les pâturages sont plus productifs, mais entrecoupés de bosquets d'arbres, d'arbustes et localement de rochers et d'éboulis, ce qui diminue d'autant les surfaces enherbées.

10 Mais ces pâturages semblent, à l'heure actuelle, très généralement surexploités, ce qui se traduit par de faibles productivités herbagères (BARRAL *et al.,* 1995), mais aussi par la grande extension de formes de dégradation de l'espace. Cette dégradation se manifeste de la façon suivante : apparition de plages de sol nu, amoindrissement de l'épaisseur des sols, remontée des cailloux en surface, pavage et induration des horizons de surface, et localement, là où le sol est profond, creusement de ravines pouvant laisser paraître la roche mère et atteindre plusieurs centaines de mètres de longueur.

11 Il y a, simultanément, dégradation des herbages et envahissement par des ligneux non appétants. Ces phénomènes ont été qualifiés par VIRAMONTES (2000) de « dégradation verte des pâturages » et mis en évidence par BOUTRAIS (1994) dans les savanes africaines :

12 « En savanes, un processus semblable de substitution affecte la strate herbacée qui perd en densité et en taille, jusqu'à disparaître. À de grandes graminées très recherchées par le bétail (*Andropogon g., Hyparrhenia r.*) succèdent d'abord d'autres graminées de grande taille moins appétées (*Panicum phragmitoïdes*). Si la pression pastorale se poursuit, les grandes graminées se raréfient, au profit de graminées basses (*Eragrostis*) ou de petites plantes non consommées (*Aframomum*). Du côté des ligneux, l'évolution est inverse, avec une multiplication d'arbustes, à mesure que les herbes se raréfient et que la pâture s'accentue. Parmi ces arbustes, certains prennent une place dominante, jusqu'à former des peuplements denses et homogènes, par exemple *Harungana madagascariensis.* La prolifération d'arbustes nouveaux ne représente qu'un stade transitoire vers l'installation d'arbres issus de la zone forestière : dès lors, le pâturage a disparu. À la dégradation pastorale correspondent des couverts végétaux plus denses en ligneux. L'érosion des sols est moins à craindre que l'étouffement et la disparition des herbes. C'est une forme de dégradation verte des pâturages ».

13 Le même phénomène est observé dans les savanes d'altitude de la Sierra Madre, entre 1 800 et 2 500 m d'altitude et est également décrit par Boutrais en Afrique : « En prairies d'altitude sous climats humides, le processus d'évolution pastorale est le même qu'en savanes ».

14 La poursuite du surpâturage a des conséquences évidentes en terme hydrologique : « Le piétinement du sol entrave l'infiltration de l'eau et favorise de petites entailles érosives » (HURAULT, 1975). « Ces phénomènes affectent surtout les axes de passage habituels des animaux, qui évoluent en terrassettes sur les pentes » (BOUTRAIS, 1994). Et dans la Sierra Madre, c'est l'ensemble des versants qui a évolué en terrassettes, occupant localement la grande majorité de l'espace visible, y compris sous la forêt claire.

15 S'agissant d'une surexploitation apparemment sans pression démographique sur le milieu, on a, *a priori,* envie de parler d'exploitation « minière » telle qu'on définit un type d'exploitation sans mise en valeur et surtout sans esprit de conservation patrimoniale. Ce n'est qu'une fois une société bien établie que des règles sont édictées et imposées, permettant une bonne conservation, même de biens communaux. « La transmission du patrimoine est un devoir, socialement aussi fondamental que le droit à l'héritage. On retrouve ici la philosophie sous-jacente à tous les systèmes de propriété collective : assurer la préservation des richesses de la communauté sur le long terme. Ce système particulier repose sur le maintien d'une structure sociale forte ». (MICHON *et al.,* 2000). C'est cette structure sociale forte qui a fait défaut jusqu'à présent dans cette société neuve d'éleveurs qui a mis en exploitation les pâturages de la Sierra Madre occidentale.

16 En fait, il y a probablement une explication plus simple qui consiste à penser que les nouveaux paysans promus par la Réforme agraire, qui ont eu accès à ces terres « vierges » (en fait déjà exploitées, très extensivement, sous forme d'haciendas auparavant), y ont vu de très beaux pâturages, et ont laissé se développer leur troupeau sans chercher à calculer des coefficients de pâturage adaptés ; c'est probablement seulement une fois le début de la dégradation constaté, après dix, vingt ou trente années de surexploitation, que les éleveurs ont pris conscience des travers de leur mode de gestion. Les années 1990

ont été caractérisées par une sécheresse récurrente qui a accéléré la dégradation des pâtures.

17 Ce type d'exploitation « minière » relève plus d'une période de transition dans laquelle une société s'installe, instaure plus ou mois spontanément un mode de gestion qui s'avère destructeur à moyen terme, et va chercher des correctifs après la prise de conscience de la non-pérennisation de la ressource. C'est exactement ce qui s'est produit dans le sud de l'Europe au XIX^e^ siècle (déboisement et surpâturage provoquant un stade d'érosion accélérée), dans les prairies nord-américaines au XIX^e^ siècle également et dans les grandes plaines du Mid West au début du XX^e^ siècle (dégradation des pâturages, *dust bowl*). La même situation se retrouve à l'heure actuelle au Texas et au Kansas (prochain épuisement de la nappe de l'Ogallala), sur les terres noires de l'Ukraine et du sud de la Russie au début de la période soviétique (grave érosion éolienne des cernozem), en Asie centrale ex-soviétique ensuite (assèchement en cours de la mer d'Aral), en Australie (salinisation des sols du bassin Murray-Darling), et en Amazonie actuellement (épuisement très rapide des sols après déboisement). L'épuisement des sols est observé actuellement et découle d'événements externes : « la disparition de la couverture arborée par exploitation de bois de chauffage est la forme d'anthropisation la plus clairement liée aux alternatives énergétiques. Ainsi, l'insécurité en zone touareg s'est rapidement traduite au Niger par une reprise des déboisements au nord de Niamey pour pallier la rupture d'approvisionnement en bouteilles de gaz domestique » (GILLON, 2000). Au Sénégal, après 1991, on a observé un rapide recul de la masse végétale, la décision du FMI de contraindre le Sénégal d'arrêter de subventionner le gaz bouteille ayant fait bondir la consommation de bois à usage domestique. Des dégradations ont aussi été constatées suite à de trop forts prélèvements de gibier ou de poisson, comme l'ont observé KATZ et NGUINGUIRI (2000) au Congo, en raison du développement urbain de Pointe-Noire et de la demande de la population urbaine ; les habitants des zones rurales qui approvisionnent la ville ont « d'abord constaté une perturbation des cycles d'abondance des espèces, puis établi une corrélation entre l'évolution de ce phénomène et l'augmentation de la pression sur les ressources ».

18 Il n'y a bien sûr jamais eu volonté politique de qui que ce soit en faveur de l'exploitation minière de la ressource ; c'est après avoir lancé une dynamique qu'on s'aperçoit de ses effets pervers.

19 Il est évident qu'une société qui s'installe dans un milieu vierge ou qui intensifie un milieu jusque-là exploité de manière plus lâche, peut provoquer des déséquilibres faute de « savoir-faire » et de connaissances des milieux. Les cultures qui ont duré des millénaires ont peut-être connu lors de leur mise en place des phases de recul ou de repli liées à une dégradation de la ressource, ce qui ne les a pas empêchées postérieurement de s'épanouir. Ce point de vue semble proche d'observations réalisées en Afrique soudanienne : « Lorsque l'exploitation est une forme peu ou pas artificialisée, l'homme intervient directement sur l'espèce en l'utilisant, par cueillette, extraction ou prédation. Il n'y a pas encore d'objectif de conservation, le prélèvement étant seulement fonction des besoins tels qu'ils se présentent. Deux cas se rencontrent : l'extraction et la cueillette lorsque la dynamique de la ressource n'est pas modifiée par le prélèvement, la prédation dans le cas contraire. Seule l'autorégulation de type proie-prédateur et la mobilité interviennent à ce stade dans la relation homme-milieu. Une prédation régulée par un contrôle du prélèvement définit un premier degré d'artificialisation » (SERPANTIE, 2000). D'après SERPANTIE (2000), « l'optimisation de l'exploitation nécessite des connaissances

sur l'état de la ressource placée sous exploitation ». Et les sociétés finissent par s'adapter au milieu en modifiant leurs pratiques : « Cultiver une ressource, c'est l'adapter elle-même ainsi que son milieu aux buts poursuivis. Ce sont donc certaines pratiques et leurs fins qui définissent la culture, non le poids des moyens économiques qu'on engage ou l'organisation sociale qui l'accompagne. Il y a plusieurs degrés d'artificialisation de la culture, suivant le degré de contrôle qu'on recherche » (SERPANTIE, 2000).

20 Des mesures ont été faites chaque année entre 1994 et 1997 afin d'estimer la valeur des pâturages et de cerner la qualité de la gestion de l'espace (BARRAL, 1988 ; BARRAL et *al.,* 1995 ; ANAYA et BARRAL, 1995 ; POULENARD, 1995, DUFEU, 1998) (cf. encadré 5 « L'appréciation du surpâturage », p. 201). Elles ont permis de quantifier la surcharge pastorale, que l'on observe malheureusement dans presque toute la Sierra Madre. Ce phénomène, bien plus que le déboisement, est responsable de la dégradation de la végétation, puis des sols, d'abord par le piétinement, et ensuite par le décapage des horizons superficiels, du fait de l'accroissement du ruissellement.

21 *Cette modification drastique des « états de surface », c'est-à-dire des propriétés physiques des premiers centimètres du sol (**porosité**, perméabilité, etc.), entraîne des changements importants des caractéristiques hydro-dynamiques des versants. Ceux-ci vont être bien plus ruisselants, accélérant le départ des particules fines, provoquant localement l'apparition de ravines et rendant plus difficile chaque année une éventuelle récupération de la qualité des pâturages, car les éléments nutritifs des sols s'amenuisent les premiers.*

22 *C'est cette évolution qui modifie les conditions de l'infiltration et de l'écoulement des eaux. Le débit des rivières s'en trouve changé et les termes du bilan de l'eau finissent par subir le même phénomène dans une région qui sert de château d'eau. L'avenir des zones qui dépendent de cette région pour leurs besoins en eau est alors menacé.*

23 Cette deuxième partie s'intéresse surtout au milieu naturel, à son évolution et aux conséquences hydrologiques de cette dernière. On commence par étudier le climat sous l'angle de la sécheresse et de l'aridité (cf. « Le climat et l'aléa pluviométrique au Nord-Mexique », p. 129), puis la régionalisation des pluies de part et d'autre de la Sierra (cf. « La spatialisation des précipitations sur les deux versants de la Sierra Madre occidentale », p. 145). Ensuite, le vif du sujet est abordé avec l'évolution des sols et des états de surface dans la Sierra Madre Occidentale qui a fait l'objet de six années de mesures sur le terrain (1994-1999) avec plusieurs autres campagnes plus légères entre 2000 et 2002 (cf. « Un encroûtement des sols limitant l'infiltration », p. 155). Enfin, on a cherché à comprendre comment les formes d'exploitation de l'espace influençaient le bilan hydrique (cf. « Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe », p. 171).

24 D'après des informations récentes (communication personnelle de Eva Anaya, directrice des services de l'Environnement pour l'État de Durango, qui a mené avec notre collègue Henri Barral de l'IRD ex-Orstom, décédé en 2000, l'étude sur les pâturages et leur surexploitation), la qualité des pâturages serait en nette amélioration en cet automne 2004 ; les dernières pluies sont tombées, et la saison a été assez humide. Du fait d'El Niño, l'hiver 2003 a également bénéficié de pluies, ce qui a été favorable à la teneur en eau des sols au moment de la pousse au printemps. Il paraîtrait de plus que le mouvement d'« enclosure » général qu'a connu la Sierra Madre ces dernière années commence à porter ses fruits : les parcelles devenues privées seraient mieux soignées, sans que l'on sache, faute d'un recensement récent du bétail, si cela est dû à une baisse du nombre de têtes ou plutôt à une meilleure gestion des herbages. Enfin, dernier point, malheureusement, il semblerait que cette évolution se soit faite aux dépens des pâturages

laissés comme communaux, qui auraient été particulièrement surchargés, à l'inverse des parcelles devenues privées.

25 En revanche, un survol-diagnostic des bassins des nos Sonora et Matapé, effectué en mai 2004, montre un état de dégradation des pâturages et des sols, bien plus grave que celui du Nazas.

BIBLIOGRAPHIE

Références

ANAYA E., BARRAL H., 1995 – *La ganadería y su mango en relation con los recursos hídricos y forraje-ros en la zona semiárida de México. Aplicationes al caso de la Hacienda Atotonilco y La Comunidad La Virgen.* Folleto Científico n° 5 Inifap/ Orstom. Gômez Palacio, Dgo.

BARRAL H., 1988 – « El hombre y su impacto en los ecosistemas a través del ganado ». *In* Montana C. (ed.) : *Estudio integrado de los recursos vegetatión, suelo y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimi. Ambiente natural y humano.* México D.F., Instituto de Ecologia de México, MAB: 241-261.

BARRAL H., HERNANDEZ L., ANAYA E., VALLEBUENO M., 1995 – Bétail mestegno dans la réserve de la biosphère de Mapimi ou résurgence d'élevage du XVIII[e] siècle, de nos jours dans le nord du Mexique. *Cah. Orstom, sér. Sci. Hum. :* 65-84.

BOUTRAIS J., 1994 – « Éleveurs, bétail et environnement ». *In : Dynamique des systèmes agraires : à la croisée des parcours, pasteurs, éleveurs, cultivateurs,* coll. Colloques et séminaires, Orstom : 303-319.

DUFEU R., 1998 – *Les paramètres du ruissellement et de l'érosion, impact du surpâturage dans la Sierra Madre occidentale.* Mémoire de fin d'études Istom, Cergy, 73 p.

GILLON Y., 2000 – « Artificialisation et anthropisation ». *In* Gillon Y., Chaboud C, Boutrais J., Mullon C. : *Du bon usage des ressources renouvelables,* IRD, coll. Latitudes 23 : 29-38.

HURAULT J., 1975 – *Surpâturage et transformation du milieu physique, l'exemple des hauts plateaux de l'Adamaoua (Cameroun).* Paris, IGN, 218 p.

KATZ E., NGUINGUIRI J-C, 2000 – « Compétition pour les ressources au Kouilou (Congo) ». *In* Gillon Y., Chaboud C, Boutrais J., Mullon C. : *Du bon usage des ressources renouvelables,* IRD, coll. Latitudes 23 : 187-198.

MICHON G., DE FORESTA H., LEVANG P., 2000 – « De la forêt aux jardins (Sumatra, Indonésie) ». *In* Gillon Y., Chaboud C, Boutrais J., Mullon C. : *Du bon usage des ressources renouvelables,* IRD, coll. Latitudes 23 : 223-240.

POULENARD J., 1995 – *Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre occidentale.* Mémoire de fin d'études Istom, Cergy, 82 p.

SERPANTIE G., 2000 – « Artificialisation de deux ressources soudaniennes ». *In* Gillon Y., Chaboud C, Boutrais J., Mullon C. : *Du bon usage des ressources renouvelables,* IRD, coll. Latitudes 23 : 125-145.

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.

Le climat et l'aléa pluviométrique au Nord-Mexique

Jean-François Nouvelot, Luc Descroix et Juan Estrada

1 Alors que l'ensemble du territoire mexicain appartient au domaine tropical, caractérisé par l'alternance d'une saison des pluies correspondant aux mois les plus chauds et d'une saison sèche ou relativement sèche, marquée par les mois les plus froids, la majeure partie de la moitié septentrionale, plus précisément 60 % du pays, correspond à des zones arides ou semi-arides, qui reçoivent, en moyenne, moins de 500 mm de pluie par an. Cette vaste région, située entre le tropique du Cancer et le 32° de latitude Nord, est constituée d'un ensemble de hauts plateaux, dont l'altitude varie de 1 000 à 1 200 m, bordé à l'est comme à l'ouest par deux importantes chaînes montagneuses. Dans cet Altiplano, certains reliefs locaux peuvent atteindre 2 000 m d'altitude. Ce contexte géographique particulier explique le caractère de continentalité que reflètent non seulement les faibles précipitations mais aussi une évapotranspiration potentielle (ETP) qui représente cinq à dix fois les quantités de pluies tombées. Intervient, également et surtout, le rôle des circulations atmosphérique et océanique régnant sur, ou à proximité, de la zone. Les premières sont fortement dépendantes des hautes pressions subtropicales, alors que les secondes entraînent des remontées d'eaux froides le long des côtes de Basse-Californie (courant de Californie), deux facteurs peu favorables à la formation de précipitations abondantes.

2 On conçoit que dans de telles conditions, le problème de la disponibilité de la ressource en eau soit une préoccupation permanente, d'autant que les contraintes édaphiques, entre autres les faibles pentes, rendent les sols plus facilement exploitables ici que dans le sud du pays où les zones de relief escarpé sont prépondérantes. Si la moitié des terres cultivées de ces contrées sèches est irriguée, cela ne signifie nullement que seules les cultures pluviales, majoritairement les productions alimentaires de base, soient soumises aux aléas climatiques. Les réserves en eaux superficielles, malgré la présence de grandes retenues peuvent s'avérer insuffisantes certaines années. Le recours, d'une manière massive, aux réserves souterraines profondes, dont la ré-alimentation, encore mal

connue, est probablement limitée, serait dangereux et le reflet d'une politique de gestion à court terme hypothéquant l'avenir.

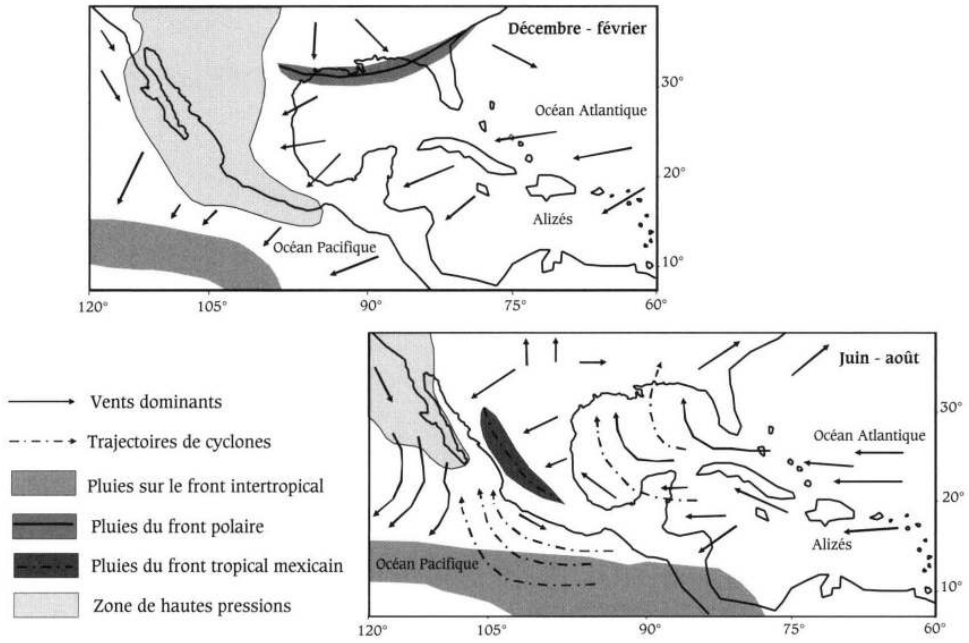
Les facteurs du climat

3 Le climat qui caractérise l'ensemble du Nord-Mexique est régi essentiellement :

- par sa situation en latitude, au nord du tropique du Cancer, où la circulation zonale est sous la dominance des hautes pressions subtropicales ;
- par son relief qui fait obstacle à l'entrée des flux humides ;
- par les remontées d'eau froide du courant de Californie qui longe les côtes de la Basse-Californie.

4 Le bassin du Nazas qui se situe dans la partie méridionale de cette région (des latitudes 23° à 26°30' N) reste soumis, sensiblement, aux mêmes influences (fig. 18).

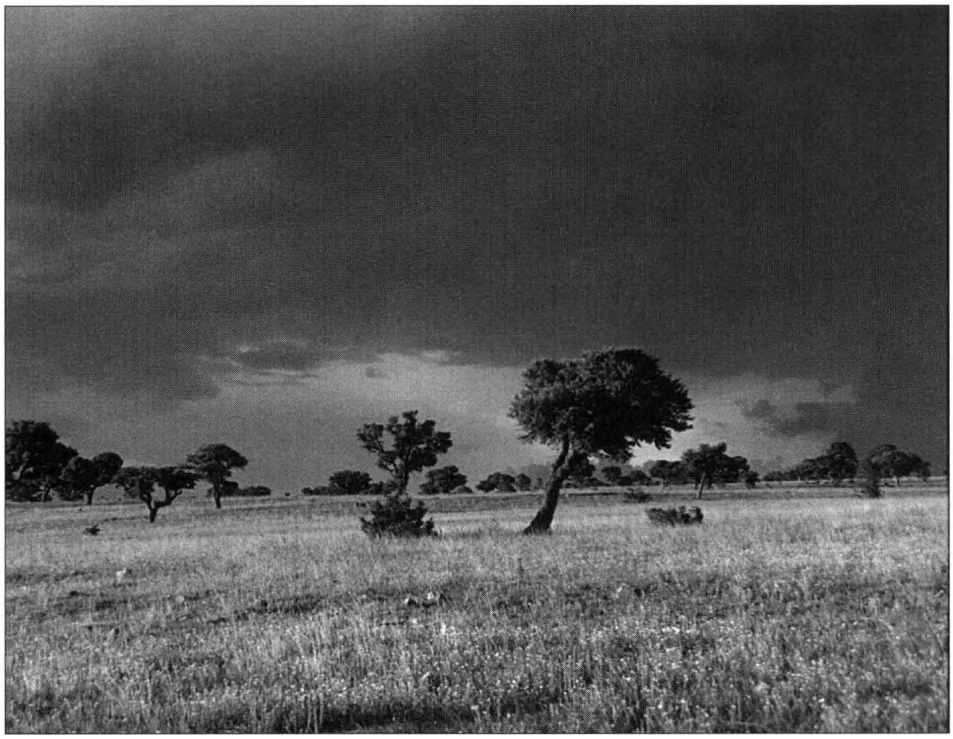
Fig. 18 – Circulation atmosphérique générale sur le Mexique en hiver (haut) et en été (bas).



5 De décembre à mai, tous les hauts plateaux, de même que le littoral du Pacifique, sont sous le régime des hautes pressions subtropicales ; les vents d'est, dominants à ces latitudes, ne pénètrent alors que la zone côtière atlantique. De juin à novembre, les hautes pressions prennent une position plus septentrionale, en stationnant sur l'extrême nord-ouest du Mexique et la Californie américaine (désert côtier). Des flux d'air humide peuvent alors envahir l'Altiplano mexicain (SANTIBANEZ, 1992 ; CORNET, 1993 ; Delhoume, 1995). Les masses d'air venu du golfe du Mexique, qui a tendance à s'assécher en franchissant la Sierra Madre orientale, peuvent tout de même créer une instabilité propice au déclenchement de pluies de convection. Ces masses d'air rencontrent celles venues du Pacifique à hauteur de la Sierra Madre occidentale, formant le Front tropical mexicain (CNA, 1975), situé à environ 10° plus au nord que le Front intertropical (FIT), avec une orientation générale NW-SE. Il se crée ainsi à l'ouest une instabilité favorable à la formation de précipitations, d'autant que l'effet orographique est ici important : si les

sommets dépassent rarement 3 300 m, peu de cols se situent au-dessous de 2 500 m. Du côté oriental de cette barrière naturelle, les précipitations auront tendance à diminuer sensiblement, et ceci avec d'autant plus d'acuité que l'on s'éloigne du Pacifique.

Ciel d'orage sur les pâturages près de Tepehuanes.



6 À partir de la fin août, les queues de cyclones, formés principalement sur le Pacifique (ceux de l'Atlantique se dirigeant généralement vers le Texas et la côte nord du golfe du Mexique), peuvent franchir l'obstacle de la Sierra Madre occidentale. Des précipitations importantes peuvent alors être observées sur les crêtes et le versant oriental de la sierra, leur durée compensant leurs faibles intensités. Malgré tout, l'essentiel de ces précipitations se déverse généralement sur le littoral et les premiers reliefs. Les 13 et 14 octobre 1994, la queue d'une dépression tropicale a atteint la ville de Durango, située sur les hauts plateaux à une altitude peu inférieure à 2 000 m, où il s'est déversé 70 mm en 24 heures, puis la ville de Torreón, localisée à 200 km au nord-ouest, à 1 100 m d'altitude, où il a été enregistré 30 mm. Plus au nord, dans la Sierra Madre, il n'est tombé que 30 à 40 mm sur les villes de Santiago Papasquiaro et Guanacevi (haut bassin du Nazas), soulignant bien la trajectoire SW-NE de ce type de perturbations, avec parfois une certaine propension à s'infléchir progressivement vers l'est (NOUVELOT et DESCROIX, 1996).

Répartition régionale et temporelle de l'aridité

7 À l'échelle des hauteurs annuelles, le gradient altitudinal et la distance à l'océan Pacifique expliquent bien (83 % de la variance) la répartition spatiale des précipitations. Ces deux facteurs ne sont pas indépendants, l'altitude baissant vers le centre du bassin endoréique à mesure que l'on s'éloigne de l'Océan. En effet, aucun apport n'est par ailleurs généré sur le continent, contrairement à ce qui est observé par exemple dans le Sahel africain, où la

moitié des pluies n'est pas provoquée par des entrées océaniques. L'accroissement des précipitations, en fonction de l'altitude, serait voisin de 30-35 mm/100 m. En plus du rôle d'obstacle orographique, lié à la rugosité du relief, souvent accentué par une couverture arborée non négligeable, les zones montagneuses favorisent la condensation de la vapeur d'eau par un abaissement des températures, d'autant plus important que croît l'altitude (cf. « L'eau, agent économique et enjeu politique » , p. 249).

8 La répartition mensuelle des précipitations, appelée régime pluviométrique par les climatologues, présente également une grande homogénéité. Le profil moyen mensuel a été défini à partir de soixante stations pluviométriques, réparties sur l'ensemble du bassin, en utilisant la méthode dite de la Classification ascendante hiérarchique (CAH). Afin de s'affranchir de l'effet d'abondance, pour qu'une station à fortes précipitations n'ait pas plus de poids qu'une station moins arrosée, les douze valeurs moyennes mensuelles de chacune d'entre elles ont été ramenées en pourcentage du total annuel. À partir d'une partition initiale, où chaque station représente une classe dans un espace à douze dimensions (les valeurs mensuelles), des regroupements ont été effectués par agglomérations successives des classes les plus proches, caractérisées par leur centre de gravité. La distribution moyenne obtenue (tabl. VIII) montre une saison des pluies estivale bien marquée, qui s'étend de juin à septembre et représente 78 % du total annuel, avec un maximum en août. Les pluies d'hiver ne dépassent pas 8 % de ce même total. Une analyse un peu plus fine permet de distinguer une zone nord et nord-orientale qui, exposée davantage aux quelques rares entrées d'est : queues de cyclones atlantiques, et de nord-est : avancées hivernales du front polaire, se caractérise par une distribution des pluies d'été plus aplatie avec un total pour juin à septembre inférieur à 70 % du total annuel, les pluies d'hiver atteignant 12 % et les précipitations de mai et octobre étant également un peu plus abondantes (tabl. VIII).

Tabl. VIII – Distribution mensuelle des précipitations dans le bassin du Nazas (en pourcentage du total annuel).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Zone : N-NE	3,9	2,2	1,1	2,6	6,0	13,5	17,2	19,7	18,1	8,0	3,3	4,4
Reste Nazas	3,0	1,1	0,7	1,6	3,5	12,9	22,3	24,1	18,4	6,9	2,4	3,2

9 L'homogénéité climatique rencontrée, tant au niveau régional que temporel, lorsque ne sont analysés que des valeurs ou indicateurs moyens, ne représente qu'un aspect, nécessairement incomplet, de situations beaucoup plus complexes et contrastées. Cette homogénéité incontestable n'est que le reflet de la **stationnarité** des phénomènes observés qui oscillent plus ou moins, suivant le type de climat, de part et d'autre d'une situation normale.

10 Une manière commode de définir quantitativement la variabilité d'un facteur mesuré est de calculer son coefficient de variation, Cv, qui est le rapport de l'écart-type, σ, à la moyenne, m : $Cv = \sigma/m$.

11 L'écart-type ou la variance (σ^2), qui mesure la dispersion des observations autour de la moyenne par, comme son nom l'indique, un simple calcul d'écarts, est lié directement aux valeurs des observations, c'est-à-dire qu'il risque d'être d'autant plus fort que ces valeurs

sont elles mêmes élevées. Il n'est donc pas possible de comparer entre eux des facteurs, ou même des observations de même nature, qui se traduisent par des nombres très différents, par exemple des précipitations de zones désertiques avec des précipitations de zones humides. En divisant par la moyenne, l'effet d'abondance est gommé.

12 La variabilité des précipitations annuelles sur le bassin du Nazas, comme d'ailleurs sur l'ensemble du Nord-Mexique aride, se caractérise par une sensible décroissance lorsque la pluviosité augmente. Le coefficient de variation passe d'une valeur de 0,40-0,50 pour une précipitation annuelle de 200 mm, à seulement 0,15-0,30 pour 600 mm. Ces valeurs ne présentent pas un caractère d'exception. Elles sont très comparables à celles rencontrées en Afrique de l'Ouest et du Centre (Sahel), inférieures à celles du Nordeste brésilien et surtout très inférieures (de moitié environ) à celles caractérisant la zone côtière méridionale de l'Équateur (tabl. IX).

13 Le phénomène El Niño-Southern Oscillation (ENSO), qui représente un système couplé, circulation océanique-circulation atmosphérique, se traduisant, entre autres, par une élévation significative des températures de surface océanique du Pacifique tropical central et oriental, est la cause de cette exceptionnelle irrégularité. Lorsqu'elles sont soumises aux effets de ce phénomène complexe et encore mal connu, certaines régions désertiques (Équateur, Pérou) peuvent bénéficier de précipitations observées généralement en climat tropical humide. Par contre, dans le couloir inter-andin, proche de ces mêmes régions, sous les mêmes latitudes mais à des altitudes variant entre 2 200 et 3 000 m, avec des pluies annuelles se situant entre 400 et 600 mm, le coefficient de variation (Cv) est sensiblement comparable à celui observé dans le Nord-Mexique.

14 Il faut savoir que pour un coefficient de variation supérieur à 0,20, la distribution statistique des observations n'est plus gaussienne (aussi appelée « distribution en cloche », celle-ci caractérise les populations statistiques dont les effectifs se regroupent autour des valeurs centrales) et présente donc une certaine asymétrie (généralement positive pour les précipitations), d'autant plus marquée que le Cv et par conséquent la variabilité sont forts.

Tabl IX – Coefficient de variation des précipitations annuelles de différentes régions semi-arides.

P. annuelle (mm)	Nord-Mexique	Sahel Afrique	Nordeste Brésil	Équateur Côte	Équateur Andes
200	0,40 - 0,50	0,30 - 0,45		0,75 - 1,00	
300	0,35 - 0,45	0,25 - 0,40		0,60 - 0,80	
400	0,25 - 0,40	0,25 - 0,35	0,35 - 0,45	0,45 - 0,65	0,20 - 0,30
500	0,20 - 0,30	0,20 - 0,30	0,35 - 0,45	0,40 - 0,60	0,15 - 0,30
600	0,15 - 0,30	0,20 - 0,30	0,30 - 0,40	0,40 - 0,55	0,15 - 0,25

15 Pour faciliter les comparaisons avec d'autres régions, il est usuel de déterminer les précipitations dont la fréquence d'apparition est assez rare, la fréquence décennale (F = 0,10) représentant généralement une référence satisfaisante. Un événement correspondant à F = 0,10 ou à son inverse T = 1/F, appelé temps ou période de retour, exprimé en années, est observé, en moyenne, une année sur dix, sans que cela signifie, bien évidemment qu'il se répète tous les dix ans. Ainsi, la probabilité d'observer une pluie

de fréquence décennale dans une chronique de dix ans n'est que de 39 %, par contre, il existe 19 chances sur 100 d'en observer deux et même 1,5 chance sur 1 000 d'en observer cinq.

16 Sous l'isohyète annuelle 400 mm, la pluie journalière de fréquence décennale est de 45 à 70 mm dans le Nord-Mexique, 80 à 100 mm dans le Sahel africain, 90 à 115 mm dans le Nordeste brésilien et 75 à 100 mm dans la zone côtière équatorienne, seule la zone interandine se caractérise par des valeurs plus faibles : 20 à 40 mm (tabl. X).

17 Il semble donc incontestable que, dans ce domaine, l'altitude joue un rôle fondamental. La tendance reste sensiblement la même si on considère les hauteurs de pluie tombées durant des intervalles de temps plus courts. En comparant les intensités de fréquence décennale observées en 30 minutes, pour une précipitation annuelle de 400 mm environ, on relève (tabl. XI) : pour le Nord-Mexique, 65 mm/h ; pour le Sahel et le Nordeste, 80 mm/h ; pour la côte méridionale de l'Équateur, 75 mm/h et pour la zone andine 30 à 45 mm/h. Les averses orageuses du Nord-Mexique sont donc non seulement moins abondantes que celles observées dans certaines autres régions de la planète, appartenant au même domaine climatique, mais elles sont également moins intenses. Néanmoins, si ces pluies se caractérisent par une moindre agressivité, il faut souligner que d'autres facteurs interviennent dans les phénomènes de ruissellement, d'infiltration et d'érosion. En effet, si les précipitations représentent effectivement un facteur déterminant pour expliquer le caractère de plus ou moins grande aridité des différents milieux rencontrés, il est important de considérer également le devenir de l'eau lorsqu'elle atteint le sol.

Tabl. X – Pluies journalières de fréquence décennale de différentes régions arides.

P. annuelle (mm)	Nord-Mexique	Sahel Afrique	Nordeste Brésil	Équateur Côte	Équateur Andes
200	40 - 60	55 - 75		65 - 75	
300	40 - 65	70 - 90		70 - 85	
400	45 - 70	80 - 100	90 - 115	75 - 100	20 - 40
500	45 - 72	90 - 105	95 - 120	80 - 110	25 - 45
600	47 - 75	95 - 110	100 - 120	90 - 120	30 - 50

Tabl. XI – Intensités des pluies de fréquence décennale de différentes régions arides pour environ 400 mm de précipitations annuelles (en mm/h).

Durée minutes	Nord-Mexique	Sahel Afrique	Nordeste Brésil	Équateur Côte	Équateur Andes
10	115	140	125	115	55 - 80
30	65	80	80	75	30 - 45
60	40	60	65	50	20

18 La capacité de ruissellement ou d'absorption, puis de rétention, du milieu récepteur, joue un rôle de première importance. Ainsi, lorsque les sols présentent des caractéristiques

qui tendent à réduire leur capacité potentielle d'emmagasinement de l'eau, l'aridité édaphique (DELHOUME, 1995) vient s'ajouter à l'aridité climatique. Ce phénomène est très fréquent dans les zones sèches, à l'échelle du globe, dès que le pourcentage de couverture végétale est inférieur à 30 ou 40 %. Dans ce cas, la proportion d'espaces dénudés, appelés localement ***peladeros***, est telle que les gouttes de pluie arrivant directement sur le sol provoquent par **battance** la formation de croûtes superficielles imperméables qui empêchent l'eau de s'infiltrer. Les faibles quantités d'eau qui franchissent tout de même cette barrière hydraulique sont très rapidement évaporées (cf. « Un encroûtement des sols limitant l'infiltration », p. 155).

Les sécheresses

19 Définir sur des critères objectifs les caractéristiques d'une période de sécheresse : intensité, durée, extension spatiale, etc., représente un exercice peu aisé. Par commodité, nous appellerons année sèche, une année dont le total pluviométrique annuel est inférieur à la moyenne, calculée sur une période suffisamment longue pour être statistiquement significative. Une période de sécheresse correspondra donc à une succession d'années sèches. Dans le langage courant, il est rare (années exceptionnellement déficitaires) que le mot sécheresse ne s'applique qu'à un seul cycle annuel, car l'effet sur les différents milieux est alors rarement catastrophique. C'est le cumul d'années sèches qui rend perceptibles les modifications intervenues sur les écosystèmes et agro-systèmes, preuve pour certains d'un véritable changement climatique à plus ou moins long terme.

20 BOVIN (1995) signale qu'un certain nombre de sécheresses remarquables auraient sévi au cœur de l'empire aztèque, avant l'arrivée des conquistadores, et cite, plus particulièrement, la période 1450-1454 durant laquelle aucune pluie n'aurait été observée, assertion probablement exagérée mais qui a le mérite de souligner l'importance du fléau, avec toutes les conséquences sociales et économiques qui l'ont accompagné. Pendant les trois cents ans de la période coloniale (1521-1810), il y aurait eu, toujours d'après le même auteur, quatre-vingt-huit sécheresses, dont beaucoup ont concerné avec plus ou moins d'acuité le Nord aride, soit une moyenne d'une sécheresse tous les trois ou quatre ans. Le XIX^{e} siècle n'est pas épargné avec un épisode remarquable entre 1850 et 1852 ; de 1875 à 1910, Bovin dénombre vingt-neuf épisodes secs dont quinze localisés dans le Nord du pays, c'est-à-dire une sécheresse tous les deux ans. Ceci laisse à penser que sont qualifiées de sèches toutes les années inférieures à la normale, critère qui rejoint la définition déjà proposée, sans que toutefois, ne soit considérée, semble-t-il, la notion de période sèche regroupant plusieurs années. Quatre années déficitaires, séparées chacune par une ou plusieurs années, plus ou moins humides, n'auront évidemment pas le même caractère de gravité et d'exception que quatre années sèches successives. Un exemple intéressant est donné par la période 1948-1962 durant laquelle n'a été observée dans le bassin du Nazas, et probablement sur une grande partie du Mexique septentrional, qu'une seule année significativement excédentaire : 1958 (année, il faut le préciser, caractérisée par un ENSO). On peut, dans ce cas, définir une seule sécheresse ou éventuellement deux épisodes séparés par l'année 1958, mais décompter dix ou treize sécheresses, suivant que l'on écarte ou non les années proches de la moyenne, serait dénué de sens et surtout occulterait le caractère exceptionnel de cet épisode.

21 Pour essayer de décrire puis analyser le plus objectivement possible les phénomènes mis en jeu, le recours à l'information climatologique est donc indispensable. Il s'agit essentiellement des données pluviométriques observées dans les stations les plus anciennes. Les chroniques obtenues, dont les plus longues remontent au début des années 1920, ont fait l'objet d'une analyse critique afin de s'assurer de leur cohérence au niveau régional. Il a pour cela été fait appel à la méthode dite du vecteur régional, MVR (DESCROIX et *al.* 2002). Cette technique, proposée par HIEZ (1986), est basée sur la notion de pseudo-proportionnalité des totaux pluviométriques entre stations voisines dont l'ensemble des données permet ainsi l'élaboration d'un vecteur représentatif de la région couverte. Cette élaboration s'appuie sur un principe du maximum de vraisemblance qui part du postulat que l'information la plus vraisemblable est celle qui se répète le plus fréquemment. Toute l'information apportée par chacune des stations d'observation doit contribuer à l'élaboration du vecteur régional, sans que les données erronées puissent avoir une influence sensible sur le résultat. En corollaire, l'information fournie par ce vecteur permet d'appréhender les fluctuations temporelles des précipitations d'une manière plus fiable, au sens de la représentativité spatiale, que l'information, nécessairement partielle, apportée par chacune des stations prises individuellement. Ceci suppose qu'un nombre suffisant de stations (trois au minimum) aient fonctionné de manière simultanée, ce qui malheureusement n'a pas été le cas lors de la mise en place, nécessairement progressive, des réseaux d'observations. Les chroniques les plus longues utilisées correspondront donc à des données ponctuelles et non à des informations régionales. Malgré tout, l'emploi du vecteur aura servi à débarrasser les données des erreurs systématiques qui risquaient d'altérer l'analyse des séries chronologiques. D'une manière générale, de telles séries peuvent présenter différentes caractéristiques qu'il est important de définir, même si dans la pratique leur mise en évidence n'est pas toujours aisée, la durée des chroniques disponibles étant, comme il a été souligné, nécessairement limitée.

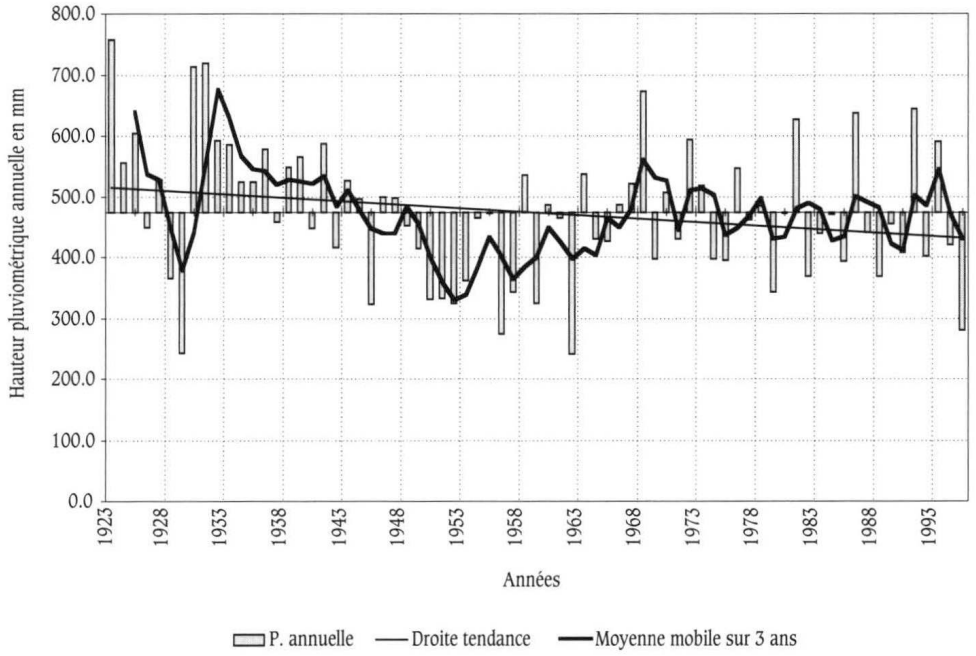
22 Les variables appartenant à une série chronologique sont dites stationnaires quand leurs caractéristiques statistiques (moyenne, autocovariance) ne changent pas au cours du temps. Dans le cas contraire, un effet de tendance est à mettre en cause.

23 La figure 19 montre la série chronologique complète des observations pluviométriques annuelles de la station de Tepehuanes, située à une altitude de 1 800 m et caractérisée par une hauteur pluviométrique interannuelle moyenne de 472 mm, calculée sur soixante-treize ans (plus longue chronique disponible). Bien que la droite de tendance marque une légère décroissance, il serait hasardeux d'en déduire que depuis 1923 la pluviosité diminue, le pourcentage de la variance des précipitations expliqué par la chronologie des années n'étant que de 4,9 %, c'est-à-dire très loin du seuil de signification.

24 À l'examen de la série, quelques grandes variations pluriannuelles peuvent être décrites. Le début de la chronique se caractérise par une succession d'années excédentaires de 1923 à 1927, avec cependant une nette tendance à la baisse qui se poursuit au cours des années 1928 et 1929, marquées par un très fort déficit. À partir de 1930, commence une période pluvieuse qui s'étend jusqu'au début des années quarante : les deux premières années (1930 et 1931) sont, après 1923, les deux plus fortes observées en soixante-treize ans (elles ont toutes deux dépassé 700 mm). À partir de 1932, la tendance générale est, de nouveau, à la baisse des précipitations, celles-ci restant tout de même dans l'ensemble excédentaires, exceptée l'année 1945 qui semble annoncer la période 1948-1962 au cours de laquelle seule l'année 1958 dépasse sensiblement la moyenne. La fin de la série noire correspond à l'année 1962, la plus faible jamais enregistrée : 241 mm. On constate donc

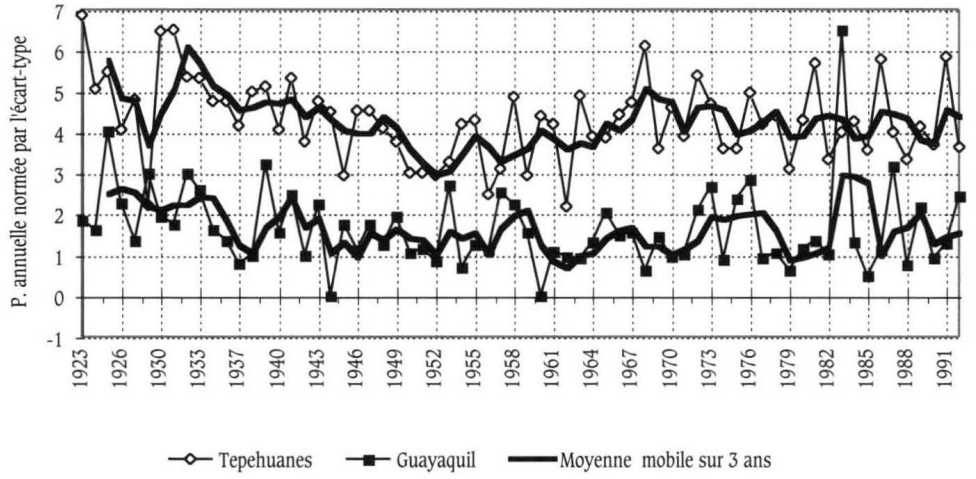
une nette décroissance des précipitations de 1930 à 1962, avec, en simplifiant, une première moitié plutôt excédentaire, la seconde partie étant au contraire marquée par un net déficit. À partir de 1963, la distribution des précipitations en fonction des années devient beaucoup plus aléatoire, avec des alternances d'années excédentaires et d'années déficitaires dont les pics et les creux sont séparés par des intervalles de deux à cinq ans.

Fig. 19 – Pluviométrie annuelle à Tepehuanes depuis 1923.



25 Il faut souligner que des distributions chronologiques assez proches ont été observées sur le pourtour du Pacifique oriental, entre autres en Amérique du Sud dans la région côtière méridionale de l'Équateur, pourtant exposée directement à l'influence de l'ENSO qui tend à accuser l'amplitude des variations (fig. 20).

Fig. 20 – Évolution comparée de la pluviométrie à Tepehuanes (Mexique) et à Guayaquil (Équateur).



26 Les séries humides des années trente, comme les séries sèches des années cinquante, pourraient laisser penser que certains effets de persistance dominent la distribution

temporelle observée, c'est-à-dire que la hauteur pluviométrique d'une année x donnée dépend de la hauteur de la ou des années précédentes. Dans ce cas, la répartition des précipitations ne serait pas purement aléatoire.

27 Dans une étude de la variabilité spatio-temporelle des cumuls pluviométriques annuels de la zone intertropicale, MORON (1996) définit, à l'échelle du globe, trois grandes bandes de fréquence : les périodicités décennales et supérieures, qui expliqueraient les vingt ans de sécheresse observés en Afrique sahélienne ou dans le nord de l'Amérique du Sud ; les périodicités comprises entre trois et huit ans, associées généralement à l'ENSO, avec un développement planétaire ; enfin, les périodicités quasi biennales, caractéristiques du sous-continent indien, de la région située autour du golfe de Guinée et de l'ouest de l'Australie. En toute logique, le Nord-Mexique et plus particulièrement le bassin du Nazas devraient se rattacher essentiellement au deuxième type. ROSSEL (1997) a montré que les précipitations annuelles excédentaires de la zone côtière du sud de l'Équateur sont très liées à l'ENSO mais que dans le nord du pays ses relations sont beaucoup plus faibles et deviennent très faibles, voire inexistantes, dans le couloir interandin et sur le flanc oriental amazonien de la cordillère des Andes, pourtant situés très près de la zone concernée. En se référant aux vecteurs pluviométriques régionaux (MVR) définis pour le bassin du Nazas, les liaisons ENSO-années excédentaires n'apparaissent pas significatives. L'ENSO est un phénomène d'une telle variabilité, non seulement dans le temps et l'espace, mais également dans son intensité, que les différents spécialistes arrivent parfois à des conclusions opposées lorsqu'il s'agit de définir les années chaudes avec ENSO et les années froides sans ENSO. Toujours d'après Moron, les premières auraient été particulièrement bien marquées en 1952-1953 (déficitaire dans le Nord-Mexique), 1957-1958 (excédentaire en 1958), 1965-1966 (déficitaire), 1972-1973 (excédentaire), 1982-1983 (proche de la normale), 1986-1987 (excédentaire), et 1992 (déficitaire), les secondes en 1950 (déficitaire), 1954-1956 (très déficitaire), 1962 (fortement déficitaire), 1974-1975 (déficitaire), 1984-1985 (déficitaire). Il est particulièrement intéressant de noter que les années froides correspondent toutes à des années caractérisées par des précipitations déficitaires, la liaison avec les années chaudes n'étant pas, comme il a déjà été souligné, significative. L'exemple du Nord-Mexique semble montrer que les grandes causalités des phénomènes climatiques, et plus particulièrement pluviogènes, restent encore à préciser mêmes si certaines grandes tendances commencent à être mises en évidence. Au niveau régional, l'appartenance à une structure déterminée est beaucoup moins franche. Les grands phénomènes mis en jeu : circulations atmosphériques et océaniques, ne sont pas figés. Leur intensité varie, tant dans le temps que dans l'espace, et il est fort probable que durant certaines périodes plus ou moins longues, en une zone déterminée, certaines influences prédominent pour, au contraire, devenir secondaires dans des phases postérieures. Pour le Nord-Mexique, il serait ainsi possible de rattacher la période allant de la moitié des années quarante à la moitié des années soixante à la classe, qualifiée par MORON (1996), de périodicités décennales, la phase postérieure à 1965 appartenant plutôt à la classe ENSO. La première période serait, toutefois, en phase opposée avec celle de l'Afrique sahélienne, puisqu'elle correspond ici à des années particulièrement déficitaires.

Conclusion

28 L'aridité est une caractéristique du Mexique septentrional qui correspond, néanmoins, en milieu naturel, à un certain équilibre, l'eau et plus particulièrement les précipitations transmettant aux écosystèmes récepteurs leur variabilité.

29 Les caractéristiques physiques de ces milieux, et en premier lieu les conditions édaphiques, interviennent également dans la redistribution des ressources hydriques à laquelle est liée la présence d'un couvert végétal plus ou moins fourni. Cet équilibre précaire et instable est menacé par deux contraintes de natures différentes dont les effets peuvent être catastrophiques.

30 La première de ces contraintes est d'origine naturelle puisqu'il s'agit des effets de la sécheresse qui, plus ou moins régulièrement et avec plus ou moins d'intensité, atteint ces régions. Les écosystèmes réagissent par un processus d'autoconservation qui se manifeste par une réduction du couvert végétal, l'espace laissé libre devenant alors stérile. Le développement extrême de cette évolution aboutirait à la formation d'un véritable désert minéral. Confronté à de telles conditions, l'homme a cherché, et souvent trouvé, des moyens de survie qui se sont affinés avec le temps et sont même devenus source d'inégalités. L'édification de grands et moyens barrages par la puissance publique, assurant une gestion interannuelle des réserves, la construction de plus petits réservoirs *(**presones**)* par les exploitants privés et parfois par les exploitations communautaires (*ejidos*), l'utilisation à plus ou moins grande échelle des ressources souterraines, parfois profondes et peu réalimentées, sont autant de moyens qui permettent aujourd'hui de lutter contre les aléas climatiques. Toutes ces infrastructures concernent essentiellement le monde agricole puisque dans ces régions l'irrigation représente, et de loin, la plus forte demande en eau. Dans le bassin du Nazas, cette consommation atteint 95 % de la ressource utilisée, malgré la présence de l'agglomération de Torreón, Gómez-Palacio et Lerdo qui totalisent plus d'un million d'habitants. Il faut préciser que l'agriculture et l'élevage intensifs expliquent la présence d'un périmètre irrigué dont la superficie oscille, suivant les années, entre 120 000 et 160 000 ha. Le système de El Palmito ne permet pas, malgré sa grande capacité, de supporter plus de deux années de sécheresse prononcée. Or l'étude des chroniques pluviométriques et hydrométriques montre que la probabilité d'obtenir des séries de quatre à cinq années sensiblement sèches est loin d'être faible. Dans de telles périodes, la tentation est grande de puiser dans les réserves souterraines, même si celles-ci sont peu ou pas renouvelées. En conséquence, à côté des contraintes naturelles auxquelles est soumis le milieu, le poids des influences anthropiques n'est pas négligeable et tend même à s'accentuer. Le surpâturage sur de très grands espaces, depuis de nombreuses décennies (grandes haciendas de la deuxième moitié du XIX^{e} siècle), accélère le phénomène de dégradation de la couverture végétale qui favorise le ruissellement superficiel et par conséquent l'érosion mécanique, et diminue l'infiltration.

31 Diverses hypothèses ont été proposées pour tenter d'expliquer l'origine des sécheresses : échanges d'énergie entre océans et atmosphère, dérèglement à certains moments des circulations et des températures de surface océaniques en liaison avec des anomalies de la circulation atmosphérique (ENSO), liaisons possibles avec le cycle des taches solaires, rôle de l'albédo différentiel et de l'orographie sur la circulation atmosphérique, etc. Ces recherches ont incontestablement permis de faire des progrès significatifs dans la compréhension des mécanismes mis en jeu, mais il est encore impossible aujourd'hui de

prévoir ce type de phénomènes et encore moins d'en évaluer l'ampleur. La solution, pour éviter que l'équilibre précaire des milieux arides nord-mexicains ne soit rompu, ne peut donc venir que d'un changement du comportement de l'homme dans l'exploitation des ressources naturelles dites renouvelables, qu'il s'agisse de l'eau, du sol ou de la végétation. Une attitude résolument « conservationniste » ou « patrimonialiste » semble actuellement la seule planche de salut pour que le point de non-retour, déjà atteint dans certaines régions, ne se généralise pas, et pour assurer un développement durable.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BOVIN P., 1995 – Les sécheresses au Mexique. *Sécheresse,* 6(1) : 53-58.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 1975 – Atlas del Agua, México.

CORNET A., 1993 – « Principales caractéristiques climatiques ». *In : Estudio integrado de los recursos vegetation, suelo y agua en la reserva de Mapimi.* Instituto de Ecologia, México, D.F. : 45-76.

DELHOUME J.P., 1995 – *Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique).* Thèse doctorat, université de Poitiers, 300 p.

DESCROIX L., NOUVELOT J.-F., ESTRADA J., LEBEL T., 2002 – Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations, application à une région endoréique du Nord-Mexique. *Revue des Sciences de l'Eau,* 14 (3) : 281-305.

HIEZ G., 1986 – « Bases théoriques du vecteur régional (les premières applications et leur mise en œuvre informatique) ». *In : Deuxièmes journées hydrologiques de l'Orstom à Montpellier,* 16-17 sept. 1986, coll. Colloques et séminaires : 1-36.

MORON V., 1996 – Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992). *Sécheresse, 7* (1) : 25-32.

NOUVELOT J.-F., DESCROIX L., 1996 – Aridité et sécheresse du Nord-Mexique. *Trace.* Cemca, México, n °30 : 9-25.

ROSSEL F., 1997 – *Influence du Nino sur les régimes pluviométriques de l'Équateur.* Thèse de l'université Montpellier 2, 265 p.

SANTIBANEZ A., 1992 – *La Laguna.* Monographie publiée à compte d'auteur, Torreón, Mexique, 240 p.

AUTEURS

JEAN-FRANÇOIS NOUVELOT

Hydrologue, directeur de recherche retraité de l'IRD, il a dirigé le programme de 1995 à 1997.

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

JUAN ESTRADA

Hydrologue, chercheur au Cenid Raspa.

La spatialisation des précipitations sur les deux versants de la Sierra Madre occidentale

Luc Descroix, Jean-François Nouvelot, Juan Estrada et Alfonso Gutierrez

Introduction

1 On a vu comment l'aridité pouvait être une contrainte au développement, au Nord-Mexique comme dans d'autres régions. La connaissance de la répartition des précipitations est rendue difficile dans ces régions peu peuplées et de fait équipées d'un réseau de mesure d'autant plus lâche que de nombreuses stations ont été arrêtées ces dernières années.

2 La répartition des précipitations annuelles sur la partie centrale de la Sierra Madre occidentale (correspondant aux régions hydrologiques n° 36 et 10) telle qu'on peut l'apprécier sur la figure 21 montre :

- une nette opposition entre les versants ouest et est de la sierra, le versant ouest étant bien plus arrosé mais présentant une bien plus forte variabilité spatiale, fruit d'un relief extrêmement escarpé (NOUVELOT et DESCROIX, 1996 ; DESCROIX et *al.,* 1997 ; DESCROIX *et al.,* 2001) ; n régulière des précipitations de la ligne de crête (où elles sont de l'ordre de 800 à 1 000 mm) vers la Laguna et l'est du bassin Nazas Aguanaval (où elles sont localement inférieures à 200 mm par an) ;
- une diagonale de très fortes précipitations, qui se sépare du littoral pour se rapprocher de la ligne de crête, du sud vers le nord ; on atteint des valeurs de plus de 1 500 mm par an à moins de 80 km du littoral au sud, alors que les maxima, proches de 1 200 mm, sont à plus de 150 km de la côte au nord ;
- l'apparition d'une zone littorale aride au nord, où l'on se rapproche des déserts côtiers du Sonora et de Basse-Californie (moins de 300 mm à Topolobampo).

3 La figure 22 donne les valeurs du coefficient de variation des précipitations interannuelles moyennes pour le bassin Nazas Aguanaval et une grande partie du versant ouest de la sierra. Plus ce coefficient est élevé, plus l'irrégularité interannuelle de la précipitation est forte. On constate que l'irrégularité croît très nettement de la côte vers l'intérieur des terres. Ici, les zones où le Cv est le plus faible correspond aux zones les plus pluvieuses du versant ouest de la sierra ; les plus forts Cv se rencontrent dans les zones arides du sud du désert de Chihuahua, c'est-à-dire dans les dépressions endoréiques du Bolsón de Mapimí.

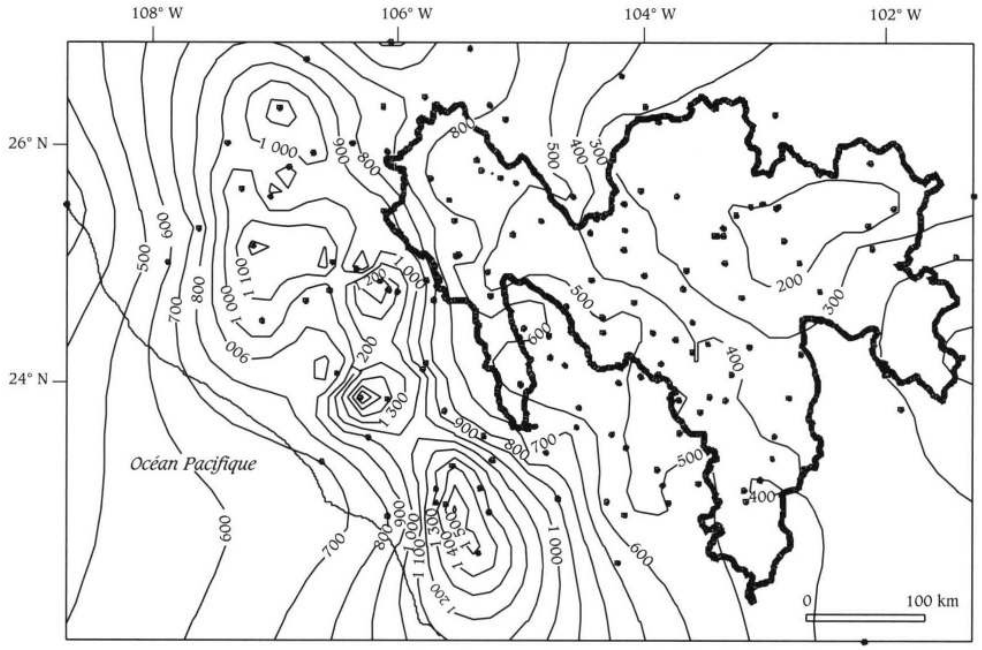


Fig. 21 – Isohyètes interannuelles et localisation des postes pluviométriques dans le bassin Nazas-Aguanaval et ses environs.

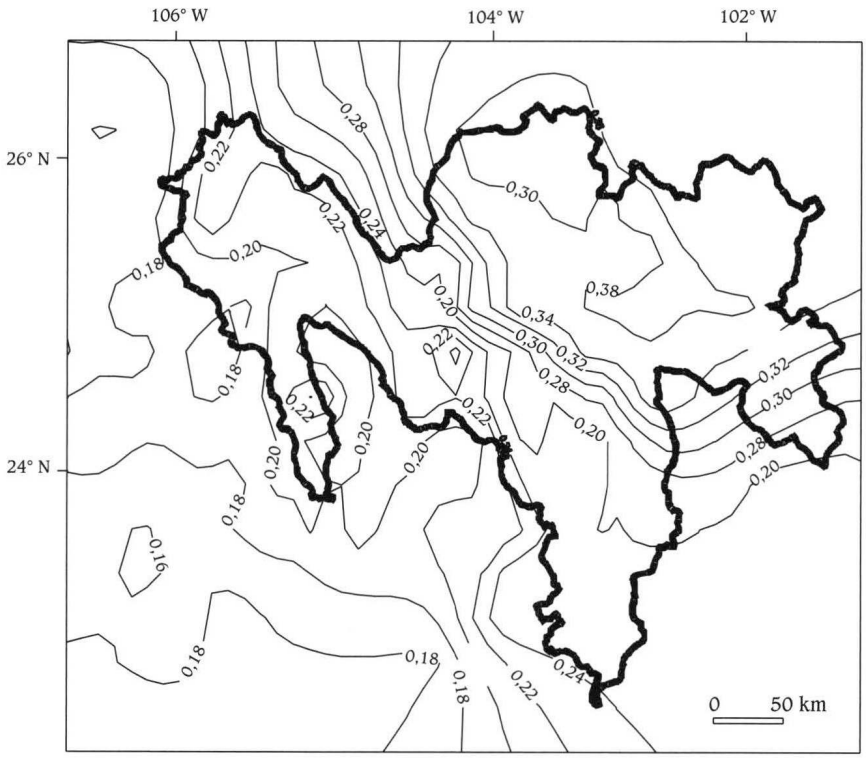


Fig. 22 – Coefficient de variation interannuelle des précipitations.

La spatialisation des précipitations

4 Dans les secteurs peu instrumentés, comme l'est en général le nord du Mexique, il apparaît un jour ou l'autre un besoin de connaître plus ou moins précisément les hauteurs de précipitation en vue de dimensionner des ouvrages (barrages, canaux, ponts, etc.) ou de faire des prévisions de pluies extrêmes et donc de risques naturels (crues, inondations, etc.). Aussi, comme le réseau est lâche, on cherchera à déterminer deux types d'informations complémentaires à celles fournies par le réseau, et qui permettent d'interpoler spatialement la validité de l'information acquise, afin de pallier l'existence de zones sans données :

- la première est la définition de zones homogènes en fonction de l'information pluviométrique recueillie sur le réseau existant ;
- la seconde est la distance de corrélation des données acquises.

5 C'est pour parvenir à la définition de régions homogènes que l'on a fait appel une nouvelle fois (cf. « Le climat et l'aléa pluviométrique au Nord-Mexique », p. 129) à la Méthode du vecteur régional (MVR). Cette technique, proposée par HIEZ (1986), est basée sur la notion de pseudoproportionnalité des totaux pluviométriques entre stations voisines dont l'ensemble des données permet ainsi l'élaboration d'un vecteur représentatif de la région couverte. Cette élaboration s'appuie sur un principe de maximum de vraisemblance qui part du postulat que l'information la plus vraisemblable est celle qui se répète le plus fréquemment.

6 Mais alors que précédemment, on a utilisé cette méthode pour vérifier la validité des données et repérer d'éventuelles erreurs dans les séries, on s'en sert ici pour la détermination par défaut de zones « pluviométriquement » homogènes. C'est-à-dire que

l'on considère que si un vecteur est constitué par un ensemble de stations au comportement « proportionnellement » semblable, il définit une région homogène en terme de comportement pluviométrique.

7 L'analyse de toutes les données disponibles sur le réseau existant a permis de constituer sept « régions pluviométriques », cinq pour le bassin du Nazas Aguanaval (RH36) et deux pour le versant Pacifique de la sierra (RH10) (GUTIERREZ, 2003), constitué de nombreux bassins versants dont les eaux s'écoulent directement vers le Pacifique (fig. 23).

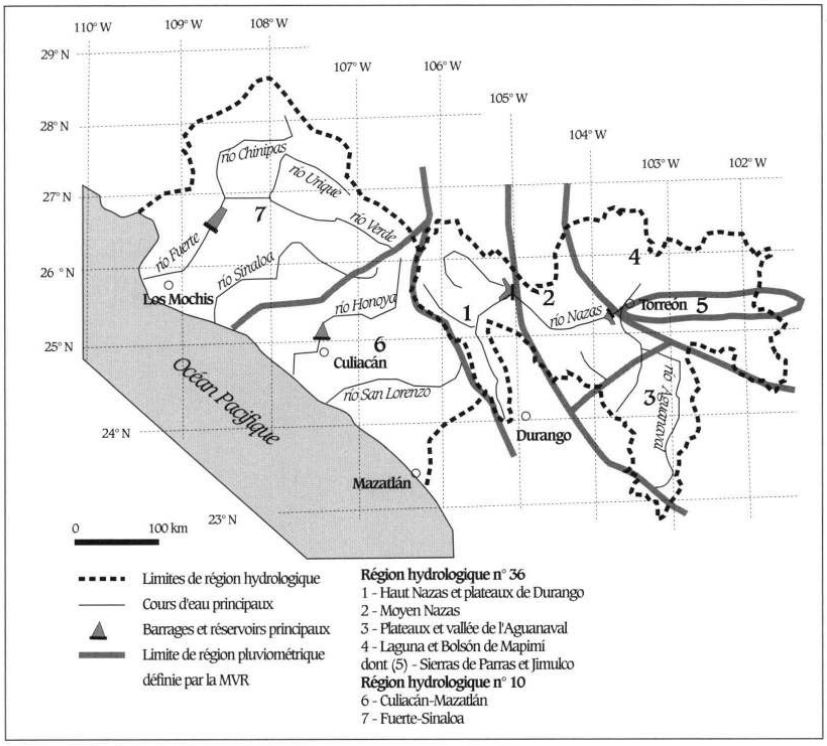


Fig. 23 –Spatialisation déterminée par la Méthode du vecteur régional.

Le rôle des facteurs locaux et zonaux dans la distribution spatiale des précipitations

8 Il est toujours délicat de rechercher les facteurs locaux pouvant expliquer la répartition spatiale des précipitations. Néanmoins, le premier regard sur la carte des isohyètes (fig. 21) permet de comprendre le rôle primordial de l'altitude et de la distance à l'Océan. Ceci est d'ailleurs paradoxalement bien plus net pour le versant intérieur (oriental) de la Sierra Madre occidentale. On y voit nettement la pluviométrie diminuer en même temps que l'altitude (on passe de 900 mm vers 2 800 m à 200 mm vers 1 100 m), et inversement à la distance au Pacifique. Les deux évolutions sont logiques et se retrouvent sous pratiquement tous les climats. Simplement, on a ici, du fait que la sierra est parallèle au

trait de côte (ce qui est dû à la tectonique régionale), une addition des deux phénomènes sur le versant interne.

9 Sur le versant Pacifique de la sierra, l'évolution est forcément plus complexe pour la simple raison que l'altitude augmente avec l'éloignement de la côte, ce qui fait que les deux facteurs se contrarient. Mais la complexité est accentuée par :

- le relief, très escarpé, du versant ouest de la chaîne ;
- un fort gradient latitudinal lié aux climats zonaux.

10 Le relief impose une très forte variabilité, spatiale et temporelle, des précipitations ; celle-ci serait encore plus marquée si la densité des postes était plus forte, car la variabilité est ici à l'échelle de ces vallées profondes et des lambeaux de plateaux qui les dominent parfois de plus de 1 500 m.

11 Par ailleurs, on est ici à des latitudes subtropicales ; on passe de fait, de climats tropicaux, au sud à des climats subtropicaux, au nord, caractérisés par un désert côtier sur le littoral (désert du Sonora) et des secteurs arides continentaux sur l'altiplano nord-central mexicain (désert de Chihuahua). De ce fait, il y a une configuration régionale de la pluviométrie, les secteurs littoraux ou leur immédiat arrière-pays étant les plus arrosés en zone tropicale. Mais 500 km plus au nord, les littoraux sont concernés zonalement par l'aridité côtière des façades ouest de continent aux latitudes subtropicales.

12 Du fait de cette complexité, on s'est intéressé ici uniquement au versant interne de la sierra ; on a voulu déterminer les facteurs locaux de la pluviométrie. Pour ce faire, on a réalisé deux analyses statistiques : une Analyse en composantes principales (ACP) et une Analyse factorielle des correspondances (AFC). Ces analyses permettent de classer et hiérarchiser les variables explicatives d'un phénomène (qui joue ici le rôle de variable dépendante vis-à-vis des autres, considérées comme indépendantes). L'ACP permet aussi d'en supprimer quelques-unes en mettant en évidence la redondance des variables. Ces analyses ont été faites à partir des données de précipitation annuelle des 52 stations les plus documentées de la Région hydrologique 36 (bassin du Nazas-Aguanaval).

13 L'ACP a été menée avec comme variable dépendante la pluviométrie, comme variables indépendantes l'altitude, la distance à l'océan Pacifique, la latitude, la longitude et la densité de la végétation sur trois aires (0,3, 16 et 94 km^2) autour du poste pluviométrique. La figure 24 montre l'espace des variables basé sur les deux premières composantes de l'ACP, qui représentent 75 % de la variance expliquée.

14

On remarque que la pluviométrie est le plus corrélée avec l'altitude (positivement) et avec la distance à l'Océan (MER) négativement. La végétation et la longitude (ouest, donc valeurs croissantes vers l'ouest) sont également corrélées positivement, mais à un moindre degré. Ceci, de même que le fait que ces dernières variables sont bien corrélées entre elles, s'expliquent aisément parce que les régions les plus hautes et les plus pluvieuses correspondent aux secteurs les plus proches de la ligne de partage des eaux avec les cours d'eau se jetant dans le Pacifique, c'est-à-dire les plus occidentales.

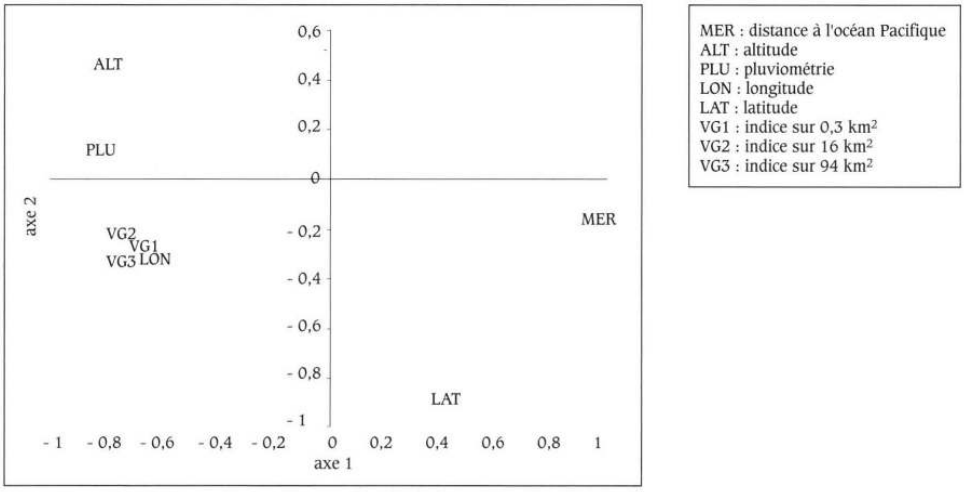


Fig. 24 – Plan principal des variables de l'AC (axes 1 et 2 ; 52 stations).

15 Pour pouvoir prendre en compte des valeurs non numérisables, on a mené à bien une AFC, analyse statistique qui est le pendant de l'ACP mais permet d'introduire des valeurs non numériques. Il faut toutefois déterminer des classes pour chacune des variables prises en compte, afin de les hiérarchiser si nécessaire, et de toutes manières, de les distinguer les unes des autres. Il faut noter qu'en établissant des classes aussi pour les variables qui ont des valeurs numériques (déjà prises en compte par l'ACP), on peut aussi les analyser dans l'AFC.

16 Les variables étudiées ici sont rassemblées dans le tableau XII. Ce sont celles qui ont servi à réaliser l'ACP, exceptées la longitude et la latitude, mais on y a ajouté le type de site et deux types d'exposition, celle du site (échelle kilométrique) et celle, plus globale, de la région du site (échelle de la vingtaine de km).

17 Les résultats sont exposés figure 25 ; celle-ci représente le plan des variables telles que classées (d'après le tableau XII), sur les axes 1 et 2 de l'AFC, qui représentent 60 % de la variance expliquée des variables.

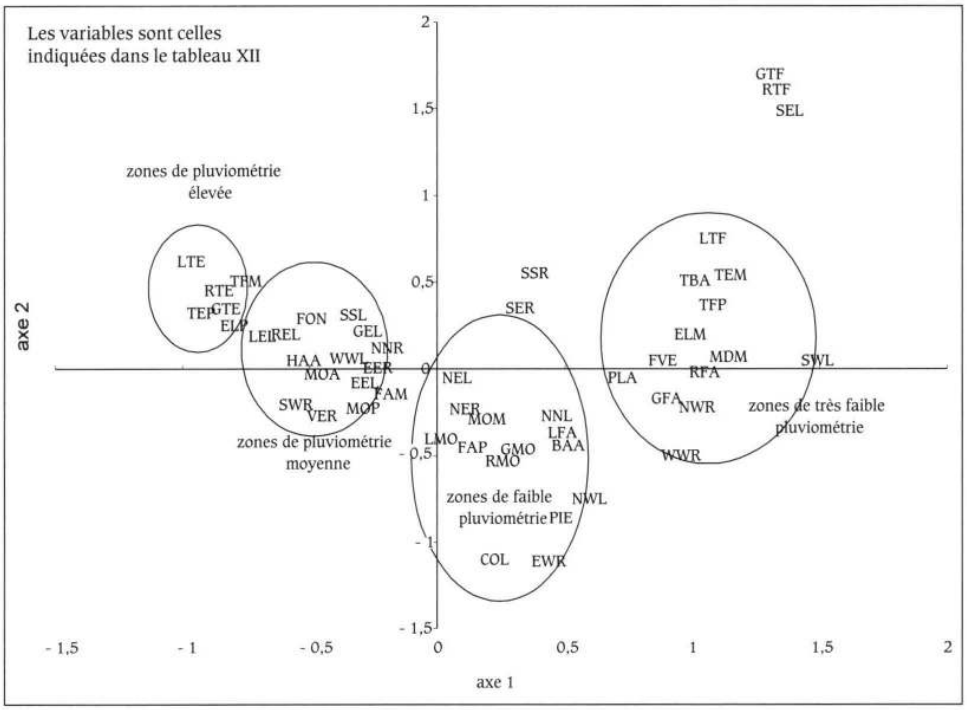


Fig 25 – Plan principal des variables de l'AFC (axes 1 et 2 ; 52 stations).

18 On peut constater que l'AFC permet de distinguer quatre « régions pluviométriques » différentes :

- une région de pluviométrie très faible (inférieure à 300 mm) ; elle est associée à un éloignement maximal de l'Océan, une altitude et des densités de végétation minimales, et à une situation en plaine ou de fond de vallée encaissée ; cette dernière configuration s'explique par la situation d'extrême abri de certains postes situés pourtant dans la Sierra Madre, mais dans des sites très protégés ;
- une région de faible pluviométrie (300 à 400 mm) associée à une distance à l'océan de 300 à 350 km, un indice de végétation normalisée NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) faible à moyen, une position de piedmont ou de col, une altitude comprise entre 1 200 et 1 600 m ;
- une région de pluviométrie moyenne, où l'on a une situation de versant ou de fond de vallée majoritaire, une pluviométrie de 400 à 550 mm, une altitude supérieure à 1 600 m, une distance à la mer comprise entre 250 et 300 km, un indice de végétation moyen à élevé ; cela correspond aux bas versants et aux fonds des deux grandes vallées du haut Nazas, dans la Sierra Madre (Sextin et Ramos) ;
- et une région de pluviométrie élevée (+ de 550 mm), qui correspond aux plus forts indices de végétation, aux plus hautes altitudes, aux zones les plus proches de l'océan Pacifique. Ces stations sont celles situées sur les hauts versants ou sur la ligne de partage des eaux entre les deux versants (RH36 et RH10).

Précipitations	Classes prédéterminées	Distance au Pacifique	Classes prédéterminées	Altitude	Classes prédéterminées
TFP	P < 300 mm	TFM	D < 250 km	TBA	A < 1 200 m
FAP	300-400 mm	FAM	250-300 km	BAA	1 200-1 600 m
MOP	400-500 mm	MOM	300-350 km	MOA	1 600-2 000 m
ELP	500-600 mm	MDM	350-400 km	HAA	A > 2 000 m
TEP	P > 600 mm	ELM	400-450 km		
		TEM	D > 450 km		
Vég. locale (30 ha)	Vég. éch. rég.16 km²	Vég. éch rég. 94 km²	Valeur NDVI (Classes prédéterminées)	Type de site	Classes prédéterminées
LTF	RTF	GTF	120-128	FON	fond de vallée
LFA	RFA	GFA	128-135	VER	versant
LMO	RMO	GMO	135-141	PLA	plaine
LEL	REL	GEL	141-146	FVE	vallée encaissée
LTE	RTE	GTE	146-154	COL	col
				PIE	piedmont
Exposition du site (XXL)	Expo. de la région (XXR)	Classes prédéterminées			
NNL	NNR	Nord			
NWL	NWR	Nord-Ouest			
WWL	WWR	Ouest			
EEL	EER	Est			
NEL	NER	Nord-Est			
SEL	SER	Sud-Est			
SWL	SWR	Sud-Ouest			
SSL	SSR	Sud			

Tabl. XII – Les variables de l'Analyse factorielle des correspondances.

19 On constate par ailleurs que hormis la première zone où aucune exposition n'est remarquée (on est au fond du Bolsón de Mapimi essentiellement), les types d'exposition ne permettent pas de classer les régions ; on les trouve, tous, dans les trois autres zones.

20 La régionalisation telle que définie par l'analyse statistique n'est pas très différente de celle obtenue grâce à la Méthode du vecteur régional. Il lui manque les régions 6 et 7 du découpage MVR, qui sont absentes ici car on n'a pas considéré le versant Pacifique de la sierra. Par ailleurs, les régions 2 et 3 sont ici découpées presque de la même manière car les plateaux de l'Aguanaval (région 3 de la figure 23) sont à plus haute altitude que la vallée du Nazas (région 2), ce qui lui permet d'en être distinguée par l'AFC qui tient compte de l'altitude ; mais ces régions sont néanmoins *grosso modo* les mêmes.

Conclusion

21 Les régions homogènes restent les mêmes quelle que soit la méthode utilisée, montrant une certaine redondance de l'information (DESCROIX ef *al.,* 2001). Les régions telles que définies, ainsi que les variogrammes destinés à connaître la distance de dé-corrélation (ou, à l'inverse, la distance maximale de validité du signal pluviométrique), semblent donc suffisamment robustes pour permettre une extension de l'information obtenue sur les quelques postes pour lesquels on a de longues séries d'observations, et qui fournissent pour l'essentiel une information de bonne qualité.

22 L'une ou l'autre et a *fortiori* l'ensemble de ces méthodes permettent de pallier la faible densité du réseau et d'obtenir une information spatialisée pour mieux prévoir les quantités précipitées sur les zones peu instrumentées, et régionaliser aussi les risques de crues et d'inondation et à l'inverse, de sécheresses et de pénurie.

BIBLIOGRAPHIE

Références

DESCROIX L., NOUVELOT J.-F., ESTRADA J., 1997 – Geografía de las lluvias en una cuenca del Norte de México : regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. *Foll. Cient.* n° 8, Orstom/Cenid-Raspa, Gómez Palacio.

DESCROIX L., NOUVELOT J.-F., ESTRADA J., 2001 – Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations, application à une région endoréique du Nord-Mexique. *Revue des Sciences de l'Eau,* 14 (3) : 281-305.

GUTIERREZ A., 2003 – *Modélisation stochastique des précipitations à l'échelle régionale pour la prévision des crues au Nord-Mexique.* Thèse de l'université Joseph Fourier-Grenoble 1, 150 p.

HIEZ G., 1986 – « Bases théoriques du vecteur régional (les premières applications et leur mise en œuvre informatique) ». *In : Deuxièmes journées hydrologiques de l'Orstom à Montpellier,* 16-17 sept. 1986, coll. Colloques et séminaires : 1-36.

NOUVELOT J.-F., DESCROIX L., 1996 – Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. *Trace,* revue du Centre français d'études mexicaines et centroaméricaines, n° 30 : 9-24.

AUTEURS

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

JEAN-FRANÇOIS NOUVELOT

Hydrologue, directeur de recherche retraité de l'IRD, il a dirigé le programme de 1995 à 1997.

JUAN ESTRADA

Hydrologue, chercheur au Cenid Raspa.

ALFONSO GUTIERREZ

Hydrologue, chercheur à l'IMTA (Cuernacava).

Un encroûtement des sols limitant l'infiltration

Jérôme Poulenard, Luc Descroix, José Luis Gonzalez Barrios, David Viramontes et Jean-Louis Janeau

Introduction

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

2 Les études sur parcelles et bassins versants expérimentaux dans différentes régions climatiques du globe montrent une augmentation des écoulements lors des coupes forestières et des compactages des sols, surtout s'ils ont lieu sur de grandes superficies. Ces interactions ont fait l'objet de nombreuses études : en climat tropical humide, (FRISTCH, 1990 ; CALDER et *al.,* 1995 ; Woo *et al.,* 1997 ; SCOTT MUNRO et HUANG, 1997), en climat méditerranéen (KOSMAS et *al.,* 1997 ; et SORRISO-VALVO et *al.,* 1994), en climat tempéré (COSANDEY et *al.,* 1990 ; GALEA et *al.,* 1993 ; HUDSON et GILMAN, 1993 ; CROKE *et al.,* 1999) ; en climat semi-aride et aride (SNELDER et BRYAN, 1995 ; BERGKAMP, 1998).

3 Malgré l'uniformité de leurs réponses, les chercheurs intéressés par les processus avancent diverses explications (AMBROISE, 1998) ; celles-ci évoquent la part de la végétation, des sols, et des modifications du milieu elles-mêmes, tous facteurs qui interagissent dans le milieu naturel. Le cheminement de l'eau peut suivre et les flux fonctionnent de façon diverse dans le temps et dans l'espace. Le simple couple entrée (pluie) et sortie (ruissellement) de l'eau dans le bassin versant ne montre pas la forte complexité du cheminement de l'eau dans le système.

Présentation des sols de la Sierra Madre

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

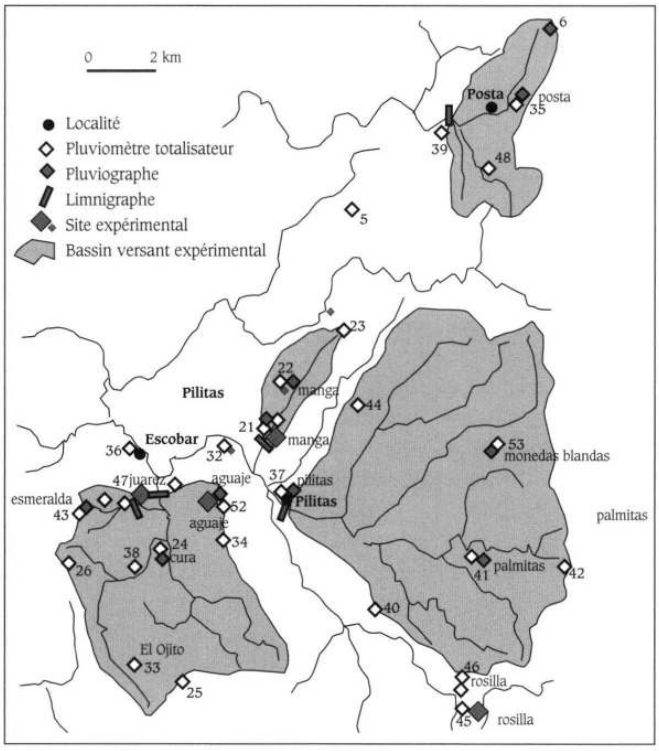


Fig. 26 - Les bassins versants expérimentaux de la Sierra Madre occidentale et le réseau de mesure hydro-météorologique.

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

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

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

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

Les Leptosols

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

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

Les Cambisols

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

- les Cambisols chromiques, ayant un **chroma** élevé ;
- les Cambisols vertiques, riches en argiles, avec horizons de structure massive et fissurés à sec ;
- les Cambisols **gleyiques**, ayant des horizons soumis à l'influence d'une nappe.

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

13 Il en résulte :

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

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

Les Phaeozems

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

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

L'eau dans les sols de la Sierra Madre

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

Les éléments grossiers

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

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

20 Cette forte pierrosité est bien sûr liée à la présence de sols peu épais (Leptosols notamment) et donc à la proximité de la roche mère conduisant à une abondance de cailloux, pierres et blocs. On peut aussi dans certaines zones la concevoir comme la

résultante de phénomènes érosifs actifs ayant fait migré les particules fines : accumulation relative d'éléments grossiers (EG) par départ des particules fines.

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

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

22 Pente → érosion → départ préférentiel des fines → teneur relative en éléments grossiers plus forte.

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

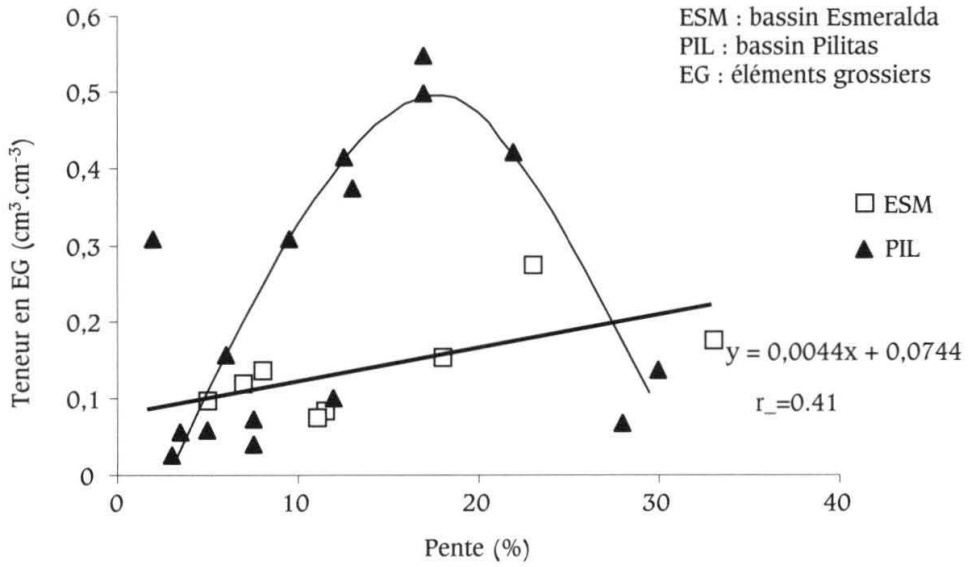


Fig. 27 – Relation entre la pente et la teneur en éléments grossiers, bassins de Esmeralda et Pilitas.

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

Texture et carbone

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

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

26 Il est surtout remarquable que l'on observe une extrême variabilité de toutes les propriétés physiques du sol (DESCROIX *et al.,* 2002), tant en termes de conductivité, de densité apparente, de porosité, que de granulométrie (dans le cas présent), en particulier de teneur en argile et en éléments grossiers. Difficile donc de faire une classification des sols d'après leur texture. Ceci se reflète bien sûr par une extrême variabilité des capacités d'infiltration des sols. La variabilité des teneurs en carbone (et du stock total de carbone) est à mettre en relation avec la dynamique actuelle des surfaces, les mises à nu activant fortement la minéralisation du carbone des sols (PODWOJEWSKI *et al.,* 2002) et de la végétation (surpâturage, remplacement des chênes par les pins...). Les teneurs en carbone (en $g.kg^{-1}$ de terre fine, c'est à dire < 2 mm) sont assez élevées alors que les stocks calculés sur 10 cm sont plutôt faibles, ce qui est lié à l'abondance des éléments grossiers. Cela illustre le problème d'une expression pondérale sur la terre fine alors qu'il y a beaucoup

d'éléments grossiers, et l'intérêt de revenir à une expression volumique des teneurs. En effet, la richesse en carbone de la terre fine n'a pas de sens, si elle ne représente qu'une très faible partie du volume.

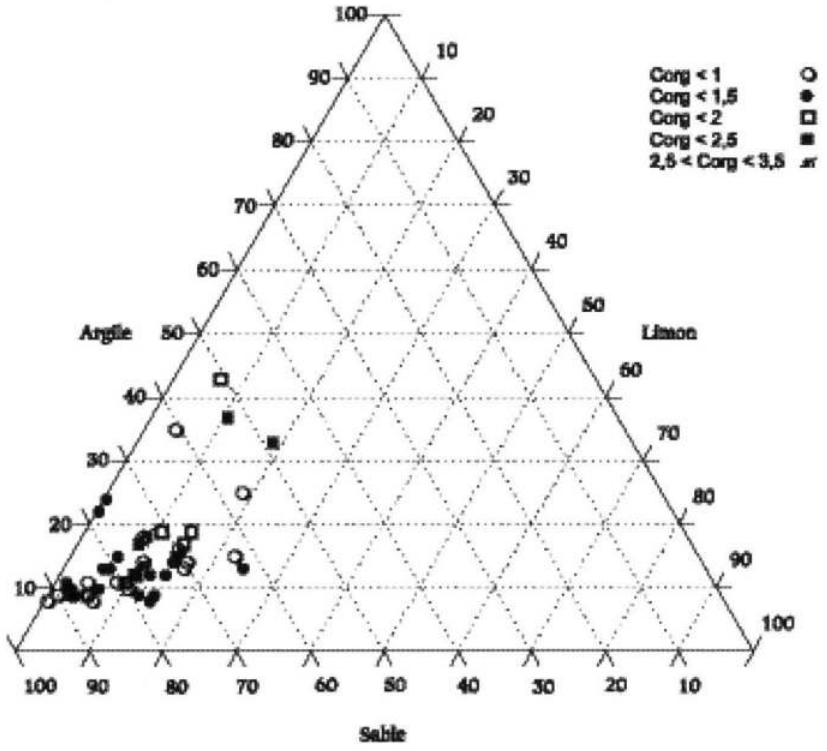


Fig. 28 – Répartition des sols sur le diagramme des textures, en fonction de leur teneur en matière organique.

Porosité

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

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

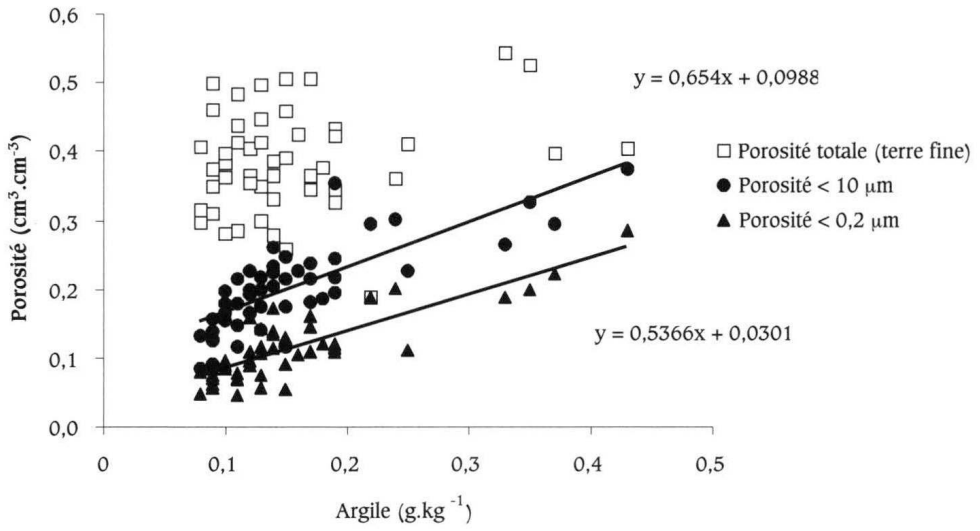


Fig. 29 - Relation entre la porosité des sols et leur teneur en argile dans la Sierra Madre occidentale.

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

29 Enfin, la porosité constituée de pores > 10 um, utiles au transfert rapide d'eau est très clairement indépendante des teneurs en argile.

Les états de surface dans la Sierra Madre occidentale

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

Des états de surface « jeunes »

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

les plus élevés sont ceux où les coupes se font dans un but d'exploitation forestière ; la plus forte pluviométrie et la présence de nombreux arbustes et des résidus d'exploitation de la forêt protègent pour le moment les sols d'un trop fort impact du piétinement (les troupeaux peuvent paître jusqu'aux crêtes).

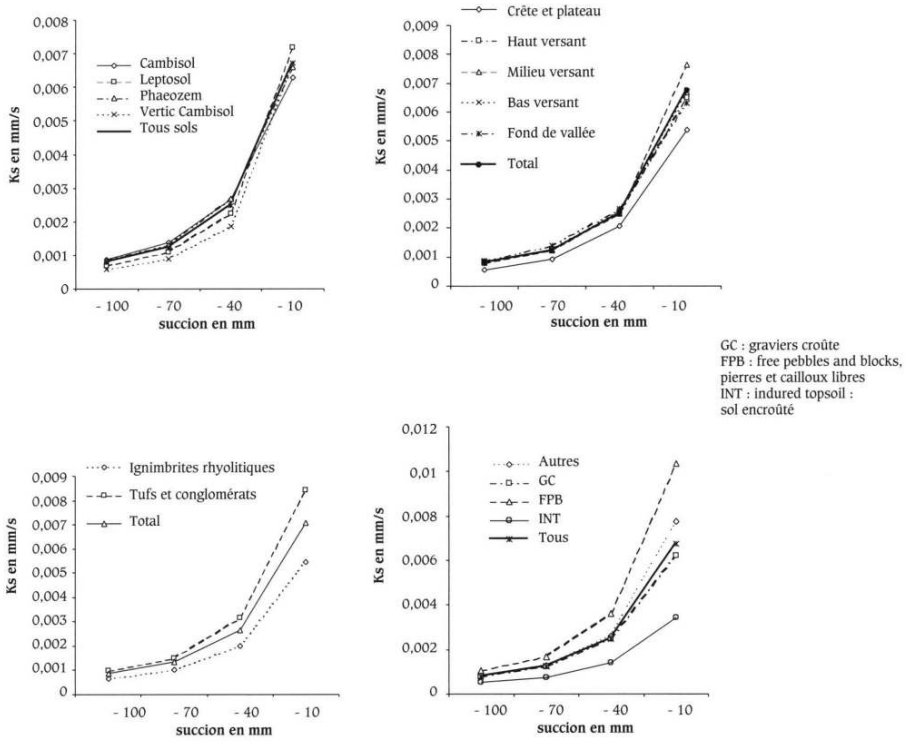


Fig. 30 – Classification des mesures de conductivité hydraulique suivant les types de sol, la lithologie, la position du site de mesure sur le versant, et les états de surface.

Typologie

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

GC (graviers croûte ou gravel-crust)

33 Cet état de surface est typique des zones de pâturage de pente comprise entre 2 et 20° ; il s'agit (fig. 31) d'une mince croûte de particules fines de sols dans laquelle les graviers sont incrustés, limitant sérieusement l'infiltration de l'eau et favorisant donc le ruissellement. Sa formation est liée à l'impact du **splash** sur les plages de sol dénudé de plus en plus étendues ; ce processus déplace les plus fines particules du sol, qui viennent boucher les pores et fixer les graviers (< 20 mm) dans la matrice. Ce type de croûte correspond aux secteurs connaissant de forts coefficients de ruissellement et des pertes en sols élevées et on le trouve dans tous les endroits surpâturés où s'accroissent les zones de sol nu. Il correspond aussi aux croûtes définies par CASENAVE et VALENTIN (1989) ;

comme l'ont observé POESEN *et al.* (1990), l'incrustation des graviers dans la croûte explique les hauts coefficients de ruissellement.

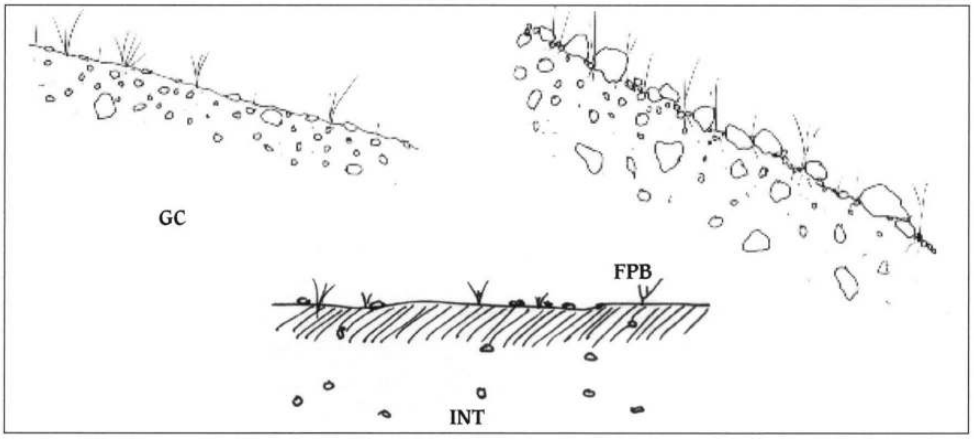


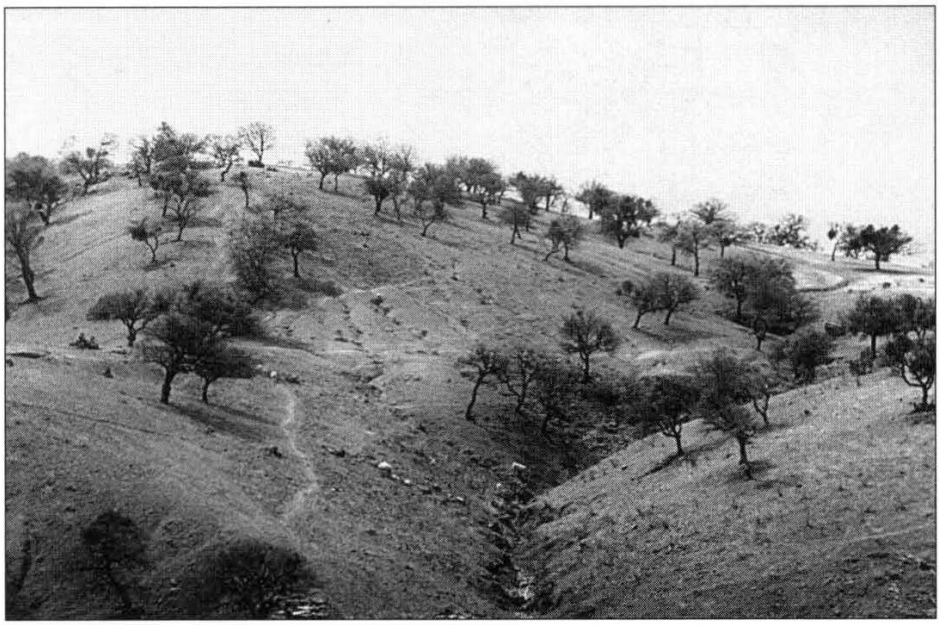
Fig. 31 – Profil des trois principaux états de surface décrits.

INT (Indurated topsoil, sols encroûtés)

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

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

35 On trouve ce type de surface sous forêt mais surtout dans les pâturages, là où les pentes dépassent 20°. Il est caractérisé par une forte proportion de blocs, pierres et cailloux (> 20 mm), non encastrés dans la matrice (fig. 30). Si la charge bétaillère excessive se maintient après la formation du pavage, les terrassettes apparaissent du fait du piétinement. Le fait que les cailloux ne s'encastrent pas dans la matrice est dû à leur grand nombre, à leur taille, mais surtout à la conjonction de la pente et du passage incessant des troupeaux, qui les déplacent constamment.



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

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

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

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

38 Si 95 % de l'espace non forestier est surpâturé et comprend un des types de surface considérés ici comme découlant de la surexploitation des herbages, il est difficile d'imaginer que cela n'a pas d'impact hydrologique. Nonobstant le fait que sur les pentes fortes, le processus de dégradation semble « auto-freiné » par le pavage de la surface, ce

type de formations superficielles est bien plus enclin au ruissellement que les rares sites protégés et enclos depuis longtemps où l'on peut encore observer les profils du sol avant dégradation

Conclusion

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

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

BIBLIOGRAPHIE

Références

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

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

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

CALDER I.R., HALL L.R., BASTABLE H.G., GUNSTON H.M., SHELA O., CHIRWA A., KAFUNDU R. (1995) – The impact of land use change on the water resources in sub-Saharan Africa : a modelling study of lake Malawi. *Journal of Hydrology,* 170: 123-135.

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

COSANDEY C, BOUDJEMLINE D., ROOSE E., LELONG F., 1990 – Étude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du mont Lozère. *Z für, Géomorphologie,* 34 (1) : 61-73.

CROKE J., HAIRSINE P., FOGARTY P., 1999 – Runoff generation and redistribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology,* 216 : 56-77.

DESCROK L., VIRAMONTES D., VAUCLIN M., GONZALEZ BARRIOS J.L., ESTEVES M., 2001 - Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre. *Catena,* 43:115-135.

DESCROIX L., GONZALEZ BARRIOS J.L., VANDERVAERE J.P., VIRAMONTES D., BOLLERY A., 2002 – An experimental analysis of hydrodynamic behaviour on soils and hillslopes in a subtropical mountainous environment (Western Sierra Madre, México). *Journal of Hydrology,* 266 : 1-14.

ESTRADA J., 1999 – *Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique.* Thèse de l'université Montpellier 2,320 p.

FAO/ISR1C/ISSS, 1998 - *World Soil Resources.* Report n° 81 FAO, Rome.

FRITSCH J.M., 1990 – *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants en Guyane française.* Thèse, université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 390 p.

GALEA G., BREIL P., AHMAD A., 1993 -Influence du couvert végétal sur l'hydrologie des crues, modélisation à validations multiples. *Hydrol. Continent.,* 8 (1) : 17-33.

GONZALEZ BARRIOS J.L., 2000 – « Los suelos de la sierra ». Memorias del Seminario sobre el uso y manejo del agua en las cuencas hidrológicas de México. IRD-lnifap Cenid Raspa. Gómez Palacio, Dgo. Junio 2000.

HUDSON J.A., GILMAN K., 1993 – Long-term variability in the water balances of the Plynlimon catchments. *Journal of Hydrology,* 143 : 355-380.

ISSS, ISRIC, FAO, 1998 – *World Reference Base for Soil Resources.* World Soil Resources Reports n° 84. Rome, Italy, Éditions FAO, 92 p.

KOSMAS C, DANALATOS N., CAMMERAT L.H., CHABART M., DIAMANTOPOULOS J., FARAND R., GUTIERREZ L., JACOB A., MARQUES H., MARTINEZ-FERNANDEZ J., MIZARA A., MOUSTAKAS N., NICOLAU J.M., OLIVEROS C, PINNA G., PUDDU R., PUIGDEFABREGAS J., ROXO M., SIMAO A., STAMOU G., TOMASI N., USAI D., VACCA A., 1997 – The effects of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena,* 29 : 45-59.

PODWOJEWSKI P., POULENARD J.,

ZAMBRANA T., HOFSTEDE R., 2002 -Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the paramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management,* 18:45-55.

POESEN J., INGELMO-SANCHEZ F., MUCHER H., 1990 – The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surf. Process. Landforms,* 15 : 653-671.

POULENARD J., 1995 - *Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre occidentale.* Projet Orstom-Cenid Raspa, Mexique. Mémoire de fin d'études Istom, 82 p.

SCOTT MUNRO D., HUANG L.J., 1997 – Rainfall, evaporation and runoff responses to hillslope aspects in the Shenchong Basin. *Catena,* 29 : 131-144.

SNELDER D.J., BRYAN R.B., 1995 – The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya, *Catena,* 25 :105-116.

SORRISO-VALVO M., BRYAN R.B., YAIR A., LOVINO F., ANTRONICO L., 1994 – Impact of afforestation on hydrological response and sediment production in a small Calambrian catchment. *Catena,* 25:89-104.

VIRAMONTES D., 1995 – Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas. *Folleto científico n° 3*, publication Orstom-Cenid Raspa, Éditeur Cenid Raspa, Gómez-Palacio Durango, Mexique.

VIRAMONTES D., DESCROK L., BOLLERY A., POULENARD J., 2002 – Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre occidentale : processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis à la surexploitation. *Géomorphologie,* 3 : 239-255.

WOO M., FANG G., DICENZO P., 1997 – The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena,* 29 : 145-149.

AUTEURS

JÉRÔME POULENARD

Pédologue, maître de conférences à l'université de Savoie (Chambéry).

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

JOSÉ LUIS GONZALEZ BARRIOS

Hydro-pédologue, directeur de recherche au Cenid Raspa (Inifap) de Gômez Palacio.

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

JEAN-LOUIS JANEAU

Pédologue à l'IRD, en poste à Bangkok, a travaillé de 1990 à 1995 dans le désert de Chihuahua et a participé au programme « Sierra Madre » en nous aidant à caractériser les états de surface de la sierra.

Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe

José Luis Gonzalez Barrios, Luc Descroix, David Viramontes, Jérôme Poulenard, Alain Plenecassagne, Laura Macias, Christelle Boyer et Arnaud Bollery

1 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.

2 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 km^2. 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 Sardinas (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

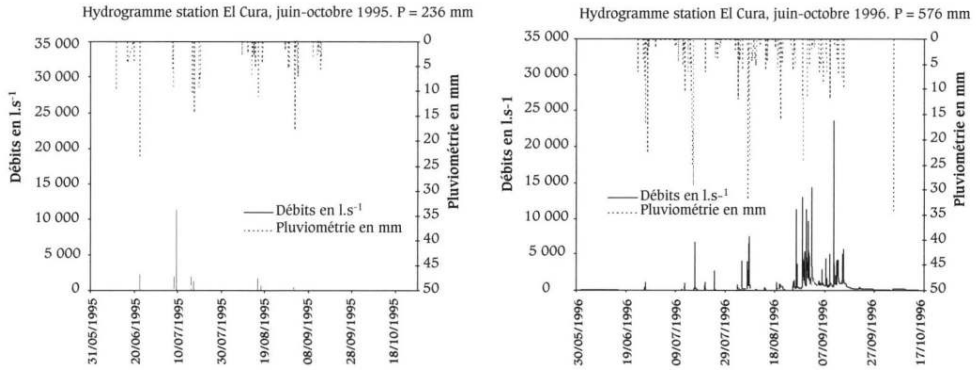
Un comportement hortonien ?

3 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°).

4 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.

5 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

6 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 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 » ?

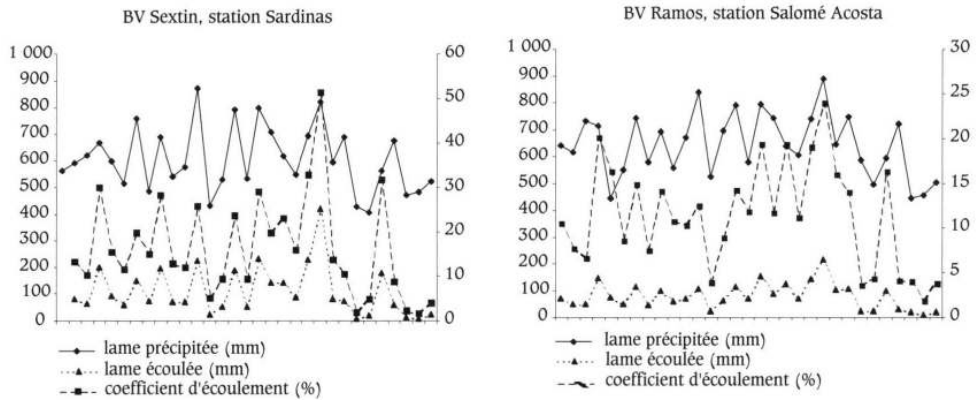


Fig. 33 – Pluviométrie, débits observés et coefficient d'écoulement pour les bassins du Sextin (gauche) et du Ramos (droite) de 1970 à 2000.

7 *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.

8 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.

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

9 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.

10 Tout d'abord on remarque que le déficit pluviométrique, à l'échelle des grands bassins (4 660 km^2 pour le Sextin ; 7 130 km^2 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 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.

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

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

Note *

11 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.

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.

12 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.

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

13 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 ».

14 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

15 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 :

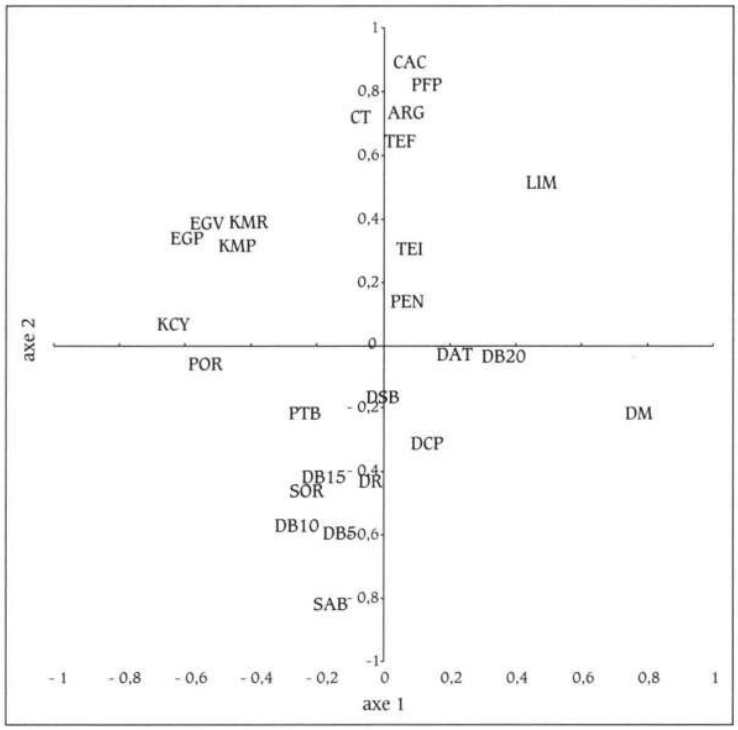
- **capacité au champ ;**
- **point de flétrissement ;**
- teneur en matière organique ;
- carbone total ;
- **espace poral.**

16 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.

17 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.

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

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

19 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.

20 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.

21 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.

22 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.

23 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.

24 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.

25 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 ;
- elle est reliée négativement à la pente, à la rugosité et à tous les éléments qui composent cette rugosité : terrassettes, pierrosité, présence de graviers.

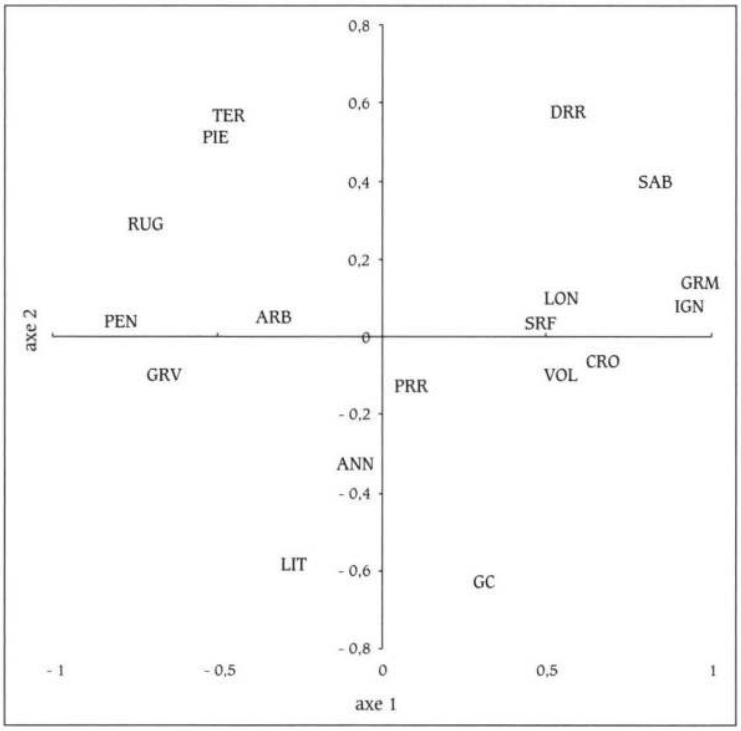


Fig. 35 – Espace des variables de l'AFC sur les ravines (tiré de travaux en cours).

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

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

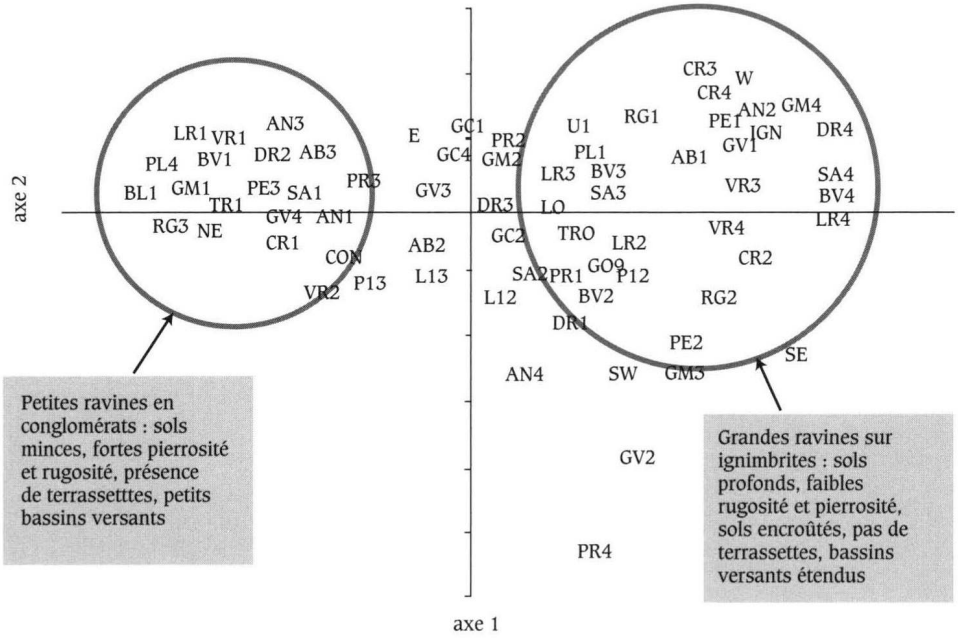
- les secteurs en pente douce et aux versants longs, encroûtés et pâturés, qui connaissent un fort ravinement si les sols sont suffisamment profonds ; l'érosion laminaire y est présente aussi, comme en témoignent l'appauvrissement des horizons superficiels en éléments fins,

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.

28 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	BL0 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	TR0 TR1	NON OUI			

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

29 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 conductivité hydraulique extrême PI L 32 et 33 s'écartent sensiblement de cette régression exponentielle et constituent des horsains, c'est-à-dire des éléments statistiquement isolés. Quoi qu'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).

30 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.

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

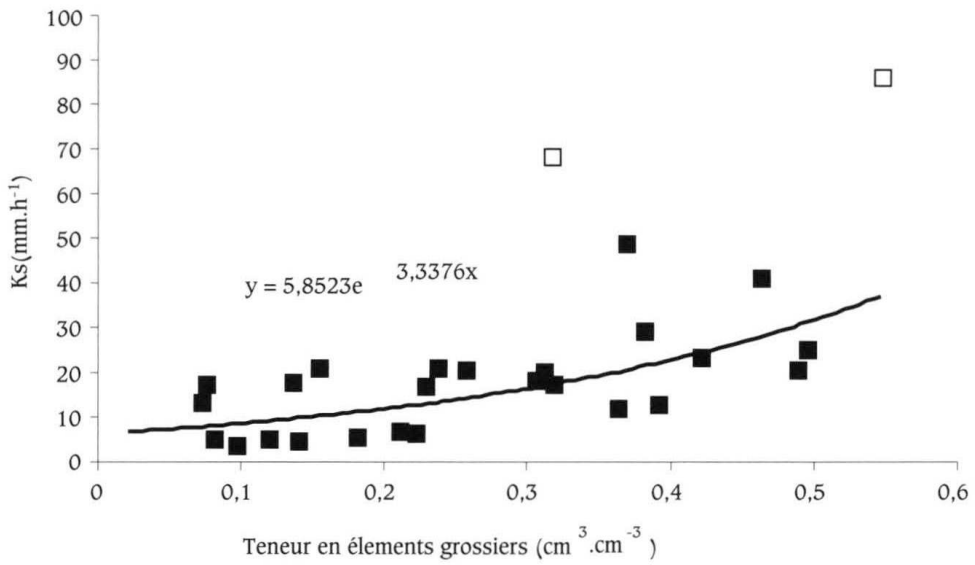


Fig. 37 – Corrélation entre conductivité hydraulique et teneur en éléments grossiers.
Les deux carrés blancs représentent les points PIL 32 et PIL 33 mentionnés dans le texte.

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.

32 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 (Ks) 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.

33 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 (CASENAVE 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.

34 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

35 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 km^2. 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.

BIBLIOGRAPHIE

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., VAUCUN 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 México). *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, México). *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., BLANCANEAUX 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.

NOTES DE FIN

***.** 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).

AUTEURS

JOSÉ LUIS GONZALEZ BARRIOS

Hydro-pédologue, directeur de recherche au Cenid Raspa (Inifap) de Gômez Palacio.

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

JÉRÔME POULENARD

Pédologue, maître de conférences à l'université de Savoie (Chambéry).

ALAIN PLENECASSAGNE

Ingénieur chimiste à l'IRD.

LAURA MACIAS

Ingénieure informaticienne au Cenid Raspa (Gômez Palacio).

CHRISTELLE BOYER

Géographe, fonctionnaire territoriale au département de la Drôme (Valence).

ARNAUD BOLLERY

Géographe, chargé des systèmes d'information géographique au conseil général de l'Isère (Grenoble).

Pâturages et forets sous pression

Introduction

1 Les paramètres sociaux et humains tels qu'analysés dans la première partie, et les facteurs physiques, décortiqués dans la deuxième partie, se combinent pour expliquer l'évolution des milieux anthropisés de la Sierra Madre occidentale. De fait, l'état des pâturages et de la forêt se ressentent de décennies d'exploitation de type minier. Cette surexploitation du milieu dans la Sierra Madre occidentale (cf. « Trop de bétail et trop de bûcherons. Une économie minière », p. 191) s'est traduite par une modification des paysages sur de grandes étendues : sols nus, pieds de vaches, pâturages dégradés, forêts très éclaircies, et de fait, par une évolution parallèle des états de surface et des conditions qui président au devenir de l'eau de pluie arrivant au contact du sol ; les sols, érodés, amincis, encroûtés ou indurés, laissent bien moins infiltrer l'eau de pluie.

2 L'étendue croissante de ces espaces dégradés a déjà entraîné des modifications des régimes hydrologiques (cf. « Une eau menacée par la dégradation des ressources végétales », p. 207). En effet, on peut craindre qu'à terme, ces changements de conditions de surface n'affectent l'ensemble du cycle terrestre de l'eau. Or rappelons qu'une des hypothèses de départ est bien que la Sierra Madre est un château d'eau pour l'ensemble du Nord du pays. Les déséquilibres remarqués à petite échelle se concrétisent déjà à grande échelle sur les régimes. La question de savoir si une dégradation prononcée de la végétation pourrait avoir une rétroaction sur la pluviométrie reste du domaine de la spéculation ; on l'aborde sous la forme d'un débat bibliographique (cf. « Influence de la forêt sur la pluviométrie », p. 221). Mais cette question reste posée, et est d'ailleurs l'une des questions scientifiques fondamentales de bien des programmes de recherche à l'heure actuelle[1]. Cela fait toutefois très longtemps qu'une telle interrogation hante le travail des chercheurs en sciences de la Planète.L'ensemble des questions posées dans cette troisième partie, qui est elle-même au cœur des recherches qui ont été menées durant douze ans dans la Sierra Madre, peut se ramener à deux conclusions cruciales :

- les modifications des paysages et des sols observées à grande échelle (celle des unités de sols) ont des répercussions, à petite échelle, sur les grands bassins versants et leur comportement hydrologique ;
- et de ce fait, la gestion de la ressource en eau doit en fait être une gestion de l'espace ; il faut intégrer dans les organismes de gestion de l'eau les usagers de l'espace même s'ils ne semblent pas a *priori* des usagers de l'eau. En tant qu'usagers de l'espace, *ici l'espace agro-pastoral et/ou forestier*, les exploitants agricoles et les bûcherons ont un rôle dans la

modification du cycle hydrologique, et doivent donc être à part entière considérés comme des usagers de l'eau.

3 En effet, en laissant se dégrader un pâturage, un éleveur a une responsabilité vis-à-vis des utilisateurs de l'eau situés en aval ; de même un forestier qui abattrait un pan de forêt à blanc (ce qui, d'ailleurs, est interdit au Mexique). L'une et l'autre de ces actions a des conséquences en terme hydrique et peut donc modifier le bilan de l'eau, ou au moins le régime des eaux, ce qui à son tour peut compromettre l'approvisionnement des usagers en aval.

4 *Il faut réapprendre à considérer l'ensemble sol-végétation-eau comme une seule et même ressource ;* une modification de l'un des termes a des répercussions sur les deux autres.

NOTES

1. Elle est une des questions scientifiques majeures posées au programme AMMA, Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine, qui est, en 2005 au début de sa phase intensive.

Trop de bétail et trop de bûcherons

Une économie minière

David Viramontes, Eva Anaya, Coral Garcia, Jérôme Poulenard, Henri Barrai, Laura Macias et Maria Guadalupe Rodriguez Camarillo

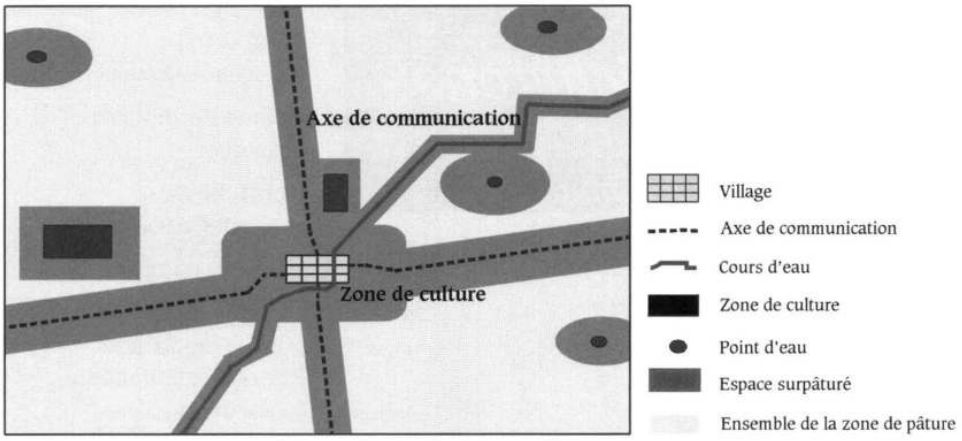
1 On a vu que cette surexploitation prenait essentiellement deux formes : le surpâturage et la déforestation. L'un et l'autre sont très répandus, voire constituent la règle.

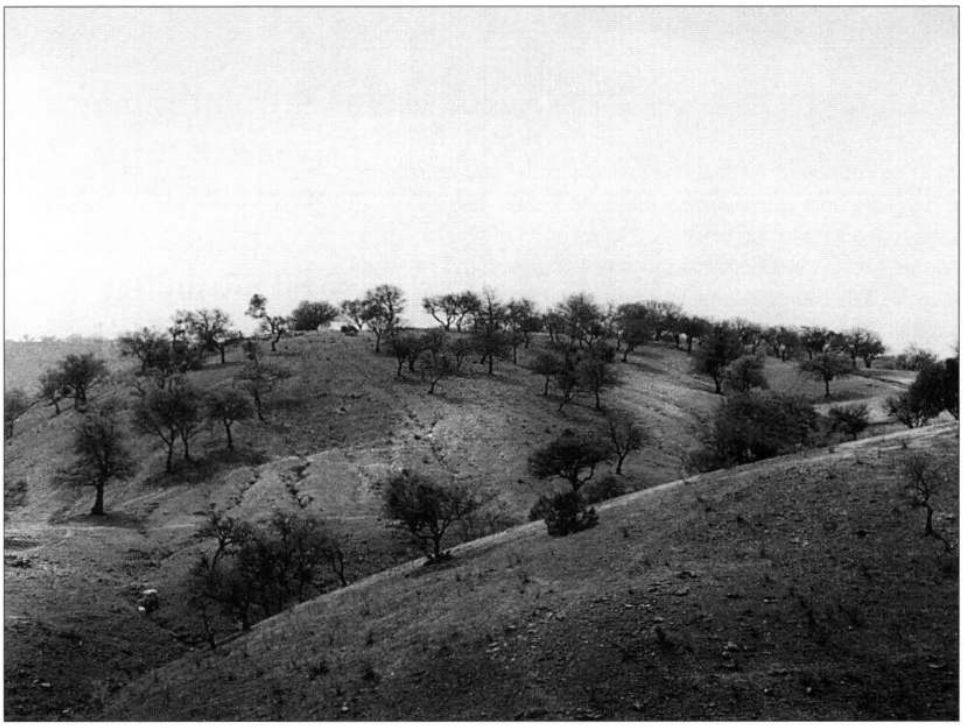
Surpâturage : y-a-t-il trop de têtes de bétail, ou plus assez de gardiens de troupeaux ?

2 Malgré un système d'exploitation rustique et peu rentable, l'élevage extensif de bœufs d'embouche est l'activité économique principale et traditionnelle de cette région. C'est une forme d'exploitation caractéristique des pays en voie de développement (le bétail vit presque en liberté), avec une ambiance de western (à l'exception des vieux « pickup » des années soixante-dix comme moyen de transport). La nécessité économique, les aides du gouvernement pour la production ainsi que la vente du bétail assurée tous les ans, promeuvent l'élevage dans cette région comme une activité prospère. Cependant, le pâturage semble se faire sans aucune réflexion sur la pérennisation de l'exploitation.

3 Dans la gestion spatiale des terres de parcours, il existe un roulement au cours de l'année : durant la saison des pluies, une partie des terres est inaccessible au bétail pour permettre une régénérescence de la couverture végétale (la réserve), alors que le reste des terres est ouvert au pâturage. Ce système existait du temps des *ejidos* et a été maintenu dans certains villages. Cependant, malgré de grandes surfaces de pâturage le roulement ne s'effectue pas sur des périodes assez longues pour permettre une bonne récupération de la végétation. Ce phénomène est cumulatif et il aboutit à une dégradation à long terme et à la diminution de la capacité productive de la zone.

Fig. 38 – Zones de surpâturage (d'après POULENARD, 1995).





Environs de La Posta de Jihuites : « pâturages » surexploités.

4 On observe un surpâturage aigu autour des points d'eau, des axes de communication et des villages (fig. 38). Ces zones étaient considérées comme les plus soumises à la pression pastorale, et donc à la dégradation des sols (POULENARD, 1995). Le cheminement des animaux se fait toujours vers un point d'eau ; cette distance que doit parcourir un animal jusqu'au lieu d'abreuvement conditionne la densité animale en chaque point. Plus cette distance est courte, plus la densité observable est forte. Les éleveurs sont aussi désireux d'assurer une surveillance, même lointaine, des troupeaux. La peur des vols de bétail, historiquement nombreux et encore très fréquents, est l'une des causes culturelles de ce désir de concentration de bétail autour des villages.

5 Comme les montagnes du sud de l'Europe jusqu'à il y a quelques décennies, ou comme celles d'Afrique du Nord de nos jours, les montagnes d'Amérique latine font face

actuellement à une surexploitation qui y accentue les phénomènes de dégradation des sols et de la végétation (DE NONI et al., 2001). La Sierra Madre occidentale ne fait pas exception, et le bassin du Nazas, dans l'État de Durango, a fait l'objet de recherches portant sur la dégradation de la couverture végétale du fait du déboisement (RODRIGUEZ, 1997) et du surpâturage (POULENARD et al., 1996), sur les états de surface créés par cette surexploitation (DESCROIX et *al.,* 2001), ainsi que sur les conséquences hydrologiques de cette dégradation à l'échelle du bassin (VIRAMONTES, 2000 ; VIRAMONTES et DESCROIX, 2002, VIRAMONTES et DESCROIX, 2003).

6 Il faut bien mesurer l'ampleur du problème. Dans le secteur du haut Nazas, qui est représentatif de l'essentiel de la Sierra Madre, le surpâturage est extrêmement prononcé, et on a mesuré des charges pastorales trois à quatre fois supérieures à celles autorisées par la qualité des herbages (VIRAMONTES et DESCROIX, 2002). Le tableau XVII montre bien l'ampleur de la surexploitation de l'espace dans cette région (cf. encadré 5 « L'appréciation du surpâturage », p. 201).

7 Ce déséquilibre entre la ressource et sa consommation est certes en partie amoindri par les disponibilités en fourrage que les paysans peuvent donner au bétail après la récolte du maïs grain (fig. 39) ; néanmoins, on voit qu'il y a tout de même un sérieux déficit en pâturage.

Tabl. XVII – Charge bétaillère observée et souhaitable dans deux communautés rurales du haut Nazas (en hectare par UGB, Unité de gros bétail).

Communauté rurale	Pâturage disponible 1994	Pâturage nécessaire1994	Pâturage disponible 1997	Pâturage nécessaire 1997
Posta de Jihuites	2,25	10,50	3,75	9,67
Boleras	3,95	19,40	5,26	17,14
Ensemble	3,38	16,34	4,83	14,64

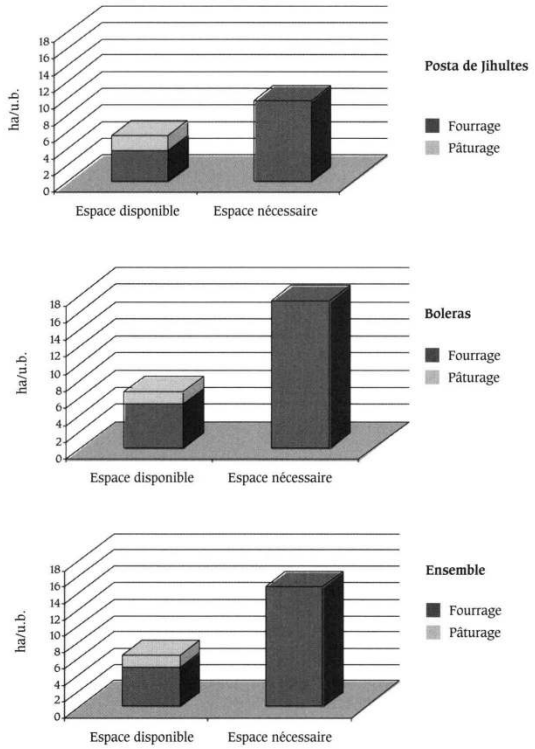
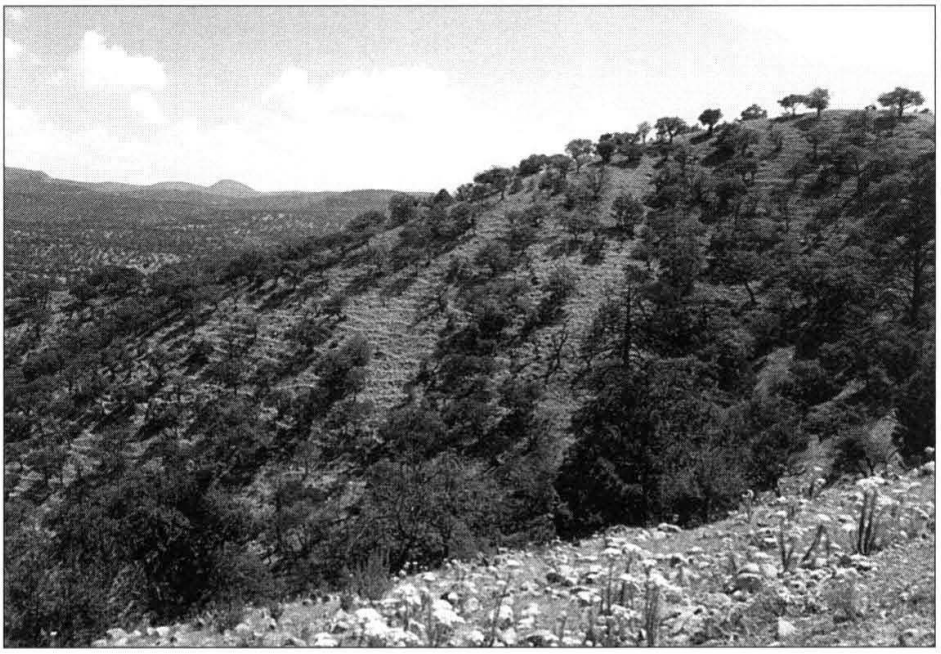


Fig. 39 – Ampleur du déficit fourrager expliquant le surpâturage.

8 C'est surtout ce surpâturage qui conduit à la dégradation des sols telle qu'on l'observe actuellement.

9 Dans la Sierra Madre occidentale, le paysage porte aussi, presque partout, les traces d'une phase d'érosion antérieure à l'actuelle. Du moins, en de nombreux sites, les versants ont des états de surface qui sont hérités dans la mesure où, formés par une phase d'érosion intense, ils sont devenus si caillouteux que le pavage y limite très sensiblement l'érosion par rapport aux secteurs avoisinants. En effet, il est difficile de parler de phase d'érosion passée, dans la mesure où la couverture végétale et les sols sont de plus en plus dégradés, et les conditions climatiques n'ont pas changé. Toutefois, on observe en maints endroits des ravines creusées dans les versants et qui ne semblent plus actives, leur fond étant envahi par la végétation herbacée.



« Pieds de vaches » dans un versant de savane arborée d'altitude.

Terrassettes dans des pâturages dégradés.

10 La pression bétaillère est telle qu'elle a entraîné la formation de versants entiers de « pieds de vaches », ces terrassettes spécifiques au surpâturage en montagne, déjà observées dans les Alpes et les Andes (SERRATE, 1978). En effet, les vaches qui circulent dans les herbages forment (ici sur les pentes supérieures à 17°) des replats en repassant toujours sur les mêmes passages ; les replats se succèdent tous les mètres ou tous les deux mètres environ, formant de véritables échelles de petites terrasses. Celles-ci apparaissent autant dans les savanes d'altitude où quelques chênes parsèment la prairie et aucun arbre jeune n'est observé que sur des pâturages sans arbres.

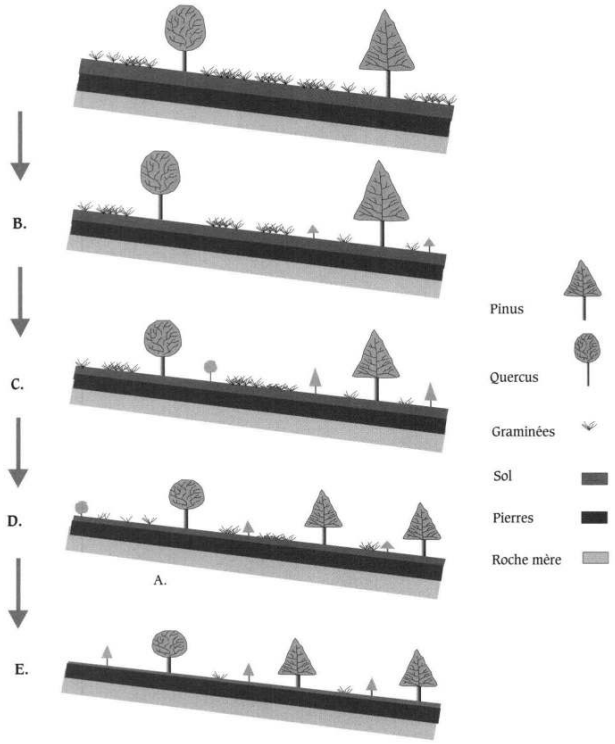


Fig. 40 – Étapes de la dégradation verte des pâturages, aboutissant à leur envahissement par des ligneux non appétants.

11 Il est important de noter, comme l'a fait VIRAMONTES (2000) qu'on assiste en même temps à une « dégradation verte des pâturages », ceux-ci étant envahis par des ligneux non appétants, principalement des pins. La figure 40 montre les étapes de cette dégradation qui se produit en quelques années ou au maximum en quelques dizaines d'années.

12 Malgré la surexploitation des terres de pâturage, le développement du bétail ne s'arrête pas. Le tableau XVIII montre l'évolution du nombre de têtes de bétail dans l'État de Durango et les *municipios* de la zone d'étude. Entre 1970 et 2000, le nombre de têtes de bétail dans l'État de Durango est passé de 1 037 857 à 1 429 965. Parmi les *municipios* de la Sierra, Guanaceví, Tepehuanes, San Bernardo et Indé ont augmenté leur cheptel de manière significative, par contre les *municipios* d'El Oro et Santiago Papasquiaro ont vu diminuer la charge de bétail.

Tabl. XVIII – Nombre de têtes de bétail dans l'État de Durango et les *municipios* de la Sierra Madre occidentale.

	1970	1990	2000
État de Durango	1 037 857	1 102 045	1 429 965
Guanaceví	39 035	29 663	58 400
Tepehuanes	23 818	28 247	37 050
Santiago Papasquiaro	64 699	69 971	61 751
San Bernardo	28 002	25 710	41 984
El Oro	82 250	51 082	61 345
Indé	32 281	38 820	42 300

Source : INEGI, 1970, 1990 et 2001.

Une exploitation minière des ressources forestières

13 L'exploitation forestière est la deuxième activité économique de la Sierra Madre occidentale. Cette activité est ici très récente. En effet, la production régulière commerciale de bois a commencé dans les années 1970 avec l'installation de l'organisme fédéral Proformex. L'implantation de cette occupation forestière s'est développée rapidement sur les forêts du nord du Mexique. Cependant, dans la plupart des cas, la forêt est vue comme un don de la nature et non comme une entreprise à développer. L'exploitation de type minier est caractéristique de presque toutes les forêts du nord du Mexique.

14 Actuellement, la partie montagneuse de l'ouest de l'État de Durango (Sierra Madre occidentale) est la zone forestière la plus importante du Mexique. L'exploitation forestière est prise en charge par les entreprises des villes (Durango, Santiago Papasquiaro, Tepehuanes). Les paysans de la sierra vendent les permis de coupe de la forêt et ils ne participent pas aux opérations. En effet, les arbres représentent des gains en plus, donnés par la nature. Les paysans sont très occupés avec leur bétail.

15 Le tableau XIX montre l'évolution de la production de bois dans l'État de Durango caractérisée par une augmentation entre les années 1970 et 1980 et une stabilisation ensuite.

Années	Production de bois en m³/an
1971-1974	803 000
1975-1979	1 379 000
1980-1989	2 335 000
1990	2 216 000
2000	2 371 890

Tabl. XIX – Évolution annuelle de la production de bois dans l'État de Durango.

16 Cependant, les chiffres officiels ne montrent pas tout à fait la réalité. D'après les organismes du gouvernement (Sagarpa, Semarnat et Inegi), la capacité de la production de bois de l'État est de 2 355 000 m³. Par contre, la demande de bois par les entreprises est de 3 864 000 m³. Cette demande supérieure à l'offre des forêts de la sierra, et les problèmes liés à l'économie régionale ont provoqué une forte pression sur les ressources et souvent des violations de la loi forestière. En effet, le permis de coupe contrôlé par les organismes du gouvernement est souvent peu respecté. Les paysans sont facilement corrompus du fait de leurs problèmes économiques et de leur peu d'intérêt pour la forêt, ils sont en fait des éleveurs fiers de leur bétail. De plus, le contrôle des gros camions d'exploitants est minime ou symbolique. En outre, la forme d'exploitation extensive et sélective est « discrète », elle ne se traduit pas par une grande superficie déboisée d'une année sur l'autre.

Un constat : un déboisement massif

17 Néanmoins, le tableau XX donne l'évolution chiffrée de la couverture des formations végétales entre 1972 et 1998 pour le bassin du Sextin (5 050 km²), situé dans la Sierra Madre occidentale, au nord de l'État de Durango. On s'aperçoit que la forêt est en net recul. Ceci est dû à une surexploitation des ressources, en grande partie causée par l'abattage clandestin (il représentait entre 60 et 70 % de la production totale entre 1992 et 2002). Au niveau spatial, les données de base ayant servi à construire le tableau sont des interprétations d'images satellitaires Landsat (1972) et SPOT (1998) (RODRIGUEZ, 1997 ; VIRAMONTES, 2000 ; GARCIA, 2003).

18 La production de bois autorisée plafonne à moins de 2 millions de m³ par an pour l'État de Durango depuis une vingtaine d'années ; en fait elle dépasse souvent les 5 millions de m³, du fait de la très forte demande et jusqu'à ces derniers mois du manque de contrôle et de la corruption. L'actuelle croisade pour les forêts et l'eau semble être en train de faire évoluer les mentalités, et on voit dernièrement apparaître de plus en plus de zones reboisées artificiellement.

	Bassin du río Sextin (5 050 km²)		Bassin du río Ramos (7 128 km²)	
Année	1970	1998	1970	1998
Forêt	76,7 %	48 %	77,7 %	42 %
Prairies	11,5 %	22 %	16,6 %	27 %
Savane d'altitude	10 %	28,5 %	4,3 %	29,5 %
Buisson xérophile	0 %	0 %	0,4 %	0,5 %
Cultures	1,8 %	1,5 %	1 %	1 %

Tabl. XX – Évolution des surfaces des différentes formations végétales de 1972 à 1998 (bassins du Sextin et du Ramos).

Conclusion

19 Les ressources naturelles exploitées dans le haut bassin du Nazas sont renouvelables. Cependant, le milieu est exploité à un taux bien plus élevé que sa capacité de renouvellement.

20 Avec un marché en pleine expansion et dans un pays qui cherche à se développer, la demande des ressources (de bétail et de bois) génère une forte pression sur les milieux montagnards de la Sierra Madre occidentale. Néanmoins, la capacité de production des zones de pâturage et des forêts est actuellement très inférieure à la demande.

21 Or, l'exploitation des ressources naturelles du nord du Mexique et particulièrement de la Sierra Madre occidentale est récente. Dans cette zone, isolée du reste du pays, les activités économiques sont limitées de manière rustique et traditionnelle au pastoralisme et plus récemment à l'exploitation du bois. Ainsi, l'exploitation commerciale de ces ressources a commencé il y a quelques décennies. Reste à savoir pour combien de temps cette zone montagneuse pourra continuer ce taux de production (en bois et en bétail) ou bien si la société mexicaine pourra trouver des nouvelles formes de production plus adaptées aux capacités naturelles du milieu.

BIBLIOGRAPHIE

Références

DE NONI G., VIENNOT M., ASSELINE J., TRUJILLO G., 2001 – *Terres d'altitude, terres de risques. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes.* Paris, IRD, coll. Latitudes 23, 280 p.

DESCROK 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.

GARCIA C., 2003 – *Utilización de imagenes de satélite para el estudio del comportamiento hidrológico del rio Nazas.* Tesis de Maestria, Instituto Politécnico Nacional, México, 156 p.

POULENARD J., 1995 – *Surpâturage et érosion dans la Sierra Madre occidentale.* Rapport de fin d'études de l'Istom, Cergy, 82 p.

POULENARD J., DESCROIX L., JANEAU J.L., 1996 – Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre occidentale. *Revue de Géographie alpine,* 84 (2), Grenoble.

RODRIGUEZ M.G., 1997 – *Determination de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental para su calibration por percepción remota.* Tesis de licenciatura, Escuela de Ciencias Forestales, Universidad Juarez del Estado de Durango, Durango, México, 60 p.

SERRATE C., 1978 – *Dynamique des versants de haute montagne : Andes centrales péruviennes, Alpes briançonnaises.* Thèse, université Paris VII, 400 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.

VIRAMONTES D., DESCROIX L., 2003 – Changes in the surface water hydrologic characteristics of an endoreic basin of northern México from 1970 to 1998. *Hydrological Processes,* 17 : 1291-1306.

AUTEURS

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

EVA ANAYA

Biologiste et pastoraliste, spécialiste des aires protégées, sous-déléguée du ministère mexicain de l'Environnement dans l'État de Durango, en charge de la Laguna (Gômez Palacio).

CORAL GARCIA

Doctorante au laboratoire de géographie physique (CNRS, Meudon).

JÉRÔME POULENARD

Pédologue, maître de conférences à l'université de Savoie (Chambéry).

HENRI BARRAI

Géographe pastoraliste, spécialiste de la gestion des aires protégées, décédé en 2001, était directeur de recherche à l'IRD.

LAURA MACIAS

Ingénieure informaticienne au Cenid Raspa (Gômez Palacio).

MARIA GUADALUPE RODRIGUEZ CAMARILLO

Ingénieure forestière, chargée de mission à l'école forestière de la UJED (université de Durango).

Encadré 5. L'appréciation du surpâturage

Eva Anaya, Luc Descroix et Henri Barral

1 *Le surpâturage paraît* a priori *évident et généralisé à toute personne traversant la Sierra Madre dans ses espaces non boisés. Même à la fin de la saison des pluies, les cailloux semblent occuper une fraction très importante de la surface du sol.*

Un *a priori* sur le paysage

2 *Les pâturages, dans la grande majorité des secteurs situés en zone de montagne, et sous la limite de la forêt (mais parfois aussi dans la forêt claire de chênes elle-même) paraissent bien maigres, localement complètement râpés, en particulier près des villages. Ils semblent envahis par les pierres et les cailloux, localement aussi par de petits ligneux apparemment non appétents. En fin de saison des pluies, le paysage est très vert, mais en y regardant de près on constate que dans les prés, les brins d'herbe sont en fait très éloignés les uns des autres, laissant apparaître des plages de sol nu (et très caillouteux).*

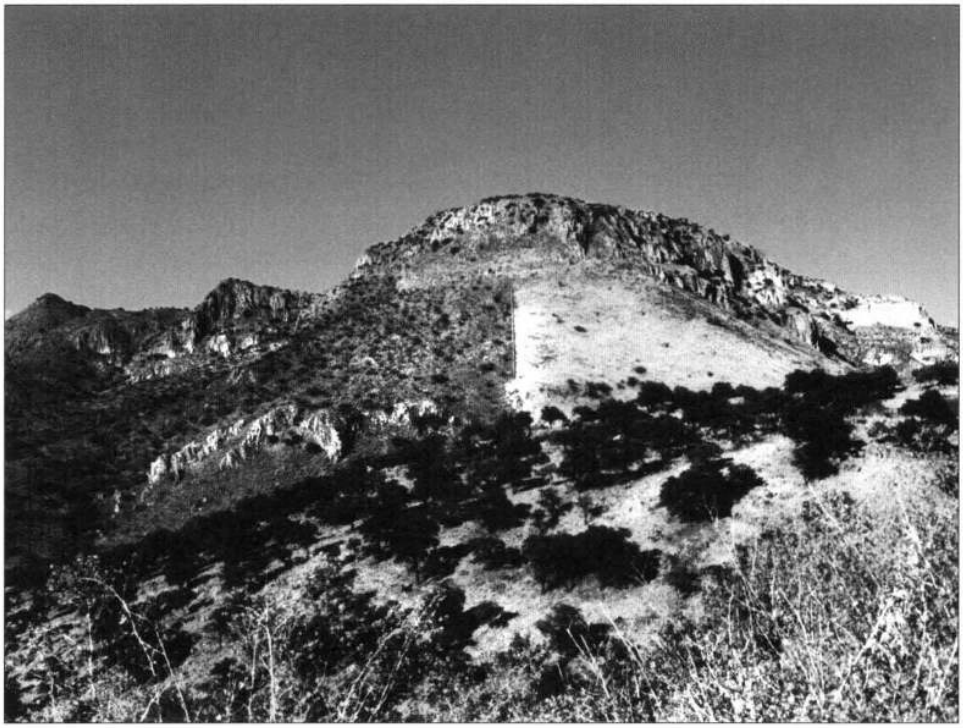
3 *De plus, les versants sont striés par le tracé des « terrassettes » (à nommer en fait « pieds de vaches ») décrites aussi par* HURAULT *(1975) et* BOUTRAIS *(1994), déjà rencontrées dans les Alpes et les Andes où elles ont fait l'objet d'une thèse (*SERRATE*, 1978) et d'une étude spécifique sur la Sierra Madre occidentale (*POULENARD et al.*, 1996).*

La perception des paysans

4 *Lors d'enquêtes informelles, il est apparu que les paysans, qu'ils soient propriétaires (les* **pequeños** *, qui n'ont rien de petits paysans puisqu'ils avaient en général des propriétés de taille comparable aux* ejidos *sous ce qu'on peut à présent appeler « l'Ancien Régime »), ou* ejidatarios*, étaient unanimes, dans la Sierra Madre, entre 1994 et 1999, pour dire que la qualité des pâturages s'était fortement dégradée durant les dernières décennies, la cause en étant attribuée à l'excédent de bétail, à la mauvaise gestion des pâturages et dernièrement aux années de sécheresse. Mais les*

*pâturages étaient déjà en piteux état quand les recherches du programme « RH36 » ont commencé (*BARRAL *et* ANAYA*, 1995). Les anciens (certes peu nombreux) qui ont constitué les* ejidos *au moment où a été appliquée la Réforme agraire entre 1948 et 1972, disent tous qu'à cette époque, les pâturages étaient bien meilleurs qu'à l'heure actuelle. Étant donné que ces paysans se sont battus pour que soit appliquée cette réforme, s'ils avouent eux-mêmes que la dégradation des herbages est postérieure à cette réforme et qu'elle est donc leur œuvre, à eux et à leur système d'exploitation, il est plus que probable que cela soit vrai. Les secteurs où l'on voit, partout dans la sierra une clôture en fil de fer barbelé, avec un côté privé jaune (prédominance des graminées, pâturage de bonne qualité) et un côté* ejidal *gris (sol nu, nombreux ligneux et cailloux) sont légion ; les tenants du système libéral en concluent vite que le système privé est bien plus efficient et respectueux de la conservation des pâturages. Cela s'est vu il y a quelques années sur une photo parue dans « Sciences au Sud », la revue de l'IRD, mais prise au Chili. En fait, dans le cas mexicain, on a aussi systématiquement donné aux* ejidos *(les propriétaires choisissaient la fraction de leur propriété dont ils allaient être « spoliés ») les plus mauvaises terres, les pires pâturages, et surtout, on ne leur a jamais donné au départ, des financements pour creuser des puits, constituer des abreuvoirs, clôturer des réserves afin de pouvoir mener une gestion patrimoniale des herbages ; le secteur privé, lui, ne manquait pas de capitaux dès le départ, et avait accès sans limite au crédit bancaire. Mais cela introduit tout de même le débat sur le lien entre la tenure des terres et la « patrimonialisation » des comportements (cf. encadré 2 « Propriété privée et publique, gestion collective. Quelle politique patrimoniale ? », p. 59). En conséquence, « les cailloux poussent » et semblent sortir de terre avec le piétinement du bétail, comme on l'a entendu dans la bouche même des éleveurs du sud de la France (et aussi de l'Italie, de l'Espagne et plus tard d'Afrique du Nord).*

5 *Une hacienda bien gérée vaudrait-elle donc mieux qu'un* ejido *démuni ? Le problème est bien plus profond que cette simple comparaison car le système* ejidal *maintient à la campagne 10 à 20 fois plus d'emplois par unité de surface que le système privé. Même si le travail (au sens macroéconomique) y remplace le capital, la productivité et les rendements y sont plus faibles. L'élimination de ces emplois ruraux pousse les gens vers la ville où ils trouveront peut-être un emploi, mais avec quel revenu et surtout, quelle qualité de vie ?*



Versant présentant un côté surpâturé et envahi par les broussailles à gauche d'une clôture barbelée, et un côté bien géré, à droite, avec une bonne préservation des graminées.

Des mesures de capacité de charge

6 *Afin de bien chiffrer l'ampleur de ce surpâturage, Barral et Anaya ont, quatre années consécutives, effectué des mesures de capacité de charge des pâtures et de charge effective. Il s'agissait de quantifier le volume de fourrages disponibles dans les pâturages et de compter les têtes de bétail, afin de déterminer la charge maximale requise et la charge réelle.*

7 *Pour ce faire, on a, sur 16 sites différents répartis sur les 4* ejidos et *communautés rurales, effectué des prélèvements totaux de la biomasse disponible sur des surfaces de 1 m² (plusieurs répétitions par site). On disposait d'un cerceau délimitant une aire de cette surface, que l'on jetait au hasard dans les prairies et à l'intérieur duquel tout était fauché ; cette cueillette était ensuite ramenée au laboratoire, séchée et pesée. Cette mesure a été effectuée quatre années de suite (de 1994 à 1997 compris), juste après les dernières pluies (les premiers jours d'octobre), au moment où l'herbe commençait à sécher. Connaissant par ailleurs le nombre de têtes de bétail (comptage et recensements des autorités* ejidales), *on a pu déterminer le volume de fourrage disponible par an et par unité bovine.*

8 *Barral et Anaya ont estimé à 50 % de la biomasse prélevée totale la quantité réellement disponible pour les bovins (il faut tenir compte de la partie non broutable, des espèces non appétentes, etc., mais dans les savanes africaines ce taux est de 33 % (Barral, comm. pers., 1995). Par ailleurs, il a été estimé que le bétail devait, comme cela est considéré en France et en Afrique, ingurgiter quotidiennement 3 % de leur poids en matière sèche végétale, soit en moyenne 13 kg de fourrage sec par jour et par vache.*

9 *Ce protocole de mesure du surpâturage a par la suite servi à délimiter les parcelles qui allaient permettre de montrer les différences de comportement hydro-dynamique entre secteurs surpâturés*

et secteurs protégés (cf. « Des conditions favorisant une érosion et un ruissellement en nappe», p. 171).

Collecte complète de la biomasse sur un mètre carré de pâturage afin d'en déterminer le potentiel nutritionnel pour le bétail. (Henri Barrai et Eva Anaya)

BIBLIOGRAPHIE

Références

BARRAL H., ANAYA E., 1995 – *La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México*. Gómez Palacio, Mexique, Publicaciones Orstom-Inifap n° 5, 78 p.

BOUTRAIS J., 1994 – « Éleveurs, bétail et environnement ». *In : Dynamique des systèmes agraires : à la croisée des parcours, pasteurs, éleveurs, cultivateurs,* coll. Colloques et séminaires, Orstom : 303-319.

HURAULT J., 1975 – *Surpâturage et transformation du milieu physique, l'exemple des hauts plateaux de l'Adamaoua (Cameroun).* Paris, IGN, 218 p.

POULENARD J., DESCROIX L., JANEAU J.L., 1996 – Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre occidentale. *Revue de Géographie alpine,* 84 (2) Grenoble.

SERRATE C, 1978 – *Dynamique des versants de haute montagne : Andes centrales péruviennes, Alpes briançonnaises.* Thèse, université Paris VII, 400 p.

AUTEURS

EVA ANAYA

Biologiste et pastoraliste, spécialiste des aires protégées, sous-déléguée du ministère mexicain de l'Environnement dans l'État de Durango, en charge de la Laguna (Gômez Palacio).

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

HENRI BARRAL

Géographe pastoraliste, spécialiste de la gestion des aires protégées, décédé en 2001, était directeur de recherche à l'IRD.

Une eau menacée par la dégradation des ressources végétales

Luc Descroix, David Viramontes, Eva Anaya, Henri Barral, Alain Plenecassagne, José Luis Gonzalez Barrios, Jeffrey Bacon et Laura Macias

---

1 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 *Yarroyo* « 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

2 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.

3 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).

4 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.

5 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.

6 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.

7 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.

8 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.

9 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).

10 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.

11 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.*

12 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.

13 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.

14 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

15 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.

16 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 ($g.m^{-2}$)
Présence ou absence d'arbre (parcelles de 50 m²)		
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
Type d'arbre (parcelles de 1 m², 7 répétitions)		
Pins	9	74
Chênes	3	45
Pente (parcelle de 1 m², 3 répétitions)		
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 ($g.m^{-2}$)
Présence ou absence d'arbre		
Pas d'arbre	34	45
Pas d'arbre mais enclos	19	12
Avec arbre	19	26
Pente		
12 %	31	42
27 %	21	29
Porosité vésiculaire		
avec	35	70
sans	7	7
Piétinement par le bétail		
avec	43	90
sans	8	7

Tabl. XXII – Influence des facteurs environnementaux sur ruissellement et érosion en zone de pâturages (parcelles de 50 m^2).

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

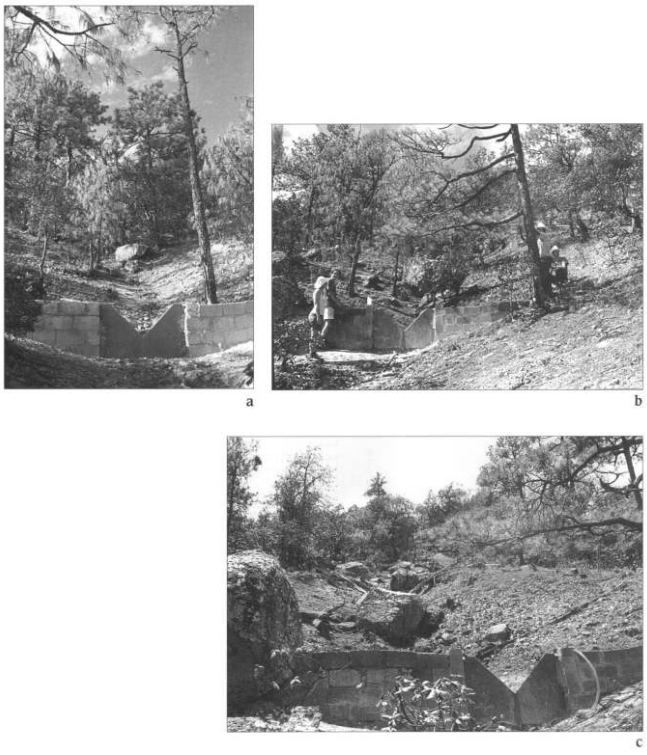
- le couvert des arbres protège bien le sol. L'amortissement de l'énergie cinétique des gouttes par les feuillages fait baisser sensiblement les deux paramètres sous les arbres ; il est bien plus marqué en forêt qu'en pâturages. Dans ces derniers, les graminées et les herbacées pérennes protègent bien 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.

18 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.

19 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 m^2 attenant à son alter ego qui a été laissé tel quel.

20 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).



Les micro-bassins de la Rosilla (450 m^2).
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.

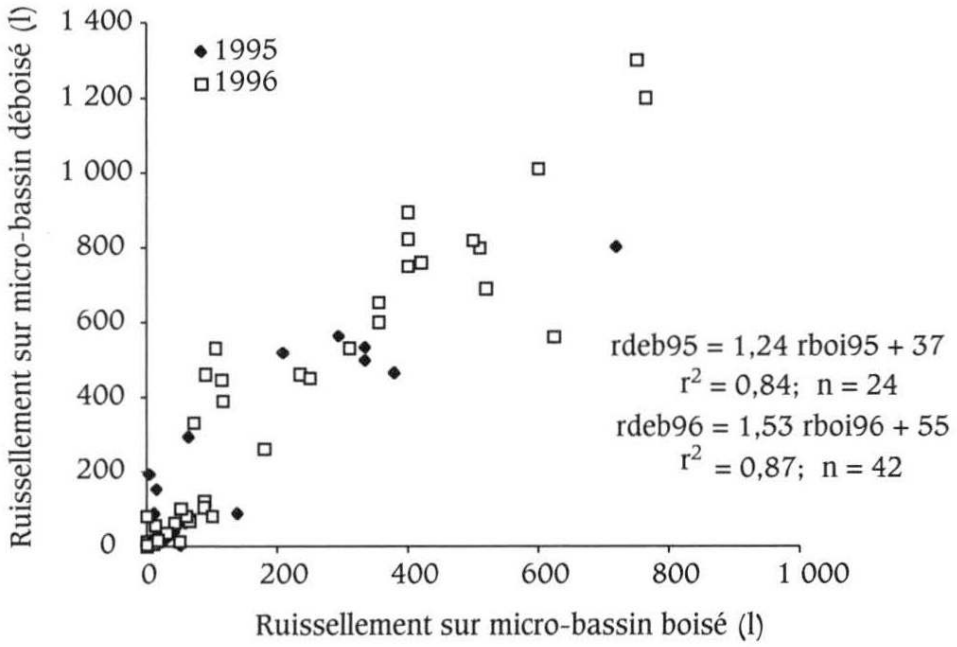


Fig. 41. – Relation entre le ruissellement dans le micro-bassin déboisé (rdeb) et le micro-bassin boisé (rboi) pour 1995 et 1996.

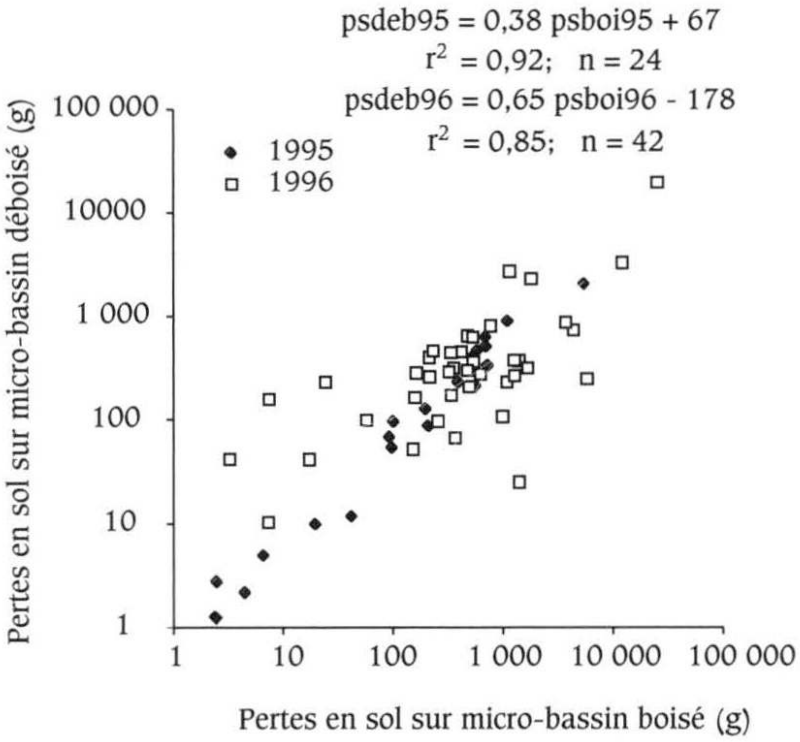


Fig. 42 – Relation entre les pertes en sol du micro-bassin déboisé (psdeb) et celles du micro-bassin boisé (psboi) pour 1995 et 1996.

Conséquences hydrologiques au niveau des grands bassins versants

21 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 km^2) et de la station Sardinas sur le río Sextin (5 060 km^2). Les données utilisées sont les débits moyens journaliers de 1970 à 1998 (VIRAMONTES et DESCROIX, 2002).

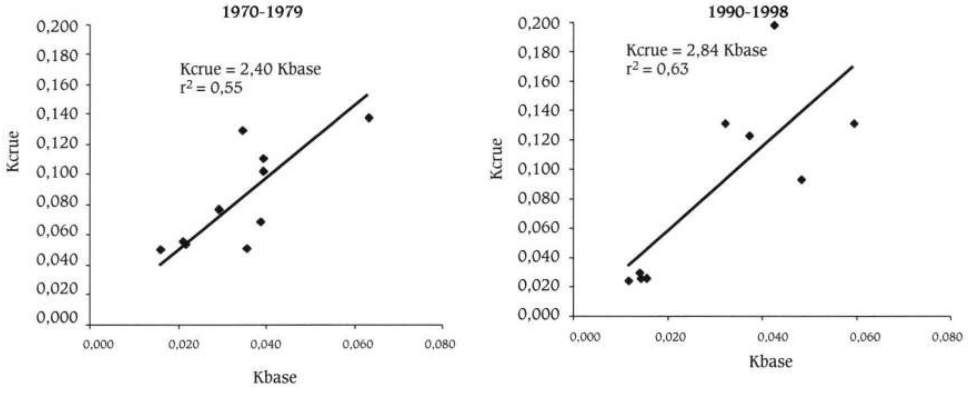
22 Avant de procéder à une analyse statistique des données de débits journaliers, on s'est assuré d'abord que les séries étudiées ne comportaient aucune tendance ou anomalie qui pourrait influencer tout traitement et le rendre caduc ou erroné, et ce en utilisant les procédés de recherche de tendance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

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

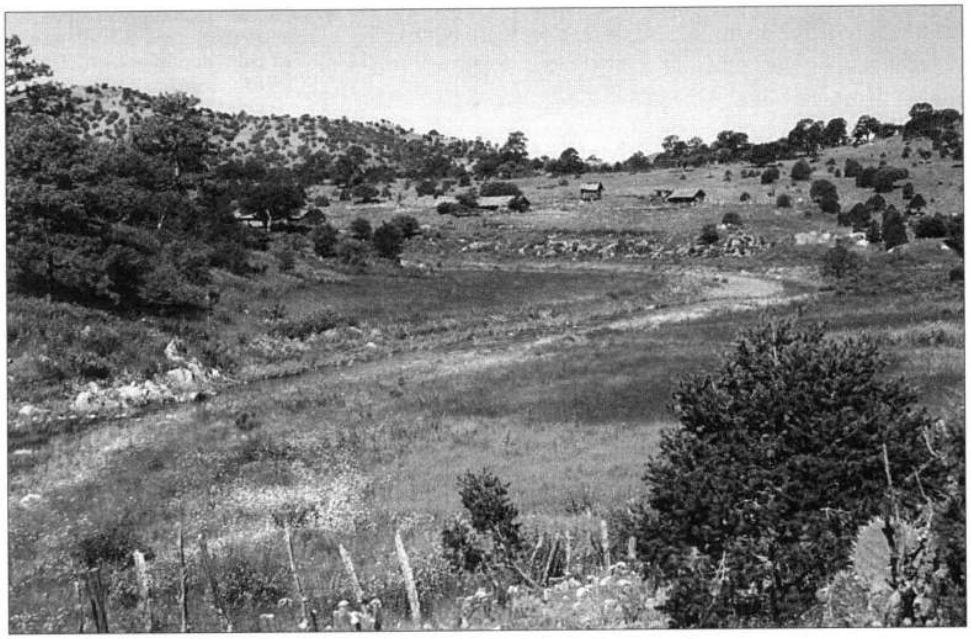
24 Le premier est basé sur la décomposition des débits des cours d'eau en débits de base et débits de crue, suivant un algorithme proposé par GUSTARD *et al.* (1989), cité par HUMBERT et KADEN (1994). Il s'agit de distinguer, dans le débit d'un cours d'eau, la part de l'écoulement qui est due à la pluie 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 écoulée 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 rio Ramos ; on note la même tendance, moins prononcée toutefois, pour le río Sextin (VIRAMONTES et DESCROIX, 2002).

25 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 %)		✔	*	✔	

Note *[*]
Note ✔[†]

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

Note *‡
Tabl. XXIV – Valeurs des paramètres du modèle Nazas par décennie des bassins du río Ramos et du río Sextin.

26 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.

27 Le dernier outil utilisé est le paramètre a 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

28 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 m^2 « 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 détritus de coupe, ce qui a considérablement limité les effets du déboisement tant en termes d'érosion que de ruissellement.

29 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.

30 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.

31 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.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BOSCH J.M., HEWLETT J.D., 1982 – A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and évapotranspiration. *Journal of hydrology,* 55 : 3-23.

BRAUD I., FERNANDEZ 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 réduit-elle l'écoulement annuel ? *Annales de Géographie,* 581-582 : 7-25.

CROKE J., HAIRSINE 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 México). *Journal of Hydrology,* 263 : 114-130.

FRITSCH J.M., 1990 – *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants 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* Sppoer 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 Mapimi,* Instituto de Ecologia -Orstom – Cemca. México : 161 -176.

JANEAU J.L., MAUCHAMP A., TARIN G., 1999 – The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern México and their influences on the system hydrodynamics. *Catena,* 37 : 165-173.

POESEN J., LAVEE 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 – *Caracterizaciôn hidrodinamica del suelo a nivel de una formation en mogote, utilizando un simulador de lluvia en la Reserva de la Biosfera de Mapimi, Durango.* Tesis profesional, Biologia, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreôn, 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.

NOTES DE FIN

***.** Différence des moyennes non significative.
†. Différence des moyennes significative.
‡. Les valeurs de H_{max} sont fixées par le modèle, mais sont proches des valeurs observées.

AUTEURS

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

EVA ANAYA

Biologiste et pastoraliste, spécialiste des aires protégées, sous-déléguée du ministère mexicain de l'Environnement dans l'État de Durango, en charge de la Laguna (Gômez Palacio).

HENRI BARRAL

Géographe pastoraliste, spécialiste de la gestion des aires protégées, décédé en 2001, était directeur de recherche à l'IRD.

ALAIN PLENECASSAGNE

Ingénieur chimiste à l'IRD.

JOSÉ LUIS GONZALEZ BARRIOS

Hydro-pédologue, directeur de recherche au Cenid Raspa (Inifap) de Gômez Palacio.

JEFFREY BACON

Professeur de sciences forestières à la UJED (université de Durango).

LAURA MACIAS

Ingénieure informaticienne au Cenid Raspa (Gômez Palacio).

Influence de la forêt sur la pluviométrie

Luc Descroix, José Luis Gonzalez Barrios et Raul Solis

« Les forêts précèdent les peuples, les déserts les suivent »
François René de Chateaubriand

1 Pluie et forêt ! ces éléments sont sans conteste liés puisque plus il pleut et plus la végétation naturelle est dense. Et les zones de forêts sont souvent associées aux montagnes ; les unes et les autres sont souvent liées, et ont pu paraître répulsives ou effrayantes même à diverses époques (CORBIN, 2001). Aujourd'hui où l'on cherche des endroits « sauvages », ce qu'il reste de milieux « moins anthropisés » en Europe, c'est vers la forêt et la montagne qu'on se dirige naturellement, donc vers les zones de pluie. La pluie elle-même a fait l'objet de perceptions différentes à travers les âges : il y a eu des périodes (l'âge romantique) où la pluie était bien accueillie, comme bienfaitrice et purificatrice ; or, aux dires d'Alain Corbin, la pluie a été conspuée dans les années 1950-1960, et alors « personne n'osait avouer qu'une averse fine pouvait être très agréable à certains moments de l'année ». La perception de la pluie varie plus encore dans l'espace, elle est parfois honnie en Europe quand il fait gris et pluvieux plusieurs semaines de suite et arrive à provoquer des inondations en plaine ; elle est unanimement saluée au Sahel, où les enfants se précipitent pour courir sous les gouttes, ou au nord du Mexique, où, que ce soit dans le désert de Chihuahua ou la Sierra Madre occidentale, elle apporte les bonnes nouvelles.

2 Mais qu'en est-il plus scientifiquement, c'est une des questions que se posent les sociétés et les savants depuis longtemps, à travers les âges comme dans des milieux très différents : les forêts peuvent-elles faire pleuvoir ?

3 Les relations entre la distribution spatiale des pluies et la localisation des formations végétales font l'objet de débats historiques, qui ne sont pas sans rappeler ceux qui avaient animé les spécialistes sur le rôle de la forêt dans la formation des écoulements et les causes de l'érosion actuelle dans les Alpes du Sud, entre le milieu du XIX^{e} siècle et la fin du siècle suivant.

4 La présidence du Mexique elle-même a lancé une grande « Croisade pour l'eau et la forêt », (Cruzada Nacional para el Agua y el Bosque), ce qui montre que le débat n'est pas clos. Avant d'analyser, par une étude bibliographique puis par un exemple, les résultats des travaux menés sur le rôle de la forêt sur la localisation des pluies, on propose dans ce qui suit de partir de réflexions ou slogans lancés par des responsables mexicains de la gestion des eaux et/ou des forêts ; ces réflexions proviennent :

- d'un discours du gouverneur de l'État de México, qui en janvier 2002, a déclaré qu'il fallait arrêter d'abattre inconsidérément des arbres car chaque arbre adulte « produisait » 8 000 l d'eau par an ; dans le même temps, le ministre de l'Environnement du Mexique, Mr Lichtinguer, semble convaincu qu'il va trouver de l'eau pour remplir les aquifères et les barrages en reboisant les montagnes.
- d'une enquête réalisée par la journaliste Sandra Gambino en 2000 dans la Sierra Madre occidentale, intitulée « *La sierra se está secando* » (la Sierra se dessèche). On peut y lire les impressions des habitants de la sierra et des responsables politiques :
- un habitant du village de La Ciudad (sur la route de Durango à Mazatlán) : « l'intense sécheresse que connaît la Sierra Madre occidentale est occasionnée par la coupe inconsidérée des forêts ; il sort un camion de grumes toutes les trois minutes, on est en train d'achever la forêt et l'avenir de nos enfants est mis en péril, car les pins génèrent de l'eau » ;
- un chauffeur de grumier : « on continue à extraire le bois comme auparavant, sans aucun contrôle, car il n'y a pas de policiers au cœur de la sierra, et dans la plupart des cas, les formulaires sont trafiqués » et plus loin « maintenant il fait plus chaud, il ne pleut plus et les arbres sont plus secs que jamais » ;
- un gérant de scierie : « on nous livre du bois chaque jour, mais cela ne nous regarde pas de savoir d'où il vient ; nous, ce qu'on veut, c'est produire des planches tous les jours pour répondre à la demande » ; et plus tard, « le prix du bois livré aux scieries est très bas, il n'est que de 40 % du prix pratiqué sur le marché déclaré » ;
- le représentant du ministère de l'Agriculture et du Développement rural pour l'État de Durango : « la forêt étant vitale pour générer de l'eau, les volumes de pluie tombés dans la sierra ont diminué drastiquement, provoquant une grave sécheresse » et « le premier facteur qui provoque la sécheresse est la coupe immodérée du bois, qui n'a jamais été régulée », puis « la diminution des pluies dans le haut bassin du Nazas a des conséquences directes sur la Laguna, et cela s'est aggravé ces dernières années », ou encore « les conditions de sécheresse de la sierra sont catastrophiques, le paysage qui autrefois était vert jusqu'en avril, est aujourd'hui sec et sans vie, le vert a disparu, et à sa place, tout est jaune, marron ou ocre » ;
- la femme d'un paysan : « il fait chaque fois plus chaud, l'éclaircissement de la forêt a provoqué qu'il ne pleuve plus ».

5 Et la journaliste de conclure, « le panorama est désolant, la coupe immodérée, l'absence de programme de reboisement et d'une culture de patrimoine, font que le principal poumon du Nord-Mexique est en train de se dégonfler, mettant en péril des régions comme la Laguna, mais aussi les États de Sinaloa et Nayarit, qui dépendent des eaux générées dans la sierra de Durango ».

6 La liaison entre une baisse des pluies et une hausse des températures du fait du déboisement est une idée bien partagée du Mexique à l'Afrique ; ainsi, on entend exactement les mêmes réflexions en pays sérère au Sénégal, là où la savane arborée est devenue, sur 60 km de profondeur, une steppe très pauvre quand aux années de sécheresse s'est ajoutée en 1992, la décision du FMI d'interdire les subventions au gaz : la

consommation de charbon de bois a monté en flèche, provoquant un recul de 60 km de la végétation arbustive et arborée.

7 Les relations entre la forêt et l'eau ont fait l'objet d'une étude très intéressante et très complète effectuée par ANDRÉASSIAN (2002). Il commence par présenter un historique de la perception du lien entre la forêt et l'hydrologie en général et des recherches scientifiques menées, il analyse également les relations entre la végétation et la pluie.

La vision historique de la rétroaction végétation-pluie

8 Le vaste panorama historique tracé par ANDRÉASSIAN (2002) commence à l'Antiquité, mais nous nous contenterons d'y puiser quelques remarques un peu plus récentes. Ainsi Bernardin de SAINT PIERRE (1787) note au sujet de l'île de France (l'île Maurice) : « L'attraction végétale des forêts est si bien d'accord avec l'attraction métallique des pitons de ses montagnes, qu'un champ situé en lieu découvert, dans le voisinage, manque souvent de pluie, tandis qu'il pleut presque toute l'année dans les bois qui n'en sont pas à une portée de fusil ». Peu d'années après, RAUCH (1801) déclare que « l'on sait, à ne plus pouvoir en douter, que les bruissantes forêts qui forment le plus bel ornement de la nature, exercent le plus puissant empire sur tous les météores aqueux ». En 1819, le préfet des Basses-Alpes (aujourd'hui Alpes-de-Haute-Provence) propage l'idée suivante : « les hautes montagnes exercent une attraction sur les nuages, et cette attraction est la plus grande possible lorsque les sommets sont boisés ; alors les nuages sont non seulement attirés, mais retenus » (DUGIED, 1819). Et pour justifier la nécessité de reboiser les montagnes, le forestier BAUDRILLART (1823) affirme que « la quantité d'eau qui tombait autrefois en France était beaucoup plus considérable qu'elle ne l'est en ce moment », cette diminution étant due « à l'abaissement des montagnes et à la destruction des bois qui en couvraient les sommets » ; et plus loin : « la destruction des forêts, notamment sur les montagnes, est considérée comme ayant eu pour résultat la diminution des eaux, l'irrégularité des pluies et le changement de température ». Quelques années plus tard, un agronome, BOUSSINGAULT (1837), conclut de ses travaux que « les grands défrichements diminuent la quantité des eaux vives qui coulent à la surface d'un pays, et qu'il est impossible de dire si cette diminution est due à une moindre quantité annuelle de pluie, à une plus grande évaporation des eaux pluviales, ou à ces deux effets combinés ».

9 Formé à l'école des Ponts et Chaussées comme Saint Pierre et Rauch, DAUSSE (1842) est convaincu que « l'homme a le pouvoir de changer en quelques années, par le déboisement, un climat humide en un climat sec ». Plus sceptique, BECQUEREL (1865) pose une série de questions qui d'après lui restent à éclaircir, parmi lesquelles celle-ci : « les forêts exercent-elles une influence sur les quantités d'eau tombées et sur la répartition des pluies dans le cours de l'année, ainsi que sur les régimes des eaux vives et des eaux de source ? ». Il renforce ainsi le point de vue de SURELL, ingénieur des Ponts et Chaussées qui affirmait en 1841 : « cette influence de la forêt sur le climat n'est pas rigoureusement démontrée, et on l'appuie sur des présomptions plutôt que sur des observations positives ». Toutefois, en 1878, le forestier MATTHIEU, étudiant les données pluviométriques de trois stations situées l'une en forêt de Haye, près de Nancy, la deuxième en lisière et la dernière à 20 km en plein champ, montre « que la station située dans la zone agricole ne reçoit que 80 % des précipitations des deux stations forestières. Pour les forestiers, cette différence est la preuve irréfutable que la forêt attire la pluie (ANDRÉASSIAN, 2002). Ce chercheur note une nette différence de perception entre une école

« forestière » et un clan d'ingénieurs. Ce fait, que la forêt fait pleuvoir, est corroboré, dans l'école des forestiers, en 1909 par JACQUOT, qui signale que « ce qui a été établi à Nancy, est indubitablement corroboré par toutes les observations consignées en Russie, en Allemagne, Autriche, Suisse et jusque dans les Indes ». Il avait été par contre complètement réfuté par VALLES (1857) qui affirme : « c'est sur les terrains dénudés, plutôt que sur les forêts, que la pluie tombe en plus grande abondance ». Entre ces deux dates, CÉZANNE (1872) avait déjà départagé les deux contradicteurs : « *les forêts sont impuissantes à modifier sensiblement la quantité d'eau pluviale qui tombe dans le bassin d'un fleuve* ».

L'évolution récente de cette question

10 Plus récemment, l'utilisation de nouveaux moyens de calcul a permis d'élaborer des modèles capables de tenir compte d'éventuelles rétroactions de la végétation sur les pluies. Mais des observations continuent à se faire, chaque jour plus nombreuses ; les références sont en général euro-africaines plus que mexicaines ou américaines, mais montrent que la question est au cœur des préoccupations scientifiques.

11 À nouveau les forestiers insistent sur le rôle « pluviogène » des masifs forestiers ; ainsi MARTIN (1950) a montré, pour une petite commune des Landes de Gascogne au cœur du plus grand massif forestier européen de constitution récente, qu'entre les périodes d'observations de 1782-1818 et de 1891-1900, encadrant à peu près la constitution du massif forestier, la pluviométrie moyenne annuelle serait passée de 709 mm à 938 mm, alors qu'elle ne changeait pas à Toulouse et n'augmentait que de 6 % à Paris. L'augmentation de la pluviosité sur la région landaise reboisée serait donc de l'ordre d'au moins 25 %. Cela pose toutefois le problème de fiabilité des pluviomètres utilisés dans les deux cas. Plus au nord, le Jutland était encore boisé au XVI^e^ siècle mais des guerres éliminèrent les forêts de chêne ; au XIX^e^ siècle, la sécheresse des printemps compromettait les cultures, et une « société des landes » se constitua en 1866 pour reboiser le pays en pins, dans l'espoir d'humidifier le climat printanier (BAVIER et BOURQUIN, 1957). La société et l'État reboisèrent 118 000 ha de landes et 40 000 ha de dunes ; après cela, les précipitations enregistrées pour les mois d'avril, mai et juin seraient passées de 100 mm en 25 jours de pluie vers 1870 à 150 mm en 35 jours de pluie, mieux répartis et moins orageux.

12 Plus récemment, PONCET (1981) conclut que « les massifs forestiers ralentissent les vents jusqu'à une hauteur au-dessus du sol correspondant à la couche limite de turbulence de la circulation atmosphérique, accrue par la rugosité aérodynamique des hautes frondaisons. Ce puissant freinage agit en premier lieu sur l'évapotranspiration réelle des peuplements forestiers et sur le régime thermique. Ce freinage des vents, favorable à leurs échanges thermiques avec la couverture du sol, favorise aussi les condensations et facilite les précipitations ». Mais cet auteur est par ailleurs un des rares à citer des études dans lesquelles il est démontré que les zones boisées ont des coefficients d'écoulement annuels supérieurs aux zones déboisées alentour, toutes choses étant égales par ailleurs.

13 Les universitaires ont apporté leur contribution à ces recherches. Ainsi, pour l'historien THOMPSON (1980), « L'idée selon laquelle la forêt augmenterait les pluies n'est pas nouvelle. Si l'on en croit son fils Ferdinand, Christophe Colomb savait « par expérience » que la disparition de la forêt qui recouvrait à l'origine les Canaries, Madère et les Açores

avait réduit les brouillards et les pluies. De même, il pensait que les pluies de l'après-midi qui se produisent en Jamaïque et dans les Antilles étaient la conséquence de la luxuriante forêt des îles ». Par ailleurs, le passage d'une masse d'air d'un plateau dénudé à une forêt entraîne selon ESCOURROU (1981) un ralentissement de la vitesse du vent et par suite une ascendance de l'air qui renforce l'intensité des pluies. « La reforestation a permis, dans certains endroits, d'augmenter les pluies de plus de 6 % et cette action est surtout sensible pendant les années sèches. La destruction de la forêt dense en Afrique peut avoir des conséquences incalculables quand on sait que les pluies sont plus fortes de 30 %, l'humidité relative de 15 % et les températures plus faibles de 1°5 dans les partie forestières ».

14 Dans les Alpes du Sud (DESCROIX, 1994), la pluviométrie des mois d'été (juin à août compris) a diminué de 0,5 à 8 % suivant les postes entre 1881 et 2000. Cette tendance ne s'observe pas dans les postes des massifs ayant connu les plus forts reboisement (Ventoux-Lure, Préalpes de Digne).

15 Dans les régions tropicales, la déforestation a pu jouer un rôle important. La Côte d'Ivoire connaît une forte pression sur ses ressources forestières depuis une trentaine d'années ; or la forêt tropicale humide présente une évapotranspiration annuelle proche de celle des océans tropicaux (1 500 à 2 500 mm). Cette destruction de la forêt n'équivaut-t-elle pas à éloigner le Sahel des zones de fourniture de vapeur d'eau ? Concernant les sécheresses sahéliennes post 1968, LABEYRIE estimait en 1985 que « le surpâturage, qui va croissant à mesure que la population sahélienne augmente, contribue sans doute à les rendre de plus en plus prononcées, de plus en plus meurtrières ».

16 Il revient à CHARNEY (1975) d'avoir montré, toujours dans le contexte sahélien, le rôle de la végétation dans le déclenchement de la convection, par l'intermédiaire de l'albédo : « Une augmentation de l'albédo de 14 à 35 % au nord de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) provoque un déplacement de cette ZCIT de plusieurs degrés vers le sud, et une diminution de 40 % de la pluviométrie au Sahel durant la saison des pluies ». Quelques années plus tard, ANTHES (1984) (cité par DIONGUE, 2001) a passé en revue les observations et les études théoriques sur les capacités de la végétation à renforcer les précipitations convectives. Il dénombre trois principaux mécanismes : i) l'augmentation de l'énergie statique humide liée à une diminution de l'albédo ; ii) la création de circulations de mésoéchelle associées aux inhomogénéités ; iii) le renforcement de l'humidité atmosphérique dû à une augmentation de l'évaporation.

17 Ces deux auteurs sont physiciens de l'atmosphère, et travaillent à l'échelle zonale ; à l'échelle locale, on insiste sur le rôle des microclimats. On peut lire ainsi dans un manuel d'hydrologie et d'irrigation dédié aux régions tropicales : « L'homme ne peut pas agir directement sur les macroclimats. Par contre, il peut chercher à organiser ses terroirs en vue d'y modifier, d'y créer ou d'y maintenir des microclimats » (DUPRIEZ et DE LEENER, 1990). La figure 44 met en évidence les effets positifs que peut avoir le couvert végétal sur le microclimat d'un terroir. Il semblerait que le rôle des haies, des bosquets et des arbres isolés dans la régulation des températures soit très important, tant à la surface du sol que sur la couche limite. Par contre, les effets à méso ou macro-échelle sont presque impossibles à prouver. C'est ce qui fait dire à BRUIJNZEEL (1990), chercheur à l'Unesco : « De nombreux travaux menés dans les climats tropicaux humides et tempérés ont pourtant généralement conduit à la conclusion que la forêt n'a pas de conséquence sur la

pluviométrie locale et les résultats contraires qui ont pu être avancés pèchent presque tous par la faiblesse des données sur lesquelles ils reposent ».

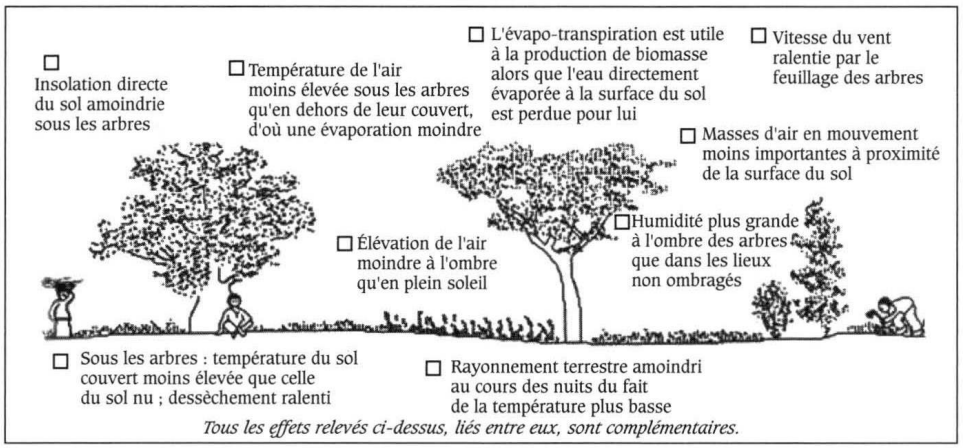


Fig. 44 – Effets positifs de la végétation sur le microclimat d'un terroir (d'après DUPRIEZ et DE LEENER, 1990).

18 Et ici, il faut remarquer que les travaux les plus marquants sur les rétroactions végétation/pluie concernent les grands massifs forestiers tropicaux, et les secteurs les plus pluvieux de la Planète. En effet, l'impact de la végétation est plus marqué et de fait, plus étudié dans ces régions que dans les zones moins pluvieuses.

Quelques données observées

19 Les liens avec la végétation étaient, on l'a vu, ancrés dans la mémoire des scientifiques comme une question récurrente basée sur des intuitions. Certaines observations ont toutefois aiguillé les chercheurs vers l'existence d'une telle rétroaction. Il a été constaté (RABIN et al., 1990), en utilisant l'imagerie satellitaire et des informations *in situ,* que la convection se formait d'abord sur une zone avec un sol plus chaud, comme par exemple un champ de blé, plutôt que sur des secteurs adjacents recouverts de végétation « verte ». Les gradients de flux induits par les contrastes de surface peuvent être atténués dans la couche limite par turbulence si les régions hétérogènes ont des dimensions faibles ou peuvent être diluées dans l'écoulement synoptique. TAYLOR et LEBEL (1998) ont démontré que « sous certaines conditions de surface, il s'établit une corrélation positive entre les précipitations du jour et les précipitations antérieures. Ces circonstances apparaissent quand les combinaisons d'averses précédentes ont modifié les taux d'évaporation locale. Les gradients de pluie lors des événements subséquents tendent à persister, renforçant la configuration d'humidité des sols ». Cela indique le poids important des conditions de surface. De plus, PHILIPPON et FONTAINE (2002) ont établi que les saisons des pluies humides sur le Sahel étaient précédées d'hivers (boréaux) où la teneur en eau des sols était anormalement élevée sur les régions soudano-sahéliennes.

20 Quoi qu'il en soit, le doute persiste, et LAVABRE et ANDRÉASSIAN (2000) affirment : « La forêt a un impact significatif sur le climat local (albédo plus faible, évapotranspiration plus forte). À l'échelle régionale, malgré quelques résultats de recherche dans le sens d'un effet positif sur la pluviosité, il est néanmoins difficile de conclure à un effet quelconque de la couverture forestière ».

Beaucoup de conclusions basées sur les résultats des modèles

21 Les rétroactions végétation-climat étant bien difficiles à déterminer, on fait de plus en plus appel aux modèles (avec le risque que l'on construise un modèle pour répondre à une question scientifique et que du coup, on le mette au point dès le départ pour répondre dans le sens recherché). Au sujet du recyclage de l'eau, COSANDEY et ROBINSON (2000) concluent « les estimations varient beaucoup d'un modèle à l'autre. HENDERSON-SELLERS (1987) compare les résultats de quatre d'entre eux : la modification des précipitations qui résulteraient de la déforestation de l'Amazonie varierait d'une augmentation de 75 mm (LETTAU et *al.,* 1979) à une réduction de 200 à 230 mm (HENDERSON-SELLERS et GORNITZ, 1984) ou de 100 à 800 mm selon les endroits (Wilson, 1984 cité par HENDERSON-SELLERS, 1987). LEAN et WARRILOW (1989) propose que la pluie diminuerait de 20,3 %, les débits de 11,9 % et l'évapotranspiration réelle (ETR) de 27,2 %. DICKINSON ef *al.* (1986) trouvent aussi une réduction de l'évaporation (jusque 50 %) et des précipitations (20 %). Un modèle proposé par SHUKLA ef *al.* (1990) aboutit à des estimations voisines ». Dans le même massif forestier, on a déterminé que « l'effet de la déforestation est un réchauffement du sol et une augmentation de la convergence d'humidité induite par un renforcement de la ZCIT » (POLCHER et LAVAL, 1994). D'autres modèles ont permis de définir que « l'évaporation à partir de l'océan Atlantique tropical, de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique centrale contribue pour 23, 27 et 17 % respectivement, des pluies sur l'Afrique de l'Ouest » ; d'autres auteurs font varier cette proportion de 10 à 90 %, en utilisant des modèles différents (GONG et ELTAHIR, 1996). ZENG ef *al.* (1999) ont montré comment la prise en compte d'une rétroaction de l'humidité du sol et de la végétation reproduisait bien mieux les valeurs de précipitations que la seule prise en compte de ces éléments sans rétroaction de leur part. Par ailleurs, la même équipe a remarqué que « quand le modèle (couplé atmosphère-terre-végétation) est forcé par des températures de surface de la mer (SST : sea *surface temperatures*) observées, un feedback positif des changements végétaux conduit à une augmentation du gradient spatial entre les régions désertiques et les régions forestières aux dépens des zones de savanes. Quand la variation interannuelle des SST est prise en compte, la variabilité climatique tend à réduire la pluviométrie et la végétation des régions les plus humides et à les accroître dans les zones les plus sèches, amortissant la transition désert-forêt » (ZENG et NEELIN, 2000). Et, toujours en Afrique de l'Ouest, il a été constaté que « des changements de la circulation générale jouent un rôle important dans le déclenchement de la sécheresse au Sahel (1968-1995), mais d'autres mécanismes peuvent être responsables de la persistance des conditions sèches. Une ACP centrée sur la vitesse verticale des vents indique un changement important dans la circulation générale avant la sécheresse, durant les années soixante. De semblables changements de circulation générale dans les années 1970 n'ont pas été accompagnés d'un retour aux conditions humides » (LONG et *al.,* 2000).

22 Enfin, SHINODA et GAMO (2000) et SHINODA (2000) ont mis en évidence une corrélation entre une végétation plus fournie que la normale (c'est-à-dire de hautes valeurs de NDVI) et des valeurs de température au-dessus de la couche limite de convection inférieures à la normale ; ce dernier point conduit à un gradient de température altitudinal supérieur et donc à une convection améliorée et une pluviométrie supérieure ; ils montrent que les « pluies des mangues », qui se produisent au Sahel parfois quelques mois avant la saison

des pluies, peuvent aussi provoquer cette amélioration de la convection. Cette rétroaction végétation-pluviométrie explique en grande partie le mécanisme de la désertification.

Un exemple de recherche de relation rugosité-pluviométrie dans la Sierra Madre

23 On déjà montré que la relation pluie-végétation est très forte du fait de l'étagement des formations végétales en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne. Cette très forte relation empêche de trouver, par analyse factorielle, une quelconque relation inverse qui montrerait une rétroaction de la végétation sur la distribution spatiale des pluies. On va tenter ici d'interpréter les résultats de travaux de terrain effectués lors d'une mission réalisée en novembre 2002 sur les sites d'un grand nombre de stations pluviométriques de la Sierra Madre occidentale.

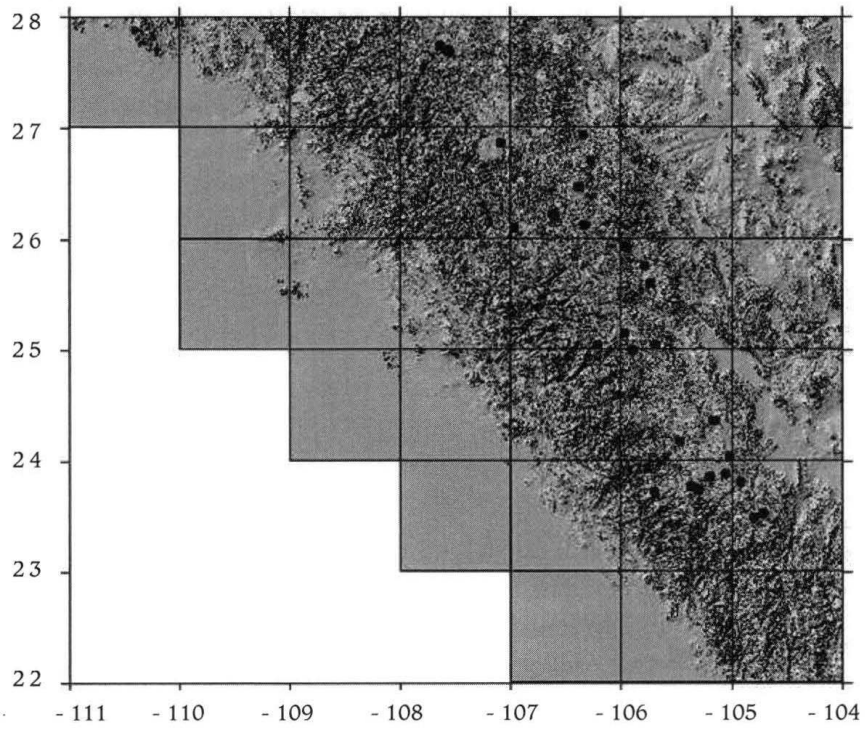


Fig. 45 – Relief de la zone étudiée (d'après le modèle numérique de terrain mexicain à maille de 90 m) et localisation des postes.

24 On a sélectionné pour cela une trentaine de stations réparties sur plus de 400 km du nord au sud, et où les conditions par ailleurs (c'est-à-dire en dehors du taux de boisement) étaient à peu près les mêmes.

25 Il faut préciser que le nombre de stations s'est considérablement réduit, passant de 312 à une trentaine, et ce chiffre est en général considéré comme le plancher d'une population statistiquement représentative. Mais il a été impossible de trouver davantage de stations en situation homogène : on n'a en effet considéré que les postes pluviométriques situés à l'étage de la forêt et dans le plateau sommital de la Sierra Madre occidentale de manière à ce que le relief, l'altitude, la rugosité et le type de formation végétale soient les plus proches possibles ; on est donc uniformément dans la forêt de pins, entre 2 200 et 3 000 m

d'altitude et sur les plateaux rhyolitiques de la sierra. La liste des stations, localisées aussi sur la figure 45, est portée dans le tableau XXV.

8005	Balleza
8038	Creel, Bocoyna (CFE)
8061	El Vergel, Balleza (SMN)
8073	Guadalupe y Calvo (DGE)
8128	San Pedro
8172	Guadalupe y Calvo (SMN)
8214	Guachochic (SMN)
8267	El Vergel, Balleza (DGE)
8271	Laguna Arareco, Bocoyna
8312	Guachochic
8319	La Laguna, Bocoyna
8320	Llanitos, Balleza
8321	San Juan Chinatu
8322	El Vergel, Balleza (CFE)
10007	Ciénega de Escobar
10010	Col. Ignacio Zaragoza
10025	El Salto, P.Nuevo (SMN)
10029	Guanaceví, Guan. (SMN)
10036	La Ciudad, Pueblo Nuevo
10040	Las Bayas, Durango
10043	Las Vegas, San Dimas
10044	Llano Grande, Dur. (CFE)
10048	Navíos Viejos, Durango
10050	Ojito de Camellones
10051	Otinapa, Durango
10071	San Miguel de Lobos
10093	El Salto, Pueblo Nuevo
10094	Guanaceví, Guanaceví
10096	La Chaparra (PFM)
10103	Santa Barbara (cia.gan)
10121	Los Altares
10124	La Flor, s. Bayacora
10125	La Rosilla
10130	Ignacio Zaragoza
10147	El Zape, Guanaceví

Tabl. XXV – Liste des stations utilisées pour l'analyse de la relation pluviométrie/densité végétale.

Aire de stockage de troncs de pins sur la piste de Buenos Aires (Sierra La Concepción, au-dessus de Tepehuanes).

Hypothèses initiales

26 On a considéré que les éléments de paysage qui avaient le plus de chances d'avoir une influence sur la répartition spatiale des précipitations étaient les suivants ; les sigles signalés entre parenthèses sont ceux du tableau XXVI tels qu'utilisés pour l'analyse en composantes principales :

27 – la pluviométrie moyenne (PMO) qui est ici la principale variable dépendante, mais l'on a aussi introduit l'écart-type des pluies annuelles (PET) et le coefficient de variation (PCV) ;

28 – le relief :

29 • l'altitude (ALT) de la station ; par ailleurs, on a considéré l'altitude moyenne autour de la station. Pour ce faire, on a pris en compte, grâce au MNT (modèle numérique de terrain), un carré de 36 km² autour du poste, pour lequel on a calculé, non seulement cette altitude moyenne (AMO), mais aussi l'écart-type de ses altitudes (AET) et leur coefficient de variation, que l'on considérera comme la rugosité de ce carré (ACV).

30 – les masses végétales :

31 • la densité : (IDF et IDC sous forêt et clairière respectivement) et la rugosité (IRF et IRC).

PMO	Précipitation moyenne annuelle
PET	Écart-type des précipitations annuelles
PCV	Coefficient de variation des précipitations annuelles
ALT	Altitude de la station
AMO	Altitude moyenne du carré de 36 km² autour de la station
AET	Écart-type des altitudes du carré de 36 km²
ACV	Coefficient de variation de l'altitude du carré = rugosité
DIO	Distance à l'océan Pacifique
LONG	Longitude (UTM)
LAT	Latitude (UTM)
IDC	Indice Densité Végétale Clairière
IDF	Indice Densité Végétale Forêt
IRC	Indice Rugosité Végétale Clairière
IRF	Indice Rugosité Végétale Forêt
IRS	Indice de Rugosité du Sol
SUPC	Superficie de la Clairière

Tabl. XXVI – Liste des variables considérées dans l'analyse en composantes principales (ACP).

32 La plupart des stations étant situées dans des clairières (il n'est pas conseillé d'installer un pluviomètre au cœur d'une forêt), on a considéré les densités et rugosités de la masse végétale dans les clairières et dans les forêts autour de la clairière.

- la surface de la clairière (SUPC).
- on a aussi pris en compte la distance à l'océan Pacifique (DIO), la latitude (LAT) et la longitude (LONG) de la station ainsi que la rugosité du sol autour du poste (écart-type et CV de la topographie numérisée).

Classification des variables par ACP

33 On a procédé après avoir dressé la matrice de corrélation (tabl. XXVII) à une ACP (Analyse en composantes principales) de manière à classifier les variables et à entrevoir les redondances qu'elles pouvaient comporter entre elles.

34 On a considéré quatre composantes principales et leurs valeurs propres respectives sont signalées dans le tableau XXVIII. Elles expliquent en tout 73,4 % de la variance de la population.

35 La classification des variables apparaît dans les figures 46 (axes 1 et 2) et 47 (axes 3 et 4).

36 Le premier espace des variables représente plus de 51 % de la variance expliquée.

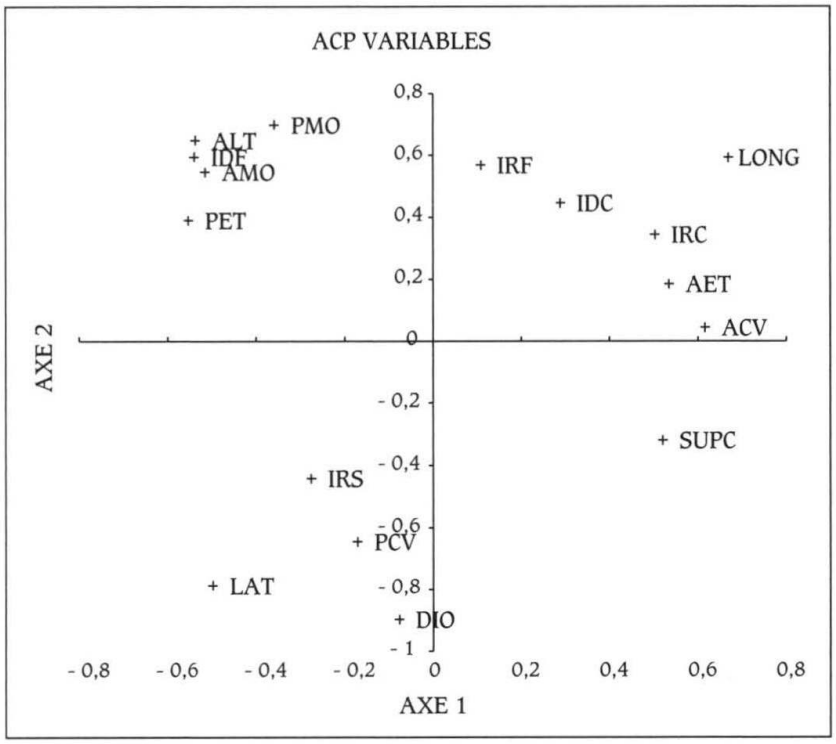


Fig. 46 – Espace des variables suivant les deux premières composantes de l'ACP.

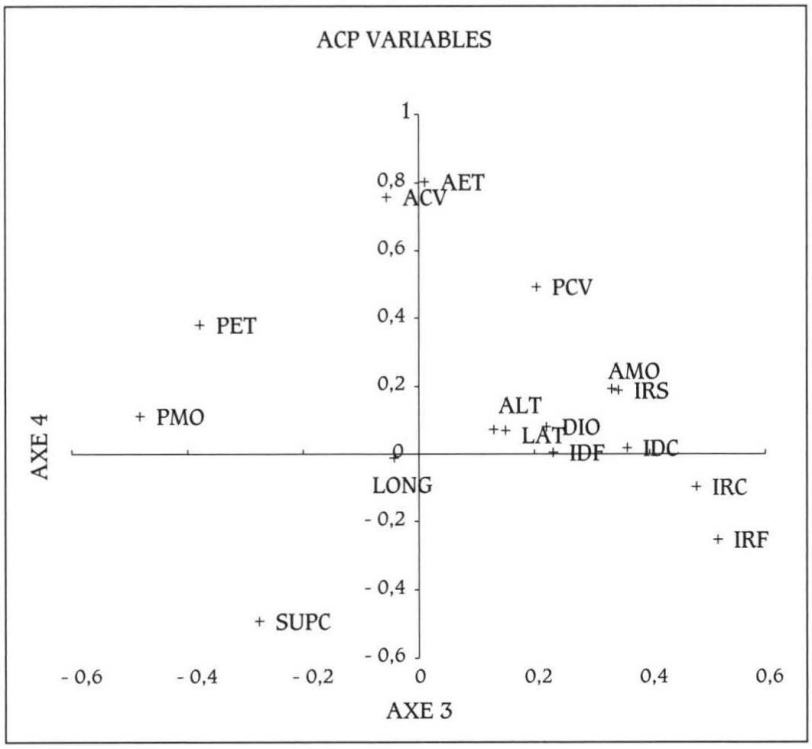


Fig. 47 – Espace des variables suivant les 3e et 4e composantes.

37 Le premier axe est avant tout déterminé par la rugosité du relief (ACV), son écart-type (AET), l'indice de rugosité des clairières (IRC), la superficie des clairières (SUPC) et l'écart-type des pluies annuelles (PET). La superficie de la clairière corrélée négativement avec la pluie moyenne conduit à penser que les grandes clairières pourraient constituer des zones où la rugosité diminue, entraînant une diminution relative des précipitations.

38 Le deuxième axe est défini avant tout par la distance à l'Océan (DIO), le coefficient de variation interannuelle des précipitations (PCV) et l'indice de rugosité de la forêt (IRF).

39 Les deux premiers sont corrélés négativement avec la pluie (PMO).

40 Par contre, la pluie est corrélée positivement avec l'indice de densité et l'indice de rugosité de la forêt (et à un moindre degré avec ceux des clairières) ; ceci semble confirmer le rôle « pluviogène » de la rugosité de la cime des formations végétales.

	PMO	PET	PCV	ALT	AMO	AET	ACV	DIO	LONG	LAT	IDC	IDF	IRC	IRF	IRS	SUPC
PMO	1,00															
PET	**0,81**	1,00														
PCV	- 0,48	0,11	1,00													
ALT	0,49	0,45	- 0,25	1,00												
AMO	0,33	0,29	- 0,15	0,84	1,00											
AET	0,02	0,02	0,11	- 0,08	0,00	1,00										
ACV	- 0,07	- 0,04	0,18	- 0,26	- 0,21	0,97	1,00									
DIO	**- 0,69**	- 0,32	**0,72**	- 0,43	- 0,29	- 0,14	- 0,05	1,00								
LONG	0,07	- 0,20	- 0,43	0,06	0,03	0,43	0,39	**- 0,56**	1,00							
LAT	- 0,35	0,00	**0,63**	- 0,23	- 0,16	- 0,33	- 0,27	**0,82**	**- 0,93**	1,00						
IDC	0,20	0,08	- 0,21	0,13	0,07	0,20	0,16	-0,36	0,24	- 0,31	1,00					
IDF	**0,53**	0,48	- 0,25	**0,57**	0,44	- 0,17	- 0,27	- 0,48	- 0,03	- 0,16	0,19	1,00				
IRC	- 0,02	- 0,16	- 0,22	- 0,04	0,03	0,23	0,19	- 0,14	0,39	- 0,34	**0,66**	0,02	1,00			
IRF	0,06	- 0,08	- 0,32	0,28	0,27	- 0,02	- 0,07	- 0,45	0,41	- 0,44	0,27	0,47	0,40	1,00		
IRS	- 0,27	- 0,12	0,31	- 0,19	-0,09	- 0,03	- 0,02	0,35	- 0,48	**0,50**	- 0,10	0,11	- 0,25	- 0,15	1,00	
SUPC	- 0,24	- 0,35	- 0,14	- 0,45	**- 0,68**	- 0,14	- 0,01	0,19	0,10	- 0,01	0,06	- 0,49	0,16	- 0,12	- 0,10	1,00

(Les valeurs en gras sont celles qui sont statistiquement significatives.)
Tabl. XXVII – Matrice de corrélation des variables.

N° composante	Valeurs propres	% Total Variance	Cumul Valeurs propres	Cumul variance pourcentage
1	4.86142512	30.383907	4.86142512	30.383907
2	3.36378642	21.0236651	8.22521154	51.4075721
3	2.00760329	12.5475206	10.2328148	63.9550927
4	1.50809794	9.42561213	11.7409128	73.3807048

Tabl. XXVIII – Valeurs propres des quatre premières composantes de l'ACP.

41 Le deuxième espace des variables représente encore 22 % de variance expliquée supplémentaire (axes 3 et 4, fig. 47).

42 L'axe 3 est très nettement déterminé par la précipitation moyenne (PMO) qui est, bizarrement, corrélée négativement avec tous les indices de rugosité (IRF et IRC) et de densité (IDF et IDC) au premier rang desquels l'indice de rugosité de la forêt. Cela relativise d'autant plus les observations antérieures que la matrice de corrélation (tabl. XXVII) montre qu'il n'y a pas de corrélation pluie-rugosité du couvert. Cela va à l'encontre des résultats acquis précédemment (DESCROIX *et al.* 2001) où l'on observait une corrélation évidente entre pluie et masse végétale (alors exprimée en valeur de NDVI : indice normalisé de végétation sur des carrés de surface différente autour du poste). Mais cette étude sur le lien pluie-NDVI était entachée du problème de la relation inverse bien plus puissante qui fait que la végétation d'une région dépend bien sûr de la précipitation qu'elle reçoit.

43 L'axe 4 n'apporte presqu'aucune information concernant la pluie, celle-ci étant trop près de l'axe 3 pour déterminer une corrélation avec la 4e composante. Il est défini essentiellement par la rugosité du relief (ACV et AET).

44 La contradiction de l'information fournie par les axes 2 et 3 montre bien les problèmes d'interprétation des analyses en composantes principales. On peut obtenir des corrélations inverses suivant les variables considérées, du fait du rôle complémentaire que joue chaque variable vis-à-vis de chacune des autres.

Classification des stations par ACP

45 Les individus considérés dans notre population statistique sont ici les stations pluviométriques prises en compte pour cette analyse.

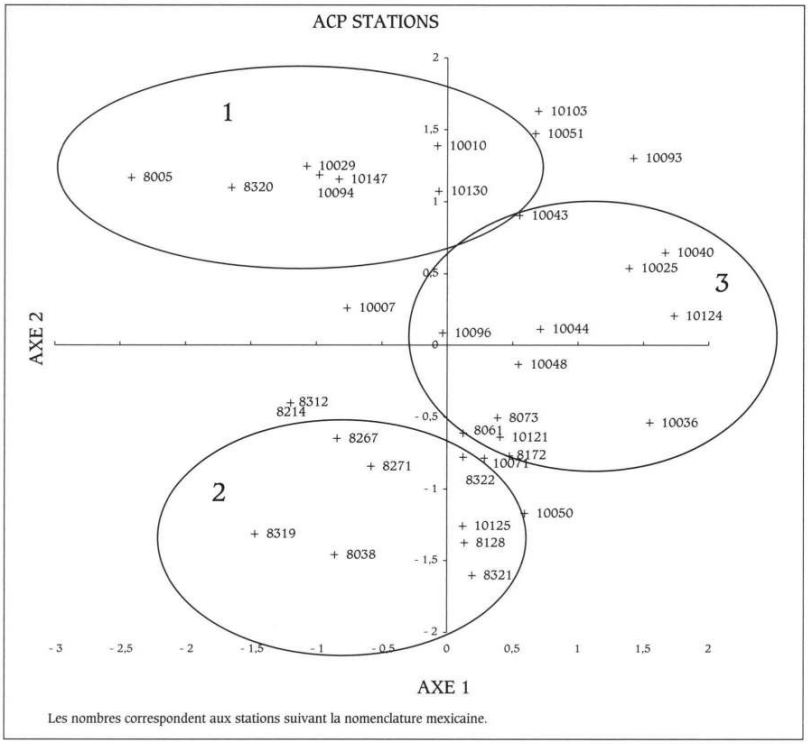
46 Leur intercorrélation est décrite par la figure 48, qui représente les composantes 1 et 2. Les valeurs propres et pourcentage de variance expliquée sont les mêmes que pour les variables.

47 On constate dans la figure 48 que les stations se regroupent en trois sous-ensembles assez dissemblables :

- le groupe 1 des stations situées le plus bas en altitude (2 000 à 2 250 m), surtout comprises dan l'État de Durango (sauf Balleza – 8005 – et Llanitos – 8320 –) et qui de ce fait ont une pluviométrie annuelle moyenne modérée (550 à 700 mm) ;
- le groupe 2 de stations, essentiellement situées dans l'État de Chihuahua, à haute altitude (de 2 400 à 3 000 m) mais où la pluviométrie est également modérée (600 à 800 mm) du fait de la continentalité ; ce sont les stations les plus éloignées de la côte, et surtout les plus septentrionales, donc les plus éloignées du flux de la **mousson** américaine ;
- enfin le groupe 3 rassemble les stations les plus pluvieuses, celles situées à assez haute altitude (2 300 à 2 600 m) et sur les zones de plateaux les plus proches du Pacifique et également les plus méridionales, plus exposées à la mousson.

48 En conclusion, cette étude portant sur un nombre réduit de stations permet de montrer que si la rugosité du relief et de la végétation, facteurs locaux, jouent un rôle sur la répartition des précipitations, ce rôle est mineur par rapport aux facteurs régionaux et globaux, tels que altitude, coordonnées géographiques et éloignement par rapport au littoral.

Fig. 48 – Espace des individus (stations) suivant les deux premières composantes.



BIBLIOGRAPHIE

Références

ANDRÉASSIAN V., 2002 – *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants*. Thèse de doctorat de l'université Paris 6, 275 p.

ANTHES R., 1984 – Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions. *J. Climate Appl. Meteor.,* 23 : 541-554.

BAUDRILLART J-J., 1823 – *Traité général des Eaux et Forêts, chasses et pêches, 1.* Paris, Arthus Bertrand, 816p.

BAVIER J.B., BOURQUIN A., 1957 – *Défense et illustration de la forêt.* Lausanne, Payot.

BECQUEREL A-C., 1865 – *Mémoire sur les forêts et leur influence climatérique.* Paris, Firmin-Didot frères, 366 p.

BOUSSINGAULT J-B., 1837 – Mémoire sur l'influence des défrichements dans la diminution des cours d'eau. *Annales de Chimie,* 64 : 113-141.

BRUIJNZELL L. A., 1990 – *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion : a state of knowledge review.* Unesco, IHPA, Publication of the Humid Tropics Programme.

CEZANNE E., 1872 – *Suite de l'étude sur les torrents des Hautes-Alpes.* Paris, Dunod, 382 p.

CHARNEY J.G., 1975 – Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 101 (248) : 193-202.

CORBIN A., 2001 – *L'homme dans le paysage.* Paris, Textuel, 190 p.

COSANDEY C., ROBINSON M., 2000 – *Hydrologie continentale.* Paris, Armand Colin, 359 p.

DAUSSE M., 1842 – De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau. *Annales des Ponts et Chaussées,* 3 (mars-avril) : 184-209.

DESCROIX L., 1994 – *L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud.* Thèse de doctorat, université Lyon II, 300 p.

DESCROIX L., NOUVELOT J.F., ESTRADA J., LEBEL T., 2001 – Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations : application à une région endoréique du Nord-Mexique. *Revue des Sciences de l'Eau,* 14 (3) : 281-305.

DICKISON R.B.B., PALMER D.C., DAUGHARTY D.A., 1986 – Assessment of harvesting treatment effect on the water balance of forested basins-precipitation network design considerations. Publ. n° 158, *IAHS redbooks :* 97-103.

DIONGUE A., 2001 – *Interactions entre convection et écoulement de grande échelle au sein de la mousson de l'Afrique de l'Ouest.* Thèse de l'université Toulouse 3-Paul Sabatier, Physique de l'atmosphère, 248 p.

DUGIED P.H., 1819 – *Projet de reboisement des Basses-Alpes.* Paris, Imprimerie Royale, 113 p.

DUPRIEZ H., DE LEENER P., 1990 – *Les chemins de l'eau : ruissellement, irrigation, drainage.* Nivelles Belgique, L'Harmattan Enda, coll. Terres et Vie (http://www.terresetvie.com) 380 p.

ESCOURROU G., 1981 – *Climat et environnement : les facteurs locaux du climat.* Paris Masson, coll. géographie, 180 p.

FONTAINE B., PHILIPPON N., TRZASKA S., ROUCOU P., 2002 – Spring to summer changes in the West African monsoon through NCEP/NCAR reanalyses (1968-1998), J. *Geophys. Res.,* 107, D14, 10.1029-10.1037.

GAMBINO S., 2000 - La sierra se esta secando. *Revista de Coahuila –.* 26-27.

GONG C, ELTAHIR E. A. B., 1996 – Sources of Moisture for Rainfall in West Africa. *Water Resources Research,* 32 (10) : 3115-3121.

HENDERSON-SELLERS A., GORNITZ V., 1984 – Possible climatic impact of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic changes,* 6 : 231-257.

HENDERSON-SELLERS A., 1987 – Modelling tropical deforestation : a study of GCM land surface parametrizations. *Quarterly journal Of the Royal Meteorological Soc,* 114 : 439-462.

JACQUOT A., 1909 – *La forêt et son rôle dans la nature et la société.* Paris, Recueil de conférences populaires.

LABEYRIE J., 1985 – *L'homme et le climat.* Paris, Denoël, 272 p.

LAVABRE J., ANDREASSIAN V., 2000 – *La forêt, un outil de gestion des eaux ?* Antony, Cemagref Éditions, 120 p.

LEAN J., WARRILOW DA, 1989 – Simulation of the regional climatic impact of Amazonian deforestation. *Nature,* 342 (6248) : 411-413.

LETTAU H., LETTAU K., MOLION L.C.B., 1979 – Amazonia's hydrologic cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. *Monthly Weather Review,* 107 : 227-238.

LONG M., ENTEKHABI D., NICHOLSON S.E., 2000 – Interannual variability in rainfall, water vapor flux and vertical motion over West Africa *Journal of Climate,* 13 : 3827-3841.

MAHE G., 1993 – *Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes.* Thèse de l'université Paris 11 Orsay, IRD, coll Études et thèses, 438 p.

MARTIN J.J.E., 1950 – Influence de l'état boisé sur la pluviosité. *Revue forestière française.* Nancy (n° d'avril 1950).

MATTHIEU A., 1878 – *Météorologie comparée agricole et forestière.* Paris, Imprimerie nationale, 70 p.

PHILIPPON N., FONTAINE B., 2002 – The relationship between the Sahelian and previous 2nd Guinean rainy seasons : a monsoon regulation by soil wetness ? *Annales geo-physicae,* 20 :575-582.

POLCHER J., LAVAL K., 1994 – The impact of African and Amazonian deforestation on tropical climate. J. *of Hydrol,* 155 : 389-405.

PONCET A., 1981 - « Interactions forêts et climats ». *In : Eaux et climats, mélanges offerts en hommage à C. Péguy,* Grenoble, CNRS : 445-461.

RABIN R., STADLER S., WETZEL P., STENSRUD D., GREGORY M., 1990 – Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc,* 71 : 272-279.

RAUCH F.A., 1801 – *Harmonie hydro-végétale et météorologique ou recherches sur les moyens de recréer avec nos forêts des températures et la régularité des saisons, par des plantations raisonnées, 2.* Paris, les frères Levrault, 299 p.

RICHARD Y., POCCARD I., 1998 – NDVI sensitivity to spatial and interannual rainfall variations in southern Africa. *International Journal of Remote Sensing,* 19 : 2907-2920.

SAINT PIERRE (DE), B.J.H., 1787 – *Études de la Nature, 2.* Paris, Imprimerie de Monsieur.

SANTIAGO A., 1998 – *Impact des états de surface continentaux sur la dynamique pluvieuse au Cameroun.* Thèse, université de Bourgogne, Dijon, 243 p.

SHINODA M., 2000 – Desertification and drought as a possible land-surface/ atmosphere interaction. *Global Environmental Research,* 3 (1) : 9-15.

SHINODA M., GAMO M., 2000 – Interannual variations of boundary layer temperature over the African Sahel associated with vegetation and the upper troposphere. *Journal of Geophysical Research,* 105 (D10) : 12317-12327.

SHUKLA J., NOBRE C, SELLERS P.J., 1990 – Amazon deforestation and climatic change. *Science,* 247 : 1322-1325.

SURELL A., 1841 – *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes.* Paris, Carilian-Goeury et Victor Dalmont, 283 p.

TAYLOR C, LEBEL Th., 1998 – Observational Evidence of persistent convective-scale rainfall patterns. *Monthly Weather Review,* 126 : 1597-1607.

THOMPSON K., 1980 – « Forest and climate change in America : some early view » *In* Cosandey C, Robinson M. : 316.

VALLES F., 1857 – *Étude sur les inondations, leurs causes et leurs effets.* Paris, Victor Dalmont, 528 p.

XUE Y., SHUKLA J., 1993 – The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I : Desertification. *J. Climate,* 6 : 2232-2245.

ZENG N., NEELIN J.D., LAU K.M., TUCKER C. J., 1999 – Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science,* 286 : 1537-1540.

ZENG N., NEELIN J.D., 2000 – The role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna. J. *Clim.,* 13 : 2665-2670.

AUTEURS

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

JOSÉ LUIS GONZALEZ BARRIOS

Gonzalez Barrios, hydro-pédologue, directeur de recherche au Cenid Raspa (Inifap) de Gômez Palacio.

RAUL SOLIS

Enseignant à l'École forestière de Durango, thésard de l'Universidad Autónoma de Nuevo León (Linares, Mexique).

Une eau disputée dans un espace encore libre

Introduction

1 Montagne répulsive, refuge, obstacle, château d'eau, assimilation à la forêt « *el monte* », indifféremment montagne et forêt en espagnol, la Sierra Madre est tout cela bien sûr, à différentes époques, pour différentes personnes. Elle reste un secteur où errent des bandits de grand chemin (en fait quelques voleurs de bétail, dans les zones isolées, et de rares coupeurs de route, sur les grands axes en particulier) mais où le folklore de l'ouest de l'Amérique, avec ses garçons vachers et ses Indiens marginalisés conservant pourtant des rituels millénaires, est encore bien vivant malgré l'émigration. L'été est la période des retrouvailles, des grandes fêtes à l'occasion des mariages ; on organise des rodéos, des courses de chevaux...

2 Et l'eau là dedans ? Une expression mexicaine fait dire à l'égard des égarés : « mais ce qu'il fait, là, c'est comme emmener de l'eau à la montagne » ; la symbiose est totale et la prise de conscience récente de la vitesse de dégradation des écosystèmes a pris la forme d'une « Croisade pour l'eau et la forêt ». C'est l'ensemble montagne-forêt qui détermine le fait d'être un château d'eau.

3 La conscience écologique est très forte au Mexique, et le fort taux de scolarisation permet de faire passer des messages assez vite aux jeunes générations. Il semble que les habitants des villes sont aujourd'hui attirés par la sierra. Des « *cabanas* », en fait souvent des bungalows et des chalets très confortables, sont installés au bord des ruisseaux pour accueillir les citadins ; mais c'est un phénomène récent, datant de vingt ans et qui se développe seulement ces dernières années.

4 De fait, le Mexique est un des pays au monde où la pression sur la ressource « eau » va être la plus forte dans les prochaines décennies. Même si le pays se résigne à devenir dépendant (ce qu'il est déjà en grande partie) au point de vue alimentaire, de son grand et encombrant voisin du Nord, et s'il attribue aux industries, aux villes et aux loisirs une grande partie des ressources en eau pour l'instant allouées à l'irrigation, la pression se maintiendra avec la croissance sans fin des volumes nécessaires aux activités urbaines. De fait, l'illusion entretenue par les responsables de la *Comisión Nacional del Agua de la Comarca Lagunera* (grand bassin irrigué du bas Nazas, entre les États de Durango et Coahuila) selon laquelle l'abandon progressif et programmé de l'irrigation dans le bassin laitier (où elle autorise les deux récoltes annuelles de luzerne destinée au bétail laitier) met à leur disposition un kilomètre cube d'eau supplémentaire pour les autres activités, risque de

laisser échafauder de mauvaises stratégies. Certes, on produit bien plus de « valeur ajoutée » en ville dans des activités tertiaires ou industrielles, avec le même volume d'eau, qu'en l'utilisant pour l'irrigation. Mais ce faisant, on développe des activités plus polluantes (pour attirer les capitaux du Nord, on est peu regardant sur les critères environnementaux) et on repousse le problème ; en laissant des activités surconsommer l'eau, on va arriver en quelques décennies à dépasser le volume réellement renouvelable, au lieu de d'ores et déjà, imposer des normes strictes en matière de consommation, gestion et recyclage des eaux.

5 À l'heure de la mondialisation où beaucoup de *maquiladoras* (usines sous douane) et d'autres entreprises délocalisent leurs unités de production (appartenant de plus en plus souvent au tertiaire - saisies informatiques, centrales d'appel téléphonique, etc.) vers d'autres pays moins chers (en terme de main-d'œuvre, en particulier) et aux normes anti-pollution encore moins strictes, comme la Chine, le Mexique doit-il continuer à héberger des industries sous-traitantes, des unités « tournevis » peu productrices de valeur ajoutée, voire des industries polluantes ou dangereuses ? A-t-il le choix d'une autre politique ?

6 De fait, le Mexique souffre du syndrome de nombreux pays d'aval : depuis qu'il a été « spolié » de sa moitié Nord en 1848 (à l'issue d'une guerre perdue face à des États-Unis en pleine conquête de leur « frontière »), il ne maîtrise plus les eaux du Colorado ni du río Grande/Bravo ; le Nord du pays dépend de ce fait en grande partie, pour sa fourniture en eau, du bon vouloir des autorités américaines, avec lesquelles des traités inégaux ont réglé juridiquement le partage des eaux transfrontalières à l'énorme avantage du voisin du Nord, ne garantissant qu'un débit minimal à ces fleuves à leur entrée en territoire mexicain (DESCROIX et LASSERRE, 2003).

7 Si l'on compare la situation du Nord-Mexique avec celle qui prévaut en Mésopotamie (mêmes latitudes, même dépendance à l'égard des sources d'eau situées, en zone montagneuse, dans un pays limitrophe au nord), les Mexicains ont droit à la portion congrue : 5 % du débit naturel du Colorado arrivent à la frontière, et 10 % environ de celui du río Grande, l'un et l'autre avec des eaux de qualité très détériorée. La Turquie a certes usé de sa position d'amont pour faire pression ou pour punir les pays d'aval (Syrie et Irak) avec lesquels elle a depuis longtemps des relations difficiles, qui se sont encore compliquées suite à la signature de son traité d'amitié avec Israël.

8 Ceci étant, il y a bien sûr d'énormes différences entre les deux configurations :

- tout d'abord, la date des équipements ; la Turquie a commencé à équiper l'Euphrate de manière importante au début des années 1980, et cela va durer encore pendant vingt ou trente ans, alors que le principal barrage du Colorado (Hoover Dam) a été mis en eau au début des années 1930, bien avant les traités de 1944 réglant les litiges sur le partage des eaux entre les deux pays ;
- ensuite, la basse vallée du Colorado au Mexique n'est bien sûr pas la Mésopotamie ; l'irrigation y est récente et le périmètre de Mexicali ne représente « que » 200 000 ha ;
- enfin, même si la Turquie est un pays « émergent » au même titre que le Mexique, et qu'il aspire à intégrer l'Union européenne, il reste un pays du Sud ; le rapport de force entre le pays d'amont et les pays d'aval n'est donc pas, dans ce cas, doublé d'un rapport Nord-Sud comme au bord du río Grande et du río Colorado ;
- enfin, historiquement, si la Turquie a perdu le contrôle des zones aval qu'a dominé l'Empire ottoman durant des siècles, en Amérique, c'est le pays d'aval qui a perdu le contrôle des zones amont constituant le « château d'eau ».

9 Cette quatrième partie débute justement par l'enjeu géopolitique de l'eau et sa valeur dans une région en plein développement où elle est assez rare et d'autant plus convoitée.

10 Le plan de convertir le Nord-Mexique en nouveau « Singapour » est battu en brèche, non pas par le manque d'eau, mais par la concurrence des pays où les avantages comparatifs sont encore plus nombreux, en particulier la Chine et son intarissable réservoir de main-d'œuvre. Si la puissante machine économique américaine ne peut employer, d'un côté ou de l'autre de la frontière, tous les paysans « libérés » (ou chassés ?) par la nouvelle réforme de la tenure et la généralisation de la propriété privée, la situation sociale au Mexique risque de devenir explosive, à l'heure où le pays affronte aussi l'ouverture de ses frontières pour les produits agricoles hyper-subventionnés des États-Unis : comment peut-on seulement imaginer que le maïs et les haricots, base de l'alimentation des Mexicains, puissent revenir moins cher, transport compris, importés des USA que produits localement ? S'il n'y perd pas son âme, le Mexique va y perdre le reste d'indépendance alimentaire qu'il avait réussi tant bien que mal à assurer jusqu'au début des années 1990. Les aspects juridiques sont également abordés avec les traités bilatéraux et leurs conséquences (cf. « L'eau, agent économique et enjeu politique », p. 249).

11 Par ailleurs, la Sierra Madre occidentale n'a jamais été ni particulièrement attractive, ni répulsive ; c'est l'ensemble du nord du pays, qui a longtemps été vide du fait de l'insécurité liée aux incursions des Apaches et des Comanches sur les grandes haciendas du désert de Chihuahua. Et dans ce vaste espace, la sierra aurait pu apparaître à la fois comme un refuge et comme l'oasis en bordure du désert ; mais ce grand Nord n'a jamais, jusqu'au début du XX^{e} siècle, été suffisamment peuplé pour être un enjeu important ; il est resté une « frontière » jusqu'à la réforme agraire qui a permis d'englober tout l'espace d'un coup à la Nation mexicaine déjà forte de plus d'un siècle d'histoire, d'une révolution et d'un énorme héritage culturel. Ce relatif vide (de l'ensemble du Nord et non plus seulement de la sierra) est un atout de nos jours où tout espace est convoité et où les espaces sauvages se raréfient devant la poussée démographique et les nuisances faites au milieu naturel. Même arides, de grandes étendues sauvages ne manquent pas d'intérêt ; le nouveau « plan de manejo » (plan de gestion) de la réserve de la Biosphère de Mapimí (BARRAL et ANAYA, 1996 ; CONANP, 2004), qui a porté cette zone préservée de 120 000 à 350 000 ha, est là pour prouver l'intérêt de l'Humanité comme des Mexicains pour la conservation d'aires protégées.

12 La Sierra Madre, elle, a de plus l'intérêt d'avoir une forte biodiversité et de posséder une relative abondance en eau. Outre qu'elle est la principale zone de fourniture de bois au Mexique, elle reste un vaste espace sauvage au cœur de l'Amérique ; c'est cette nouvelle perception d'un ensemble partiellement vide qui va être abordée ici (cf. « L'écotourisme : une alternative à la déprise et à la surexploitation ? », p. 265).

13 Enfin, le nord du Mexique n'est pas la seule zone en « stress hydrique » du Mexique. Il en est une autre qui est pourtant située dans les montagnes parmi les plus pluvieuses du pays ; le haut bassin du Cutzamala, entre les États de México et du Michoacán (centre-sud du pays). Il y pleut plus de 1 000 mm d'eau par an sur la plus grande partie des reliefs, certes, mais ce bassin est devenu depuis quinze ans l'un des principaux pourvoyeurs d'eau de la ville de México, qui est, rappelons-le, avec environ 20 millions d'habitants, l'une des plus grandes mégalopoles de la Planète ; la ville nécessite 64 m^3/s d'eau à longueur d'année. Au début des années 1980, on a transformé un bassin équipé pour fournir de l'électricité hydraulique en zone d'approvisionnement en eau potable, ce qui n'a pas été sans conséquence pour ses habitants. C'est pourquoi cet ouvrage s'intéresse à

la gestion de l'eau et de l'espace dans une autre région du Mexique : Valle de Bravo (cf. « Eau et espace à Valle de Bravo. La bataille pour l'eau », p. 283). C'est un autre château d'eau, mais il est nettement plus sollicité que la Sierra Madre, et ce pour les seuls besoins domestiques des habitants de México et pour les besoins grandissants du premier bassin industriel du pays.

14 Il reste que la Sierra Madre est encore loin d'être une région en soi ; elle est à la périphérie de tous les États sur lesquels elle s'étend, sans être centrale d'aucun d'eux ; elle est zone de fourniture d'eau, de matières premières aux centres industriels de sa périphérie principalement Chihuahua, Durango et Gómez Palacio-Torreón. Son avenir est probablement à imaginer comme un espace où l'exploitation forestière et pastorale se ferait en fonction de la productivité des milieux, de manière à préserver paysages et écosystèmes et permettre le développement d'une nouvelle activité : le tourisme, national comme international.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BARRAL H., ANAYA E., 1996 – *Plan de manejo de la Reserva de la Biosfera de Mapimi.* Documento interno Orstom-Instituto de Ecología, Durango, México, 120 p.

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Protegidas), 2004 – *Programa de conservatión y mango de la Reserva de la Biosfera de Mapi .* México, Instituto de Ecologia, 95 p.

DESCROIX L., LASSERRE F., 2003 – *L'eau dans tous ses États : Chine, Australie, Sénégal, États-Unis, Mexique, Moyen-Orient.* Paris, L'Harmattan, coll. Ressources renouvelables, 350 p.

L'eau, agent économique et enjeu politique

Luc Descroix et Frédéric Lasserre

1 On entend souvent dire que les montagnes sont les châteaux d'eau de la planète. C'est globalement vrai, étant donné que les régions montagneuses sont en général les mieux arrosées et que c'est là que prennent naissance la plupart des grands cours d'eau. Le rôle - réel ou perçu - des montagnes dans l'espace ainsi que dans l'aménagement de l'espace, est très différent d'une région du globe à l'autre : la montagne peut être répulsive dans les régions froides, ou sèche dans les régions sous le vent (versant oriental des Rocheuses canadiennes et américaines ; plateau tibétain au-delà de la barrière himalayenne) ; ou au contraire être des plus recherchées dans les régions chaudes du fait d'un climat plus agréable ou d'une meilleure pluviométrie (plateau éthiopien, par exemple) ; dans le cas de chaînes volcaniques récentes, les montagnes peuvent de surcroît offrir l'avantage de meilleurs sols.

2 La Sierra Madre occidentale (fig. 49) aurait pu représenter une zone attractive aussi bien qu'une zone répulsive ; elle pourrait même rester une zone vide entre deux zones vides, d'une part parce qu'elle a peu fait l'objet d'une quelconque « centralité », ou d'un quelconque aménagement à l'aide d'« équipement structurant » et, d'autre part, parce qu'elle a longtemps été peuplée d'ethnies sédentarisées mais très dispersées, entre deux déserts occupés par quelques rares nomades.

3 Mais à y regarder de plus près, c'est en réalité une des régions du Mexique qui a le plus tôt attiré le colon espagnol du fait de sa richesse en minerais, en particulier d'or et d'argent, tant il est vrai que la dimension répulsive ou attractive n'est pas une qualité intrinsèque, mais reflète les représentations de l'espace des sociétés et leur capacité d'adaptation. Les villes fantômes et les villes minières, qu'elles soient en sursis ou en plein essor, sont nombreuses sur les deux versants de la chaîne ; elles encadrent les autres villes-champignons qui ont surgi, il y a quelques décennies, près de la ligne de crête, de part et d'autre du plus grand massif forestier du Mexique, pour en assurer l'exploitation. Cette exploitation, parfois sauvage et désordonnée, parfois contrôlée et régentée, vise

quoi qu'il en soit à tirer le plus grand profit d'une ressource en bois pas si intarissable qu'il y paraît.

4 Il est du ressort des hydrologues de déterminer si la diminution des surfaces forestières peut avoir un quelconque impact sur la ressource en eau ou sur le régime des cours d'eau. Le géographe et l'aménageur peuvent, eux, analyser le rôle de château d'eau indéniablement joué par le plus grand massif rhyolitique du monde dans tout le nord du Mexique. La présidence de la République a lancé en 2001 une *Cruzada nacional para el Bosque y el Agua,* croisade pour l'eau et la forêt, officialisant ainsi de manière administrative un lien encore à déterminer entre forêt et préservation des ressources hydriques.

5 Les autorités mexicaines, à travers les responsables de la *Comisión Nacional del Agua* considèrent qu'il y a à l'heure actuelle trois priorités nationales en terme d'eau au Mexique (cf. « Eau et espace à Valle de Bravo. La bataille pour l'eau », p. 283) (fig. 49). L'une d'elles est l'assèchement de la lagune de Chapala (État de Jalisco, à 20 km au sud de la métropole de Guadalajara) et ne concerne pas directement la Sierra Madre occidentale. Les deux autres sont par contre directement liées à ce massif, puisqu'il s'agit tout d'abord, du litige avec les États-Unis sur le partage des eaux du río Bravo/río Grande (une grande partie des apports d'eau au bas río Bravo vient du río Conchos, son principal affluent de droite, descendu du cœur de la Sierra Madre) ; et ensuite de la question des eaux de la Laguna (bassin Nazas-Aguanaval), région endoréique dont l'approvisionnement en eau est essentiellement assuré par le río Nazas, venu lui aussi de la partie centrale de la chaîne.

6 Ainsi, deux des enjeux hydrauliques nationaux impliquent directement la Sierra Madre occidentale. Ces enjeux de gestion de la ressource ne se situent cependant pas qu'à l'échelle nationale. Des tensions existent au niveau local, entre communautés rurales, notamment pour le partage de la rivière Ciénega de la Vaca ; au niveau régional, à l'intérieur de l'État de Durango, entre la région de la Laguna, où l'agriculture irriguée est fortement développée, et le haut bassin du Nazas, en amont, où l'on envisage la mise en valeur de la ressource hydraulique pour développer l'agriculture irriguée. Des tensions existent aussi entre les États de Durango et de Sinaloa, du fait du projet de détournement de cours d'eau pour accroître la ressource du premier. La question du rio Conchos traduit la nécessaire coopération entre le Mexique et les États-Unis dans la gestion des bassins internationaux, mais aussi la délicate position du Mexique par rapport à son puissant voisin. À toutes ces échelles, l'eau constitue un enjeu pour le développement économique. Mais, dans une situation de rareté croissante du fait de l'augmentation de la demande, les autorités sont conduites à faire des choix qui conditionnent l'aménagement du territoire et le type de développement des régions concernées. En ce sens, la question de la gestion des eaux de la Sierra Madre occidentale revêt une dimension très géopolitique.

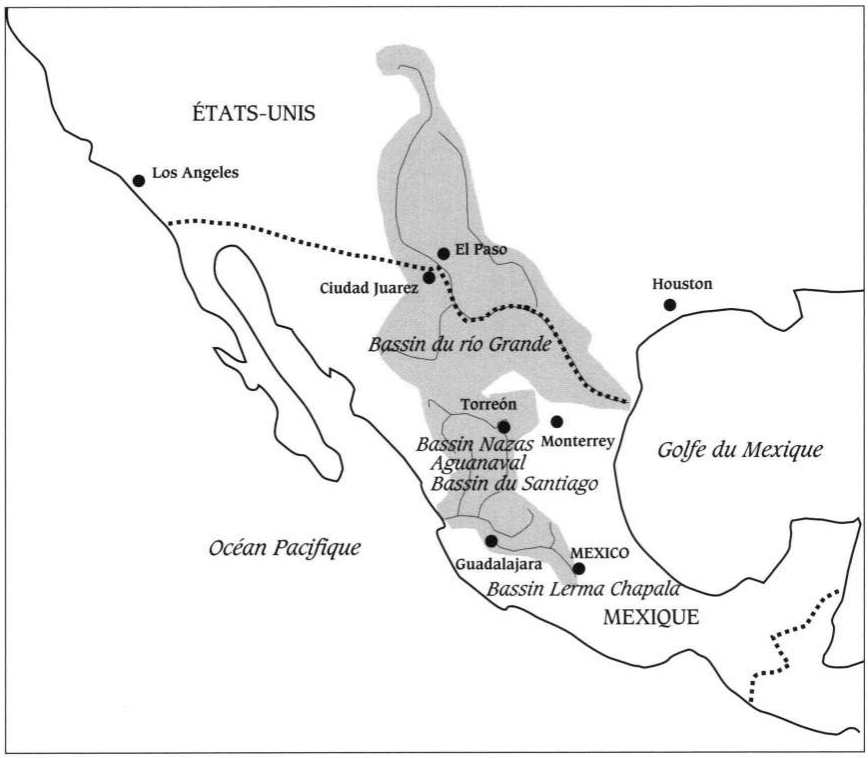


Fig. 49 – Localisation des trois « priorités hydrologiques nationales » du Mexique à l'heure actuelle.

L'eau du río Conchos est-elle mexicaine ou américaine ?

7 Grand pour le Nord, sauvage pour le Sud, le río Bravo del Norte ou río Grande, est issu des montagnes Rocheuses, mais sa « traversée du désert » est longue, et son débit naturel relativement faible. Dans son cours inférieur, il forme la frontière entre Mexique et États-Unis. C'est l'existence même de la frontière qui a permis le développement d'une série de « villes-jumelles », dont la plus connue est l'ensemble El Paso-Ciudad Juárez. Si la gestion des eaux du bassin est rendue difficile par la rapide croissance des villes de part et d'autre de la frontière, elle l'est de manière plus drastique au Mexique ; les dix plus grandes villes du bassin ont en effet vu leur population totale augmenter de 117 % en vingt ans (1975-1995).

8 La principale utilisation de l'eau y est agricole, et l'intégralité du volume disponible est déjà affectée ; de ce fait, on assiste à une salinisation des eaux et à un accroissement de leur teneur en pesticides ; l'érosion dans le haut bassin, liée au surpâturage, accélère de surcroît la sédimentation des barrages (USGS-CERC, 1999).

9 En aval du barrage d'Elephant Butte, le plus en aval de la section purement américaine du fleuve, un débit minimal de 31 m^3/s, régulé par le barrage, permet l'alimentation d'un périmètre irrigué côté texan ainsi qu'un débit d'étiage jusqu'à la recharge assurée par le río Conchos, affluent de rive droite venu de la Sierra Madre occidentale mexicaine ; 2,3 m^3/s sont également garantis pour l'alimentation d'un périmètre dans la vallée de Juárez, côté mexicain.

10 Par ailleurs, les villes de El Paso et de Ciudad Juárez pompent leurs eaux dans une nappe qui sera épuisée dans une trentaine d'années au rythme actuel d'utilisation. Leur croissance étant très forte, le volume d'eau dont dispose l'agriculture pourrait bien servir prochainement à l'alimentation des villes, comme c'est de plus en plus le cas dans toutes les grandes villes à forte croissance du sud-ouest des États-Unis (Phœnix, Albuquerque, Tucson, Las Vegas et surtout Los Angeles et San Diego), qui rachètent depuis plusieurs décennies les droits d'eau aux agriculteurs.

11 À 144 km en aval de Juárez/EI Paso, Fort Quitman sert de point de référence pour les traités, en particulier le traité de 1944 entre les États-Unis et le Mexique ; en aval de ce point, en effet, le fleuve est considéré comme un fleuve international, ce qui fait que la gestion à la fois de ses eaux et de celle des affluents d'aval (les rios Conchos et Salado côté mexicain, le Pecos côté texan) est effectuée collectivement : ainsi la *presa* (barrage) la Boquilla, sur le haut Conchos, doit-elle soutenir un débit d'étiage réservé au bas río Grande. Bien que les débits soient faibles pour un fleuve de cette taille (seule la moitié du bassin participe à l'écoulement), 800 000 ha sont irrigués dans le bassin versant du bas rio Grande, un peu plus de la moitié étant situés au Mexique.

12 Se posent aussi de graves problèmes de qualité d'eau ; on y retrouve la salinisation des eaux due aux périmètres irrigués texans, qui abaisse la qualité des eaux dont peut disposer le Mexique ; mais à terme le problème majeur est celui des effluents urbains, non encore traités, des villes de Ciudad Juárez et Nuevo Laredo au Mexique. Cela rappelle le problème du rio Tijuana, dont les eaux polluées concernent en aval le sud de l'agglomération de San Diego ; une pollution due là aussi en grande partie au développement des *maquiladoras* et à l'essor des villes qui s'est ensuivi.

13 Comme dans bien d'autres cas dans le monde, le renouvellement de ce seul gisement d'eau renouvelable doit se faire grâce à l'optimisation des eaux d'irrigation par l'introduction de techniques connues mais onéreuses, et surtout le rachat des droits d'eaux agricoles par les utilisateurs urbains. Tout en étant capables d'investir dans des techniques de rationalisation des usages, ces usagers « urbains » produisent, de plus, une bien plus grande valeur ajoutée par m^3 d'eau consommé.

14 Comme ailleurs, la cohabitation des demandes concurrentes des secteurs agricole, industriel et urbain ne provoque que des frictions modérées tant qu'il n'y a pas de pénurie grave. Or, depuis le début des années 1990, les Américains ont accru leur consommation d'eau dans le bassin du rio Bravo/Grande pour compenser la stabilisation des prélèvements dans la grande nappe de l'Ogallala (DESCROIX et LASSERRE, 2003), qui est en train de devenir une « mer d'Aral souterraine », surexploitée et en voie d'épuisement. Dans le même temps, une sécheresse aiguë s'est installée sur le nord du Mexique et le sud des États-Unis à partir de 1992, et les réservoirs sont vides depuis le milieu des années 1990. On a dû, de part et d'autre, réduire la proportion des périmètres irrigués dans laquelle l'eau est effectivement distribuée, en commençant logiquement par ne plus utiliser les terres les plus éloignées du stockage, afin de diminuer les pertes en conduction.

15 Au printemps 2001, après avoir laissé les paysans du périmètre de Matamoros, côté mexicain de l'embouchure du rio Bravo, réaliser les semis, les autorités américaines ont fait jouer le traité de 1944 pour déclarer – apparemment à bon escient - que le Mexique avait dépassé les quotas auxquels il avait droit. De ce fait, la récolte de sorgho a été de 5 à 20 fois inférieure à la normale dans le périmètre, et les pertes ont été énormes pour les agriculteurs concernés. Cela a provoqué un refroidissement des relations entre les deux

pays voisins, les paysans et l'opinion publique mexicains ayant du mal à admettre que l'eau du río Conchos, pourtant peu abondante du fait de la sécheresse (le débit moyen au barrage La Boquilla a été de 27 m^3/s entre 1993 et 2003 contre 41 m^3/s de 1935 à 1992), était réservée, pour une question de quota, aux paysans et aux villes texans.

16 Ainsi, tant pour des raisons de politique intérieure (montrer à l'opinion publique mexicaine que l'État se préoccupe des questions de souveraineté sur les ressources) que de politique sociale (soutenir les paysans sinistrés du bas río Bravo), le partage des eaux transfrontalières est devenu une question politique primordiale pour le gouvernement mexicain, ainsi que l'objet d'un vaste débat national, qui ne peut s'internationaliser : le traité est en effet clair et il semble qu'effectivement les Mexicains aient bien dépassé, plusieurs années durant, les quotas auxquels ils étaient autorisés.

17 Dans ce problème frontalier, les volumes d'eau qui pourraient être échangés sont faibles. Du côté mexicain du moins, les barrages du nord du pays et en particulier du bassin du Conchos, affluent du río Bravo, sont vides du fait de la sécheresse. La problématique se rapproche ici, selon le modèle d'Ohlsson, d'une pénurie d'eau de premier ordre (OHLSSON, 1999 : 148-149), à savoir une rareté physique de la ressource, par opposition à une pénurie de second ordre, situation dans laquelle la rareté est induite par la répartition de la ressource et la structure de sa consommation. On parle aussi de rareté induite par l'offre (« *supply-induced scarcity* ») (HOMER-DIXON, 1995 : 589-602 ; HOMER-DIXON et BLITT, 1998 : 6). Cependant, le problème comprend également une dimension sociale et politique (« *demand-induced scarcity* ») pour deux raisons : réduire la consommation peut amoindrir le problème, d'une part ; des arbitrages seront sans doute nécessaires pour déterminer quels secteurs devront voir leur consommation se comprimer, d'autre part. Comme ailleurs, il faut apprendre à gérer la pénurie, et pour des eaux transfrontalières, le plus logique est de faire cela ensemble.

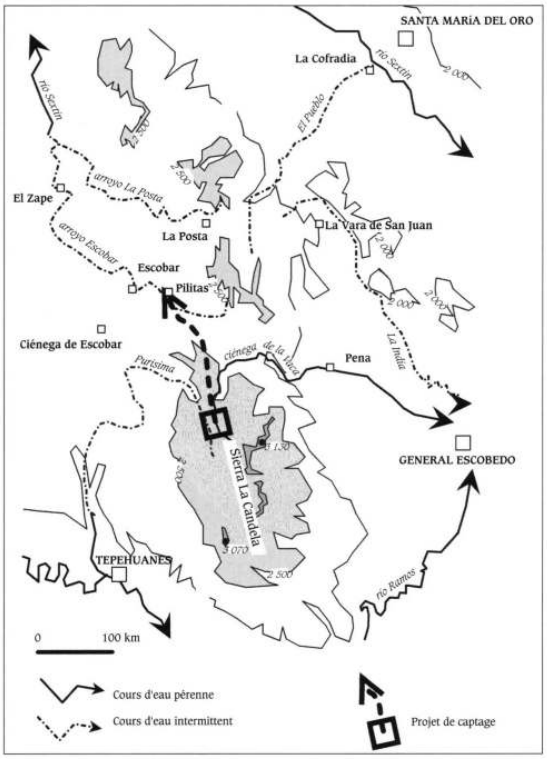
Au cœur de la sierra, la bataille des *ejidos :* Pilitas contre La Peña

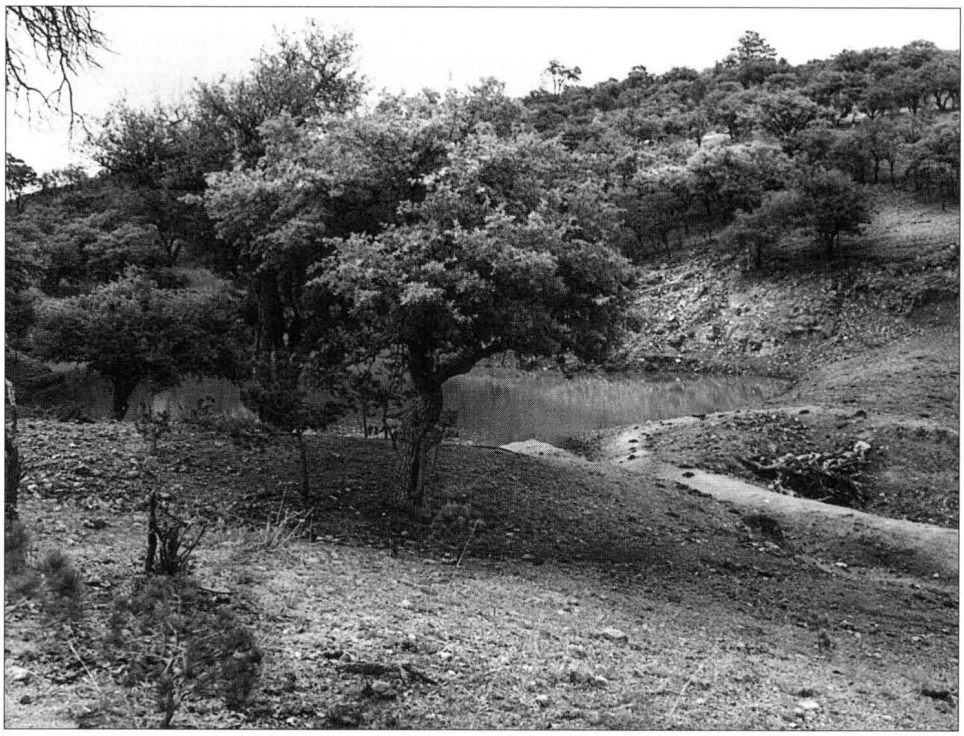
18 Les *ejidos* sont des communautés rurales créées par la Réforme agraire (1936), aujourd'hui en voie de dissolution. Dans la Sierra La Candela (au cœur de la Sierra Madre occidentale, fig. 50), il n'y a qu'un seul cours d'eau permanent, qui est bien alimenté : la Ciénega de la Vaca.

19 Les sources de la Ciénega de la Vaca donnent en permanence un débit de plusieurs centaines de litres/secondes d'une eau de très bonne qualité (DESCROIX, 2000). Ces eaux coulent naturellement vers l'est, permettant l'irrigation de plusieurs *ejidos,* en particulier Peña (300 habitants) ; or les habitants d'un autre *ejido* de la sierra, celui de Boleras-Pilitas (moins de 100 habitants aujourd'hui), situé plus haut, ont le projet de détourner le cours d'eau - qui naît sur un territoire fédéral - vers le nord, afin d'irriguer les champs de leur communauté, située plus haut que la première, mais dans une autre vallée. Ils envisagent pour cela de construire une conduite de 20 km en zone de montagne. Le village ne comprenant qu'une centaine d'habitants, l'investissement n'est éventuellement possible que grâce à l'argent des émigrés, très nombreux à travailler à Chicago, Las Vegas ou Los Angeles. Au niveau légal, les communautés qui souhaitent détourner l'eau « bénéficient » d'un vide juridique, car les terrains fédéraux sont en principe à tout le monde. Et surtout, ils comptent sur la tradition et l'usage qui veulent que celui qui trouve l'eau la prend et

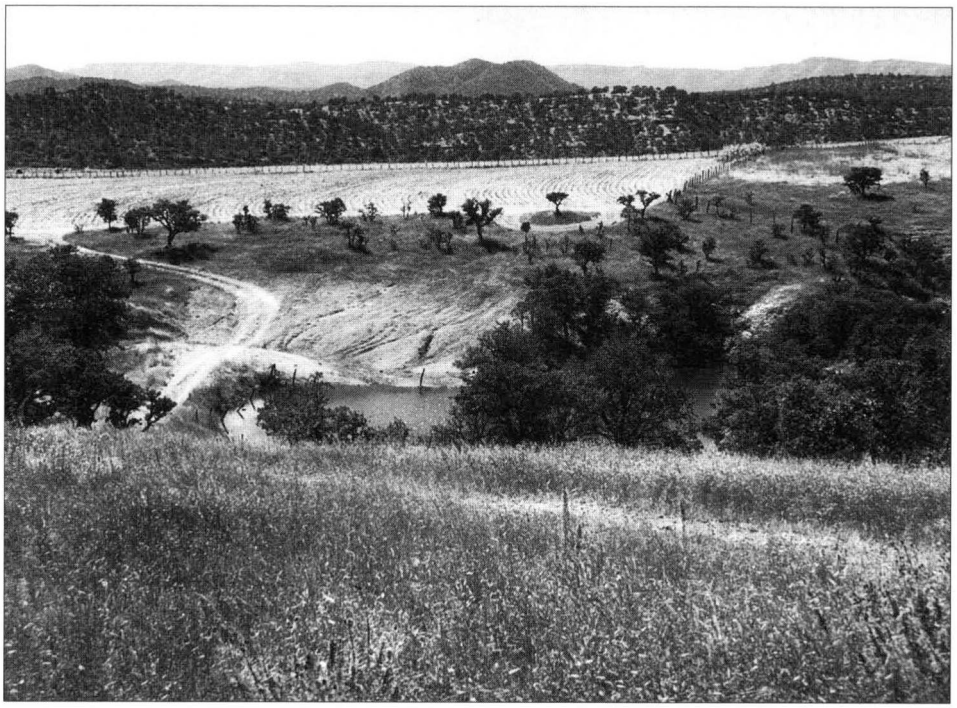
en profite - c'est le principe, aussi présent dans la législation de dix-neuf États américains de l'Ouest, du « premier arrivé, premier en droit » ou *prior appropriation* (ROGERS, 1996 : 91). Ils comptent aussi sur l'absence d'autorité capable de réglementer ce genre de litiges. Au cas - peu probable heureusement – où ils mettent leur projet à exécution, ils pourront utiliser cette eau pendant des années avant que le litige ne soit résolu, à moins bien sûr qu'il ne soit réglé entre-temps par des moyens peu légaux...

Fig. 50 – Projet de détournement des eaux de la Ciénega de la Vaca.





Presón (petit lac collinaire) sur l'*arroyo* La Manga près de Boleras (au-dessus de Tepehuanes).



Petit *presón* au lieu-dit Loma Blanca entre Santa María del Oro et Tepehuanes.

Presón de Pitorreal sur la piste de Buenos Aires, au-dessus de Tepehuanes.

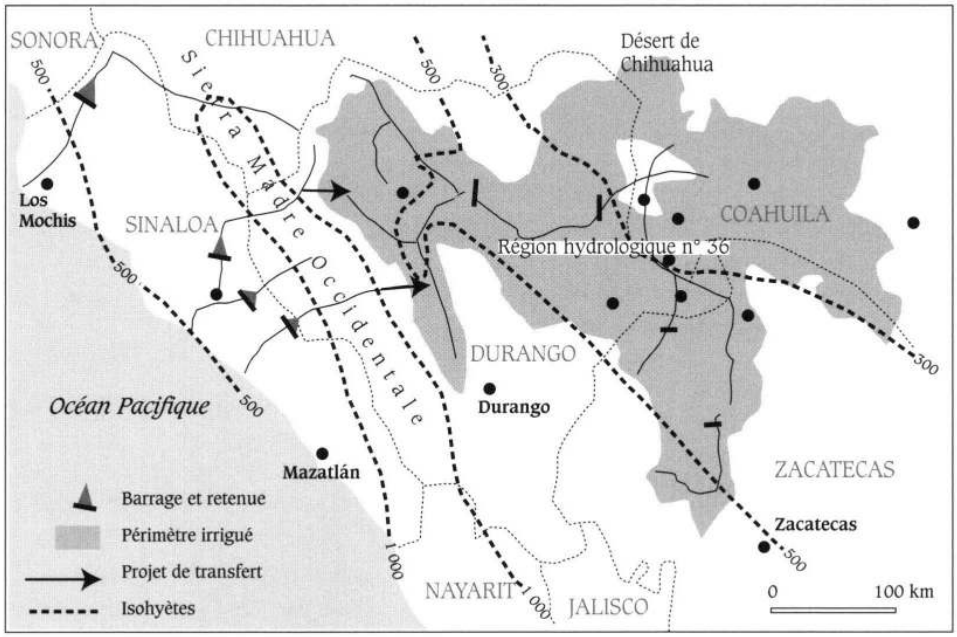
Transférer l'eau vers l'intérieur : le litige entre les États de Durango et de Sinaloa

20 À l'intérieur même du Mexique, il existe des conflits potentiels pour l'accès à la ressource, entre États. Ainsi, l'État de Durango forme depuis une dizaine d'années un projet de transfert assez important, qui risque d'être peu apprécié par ses voisins (fig. 51). L'État de Durango est globalement assez favorisé, car il comprend un secteur important de la Sierra Madre occidentale, qui reçoit une pluviométrie correcte (de 500 à 1 700 mm selon les altitudes et les expositions). Étant à cheval sur la chaîne de montagnes, son territoire s'étend partiellement sur le versant pacifique de la sierra, bien plus arrosé (800 à 1 700 mm par an) que le versant interne, tourné vers l'altiplano continental, abrité et sec (qui reçoit entre 500 et 900 mm par an). Paradoxalement, c'est le versant sec qui est le plus peuplé, car le versant ouest humide est très escarpé et difficile d'accès ; seules quelques villes minières s'y sont installées au fond de vallées étroites.

21 Les autorités de l'État de Durango ont confié à un bureau d'études français la réalisation des études sur un projet de transfert par tunnel d'une partie des eaux coulant en direction du Pacifique, vers le versant sec bien plus densément habité dans le territoire. Il s'agit de creuser une galerie de plusieurs dizaines de kilomètres de long depuis les hautes vallées des ríos San Lorenzo et Humaya vers le bassin endoréique du Nazas, qui s'écoule vers le sud du désert de Chihuahua, dans l'ancienne Laguna de Mayrân. Mais seuls les hauts bassins du versant Pacifique se trouvent dans l'État de Durango ; les cours d'eau s'écoulent en aval dans l'État de Sinaloa. Or, celui-ci est déjà équipé de plusieurs gros barrages réservoirs (notamment pour assurer l'irrigation des périmètres de Culiacán et d'El Fuerte-Los Mochis). Les autorités du Sinaloa sont donc très inquiètes de ce projet qui

risque de priver d'eau une région *a priori* favorisée du Mexique, mais sujette à une forte variabilité interannuelle des pluies : le littoral est aride au nord, alors que les premiers contreforts montagneux en arrière de la côte reçoivent de grandes quantités d'eau - entre 800 et 1 500 mm - en particulier au sud. Ainsi, durant la période de « soudure » de l'année 1994, très sèche partout au nord du Mexique, les réservoirs des barrages du Sinaloa ont été presque totalement vidés. On se retrouve là devant la situation typique de « l'avantage à l'amont » qui met ainsi l'État de Durango en position de force.

Fig. 51 – Bassin du Nazas - Aguanaval et projet de transfert vers celui-ci des eaux coulant vers le Pacifique.



Rue de la petite ville de Canelas, au fond d'une vallée dévalant vers le Pacifique.

Une bataille amont-aval en perspective ?

22 Mais un litige amont-aval pourrait paradoxalement aussi surgir, à l'intérieur même de l'État de Durango, entre le haut bassin du Nazas et la Laguna, le grand périmètre irrigué de sa zone basse. De fait, une zone *amont* peu peuplée peut-elle être indéfiniment destinée à pourvoir de l'eau aux zones en *aval* plus peuplées et dépourvues de ressources en eau ? Cette configuration est typique des zones arides et semi-arides, où les eaux sont exogènes et les approvisionnements dépendants des secteurs amont en général montagneux ; ce cas de figure se retrouve sur tous les continents : *huertas* espagnoles et françaises, oasis du sud de l'Atlas en Afrique du Nord, Mésopotamie, Iran, Asie centrale, Pendjab, grands fleuves sahéliens issus du Fouta-Djalon, oasis des piedmonts argentins, chiliens et péruviens des Andes, et périmètres irrigués du Nord-Mexique et du sud-ouest des États-Unis, pour ne citer que ces exemples.

23 Ces situations sont le reflet des processus historiques de mise en valeur des terres agricoles. Elles se sont parfois institutionnalisées à travers des structures juridiques qui accordaient la propriété de l'eau ou son droit d'usage au premier à la mettre en valeur, comme dans l'Ouest américain notamment. Dans les basses terres, plus propices au développement de périmètres irrigués, se sont donc développées des économies fondées sur l'exploitation d'une ressource hydraulique exogène. Cette opposition entre amont et aval pour les questions de gestion de la ressource hydraulique peut être rapprochée du modèle centre-périphérie : on observe une concentration des moyens de production en aval, avec différenciation des fonctions de l'espace selon une logique imposée par les modes de production de l'aval, et intégration de l'ensemble du bassin versant selon cette même logique.

24 Ce modèle vaut ce que valent les modèles, et ces structures spatiales de consommation de l'eau perdurent tant qu'elles ne sont pas remises en cause en amont. Cette remise en cause, bien entendu, ne s'opère pas sans heurts : ainsi, lorsque les États amont du bassin du Colorado, Nevada, Arizona, Utah, ont réclamé une plus grande part des eaux du fleuve, la Californie s'y est vigoureusement opposée, arguant de « droits historiques » et des dommages que tout prélèvement en amont provoquerait à son secteur agricole. C'est l'intervention du gouvernement fédéral américain, en 1997, qui a obligé la Californie à accepter les demandes de ses voisins d'amont. De même, lorsque la Turquie a décidé de mettre en œuvre son projet de mise en valeur du Sud-Est anatolien, en construisant de nombreux barrages sur le Tigre et l'Euphrate, la Syrie et l'Irak, voisins d'aval qui avaient développé leur secteur irrigué depuis fort longtemps, ont été obligés de composer avec ce nouveau partage des eaux du fait de la puissance turque. Une dispute récurrente oppose le Kirghizstan à l'Ouzbékistan au sujet de l'emploi des eaux du Syr Daria : le Kirghizstan, en amont mais plus faible que son voisin ouzbek, s'efforce de faire valoir ses besoins face à la puissante pression de Tachkent. Enfin, dans le bassin du Nil, l'Égypte, pays d'aval, a jusqu'à présent réussi à contrôler les usages des eaux du fleuve en amont soit par traités avec le Soudan et l'Ouganda, soit par une menace très directe à l'endroit d'une Éthiopie par ailleurs épuisée par la récurrence des guerres civiles et de frontière avec l'Érythrée.

25 Peu peuplée et souffrant d'une mauvaise gestion de ses pâturages (le surpâturage est généralisé et reste la règle malgré une rapide dépopulation), la Sierra Madre occidentale pourrait très bien devenir une région d'agriculture intensive du fait de ses sols peu pentus et de ses ressources en eau. Et l'eau consommée sur place ne serait évidemment

plus disponible en aval. On se trouverait potentiellement ici dans un cas classique d'irruption d'une nouvelle demande en amont qui viendrait bousculer les habitudes de consommation de l'aval. Or, il y a déjà des tensions sur la ressource dans la zone amont (voir plus haut, le cas de l'Arroyo Ciénega de la Vaca). Cela dit, la sierra se vide de sa main-d'œuvre jeune, qui préfère s'exiler à Las Vegas ou Chicago ; elle ne prend donc pas du tout le chemin d'une intensification des cultures.

La Laguna ou le triomphe du libéralisme

26 On s'est rendu compte, au contact des autorités mexicaines en charge de la gestion des eaux, qu'il y avait des divergences sur les estimations chiffrées des ressources en eau ; les données répandues par les responsables politiques concernant la recharge naturelle de l'aquifère de la Laguna sont par exemple deux fois plus élevées que celles publiées par la CNA (*Comisión National del Agua*). Alors qui croire ?

27 Toujours est-il que le cas de la Laguna résume à lui seul une grande partie des succès et des contradictions de l'esprit pionnier et des excès du « laisser-faire » inhérent au capitalisme libéral triomphant en Amérique du Nord. Développé à l'époque du régime plus « populiste » et volontariste de la présidence de Lázaro Cárdenas (1934-1940), le périmètre irrigué a longtemps été consacré au coton ; dès les années 1940, la consommation en eau de ce périmètre de 160 000 ha était déjà bien supérieure au volume renouvelable des eaux, à la fois souterraines et de surface. Le contexte était celui d'un partage des terres suivant la Réforme agraire, qui a permis l'installation de milliers de petits paysans dans le cadre des *ejidos*, ces communautés rurales créées de toutes pièces sur les terres expropriées des haciendas. Les grandes propriétés ont été démantelées, la loi n'autorisant plus les exploitations irriguées supérieures à 150 ha. Mais les *pequeños*, nom donné aux « petits propriétaires », parfois d'anciens *hacendados* expropriés, disposaient tout de même de 50 fois plus de surface en moyenne que les *ejidatarios*, les paysans de ces nouvelles communautés. Le système irrigué étant réalisé en priorité pour les *ejidos*, les « propriétaires » ont continué à pomper dans la nappe, et ont même accru les volumes soutirés à la nappe, provoquant un abaissement rapide de celle-ci ; le maximum est atteint en 1959, année au cours de laquelle le volume d'eau consommé dans la Laguna fut de 2,7 milliards de m^3, soit deux fois le volume renouvelable. Mais cette surexploitation, bien qu'elle ait diminué depuis, persiste, et le niveau phréatique continue à baisser ; l'abaissement moyen de la nappe reste de 1,75 m/an en moyenne depuis 1950 (fig. 52). Les mesures même d'économie d'eau ont eu des impacts négatifs (RIGAL, 1988) : ainsi, en 1960-1962, le fait de cimenter les canaux d'irrigation principaux pour limiter les pertes en conduction a immédiatement provoqué un abaissement supplémentaire de la nappe, que les fuites des canaux alimentaient incidemment.

28 Il est cependant à noter que la surexploitation de l'aquifère est en diminution ces dernières années, malgré la persistance de la sécheresse ; en effet, il semble que les autorités aient pris conscience de la gravité de la situation et de la nécessité de pérenniser la ressource. Mais ce sont là des données officielles non encore vérifiées. Toujours est-il que la superficie irriguée ces dernières années dans le périmètre a sérieusement diminué ; on est d'abord passé à des mini-cycles irrigués (de 160 000 à un périmètre compris entre 50 000 et 90 000 ha) puis à des micro-cycles (moins de 10 000 ha irrigués en 2001 et 2002).

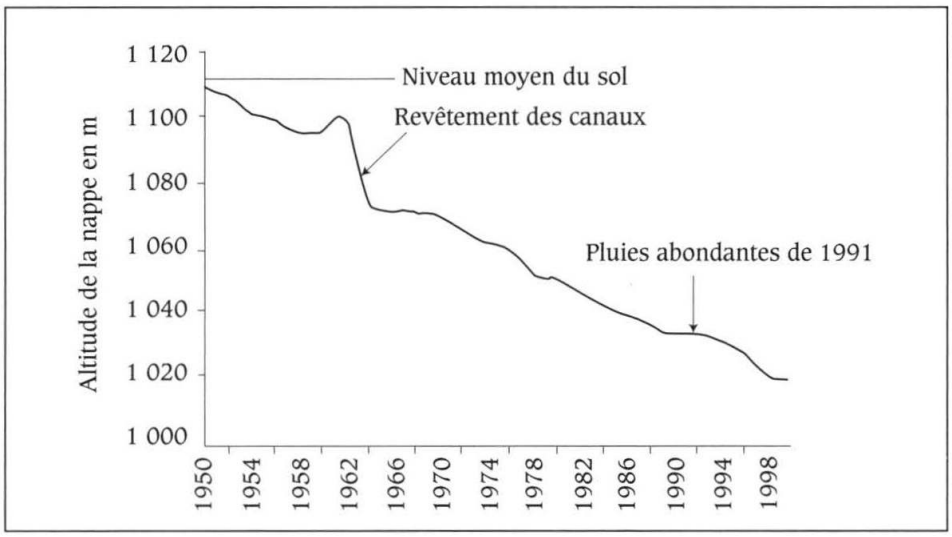


Fig. 52 – Abaissement du niveau phréatique de la nappe de la Laguna depuis 1950.

29 Les responsables de la gestion de l'eau de la Laguna, à l'automne 2002, étaient très optimistes quant à la résorption de la surconsommation d'eau. Ils tablent à présent sur le libéralisme pour régler le problème. En effet, il semblerait que la hausse des prix de l'eau soit en train de rendre de gros volumes d'eau disponibles. Comme les villes du Sud-Ouest américain rachètent les droits d'eau des agriculteurs pour alimenter leurs réseaux d'eau potable et leurs industries, les autorités locales pensent que la production de fourrage, principale récolte de la Laguna destinée à l'alimentation des vaches laitières gérées en stabulation libre, va être remplacée par l'importation de fourrages nord-américains, ce qui permettra simultanément le maintien de la riche industrie agro-alimentaire de la filière lait (27 % de la production laitière du Mexique vient de la Laguna) et la mise à disposition d'importants volumes d'eau destinés (pour le moment) à l'irrigation pour des usages à plus forte valeur ajoutée. De ce fait, deux nouveaux golfs ont été autorisés, un parc d'attraction à capitaux américains est prévu, de même qu'une usine d'assemblage d'avions, également américaine. Une partie de l'activité d'élevage est déjà en train d'essaimer dans d'autres dépressions endoréiques, comme celle, normalement protégée, de Cuatro Cienegas, où 64 sources d'eau minérales constituent un paysage de rêve et un site unique en plein désert, aujourd'hui gravement menacé par le laisser-faire du capitalisme libéral. La Laguna se permet même le luxe d'envisager d'exporter de l'eau vers d'autres régions plus démunies encore, comme la ville de Saltillo (capitale de l'État de Coahuila, dont fait partie la ville de Torreón, plus grande cité de la Laguna).

30 En résumé, on cherche donc à remplacer la luzerne par des activités à haute valeur ajoutée, produisant bien plus de valeur (100 à 1 000 fois plus) avec la même quantité d'eau.

Les problèmes de ressource et d'usage de l'eau : d'une exploitation minière à une gestion patrimoniale

31 Néanmoins, à l'échelle fédérale de l'État mexicain, il y a une nette prise de conscience de la nécessité de passer d'une exploitation minière de la ressource en eau à une gestion patrimoniale. C'est du moins ce qui est affirmé à la tête de l'État et cela viendrait

contrecarrer le comportement pionnier qui est celui des habitants du nord du Mexique, si proche de celui des Américains surtout de l'Ouest, et si éloigné de celui des communautés indiennes du sud du pays, dont les systèmes agraires ont plus de 3 000 ans et sont respectueux du cadre environnemental dans lequel ils perdurent, même si les contextes sont peu comparables.

32 La politique de l'eau est en train de se construire au Mexique et la création toute récente d'organismes de bassin (largement inspirés du modèle français), où se retrouvent tous les usagers de l'eau, en constitue une première étape prometteuse. La récurrence des années sèches n'a toutefois pas aidé à cette mise en route, tant a été forte l'immédiateté de la pénurie.

33 Rappelons toutefois que le troisième problème national hydrologique (après le río Bravo et la Laguna), qui n'a pas été évoqué ici puisqu'il ne concerne pas la Sierra Madre occidentale, est celui du bassin du Lerma Chapala. La disparition programmée du plus grand lac mexicain, ces toutes prochaines années peut-être, est en grande partie due à la politique expansionniste et libérale de Vicente Fox, alors gouverneur de l'État de Guanajuato qui couvre 50 % du bassin du Lerma. Celui-ci a laissé s'instaurer une gigantesque surconsommation d'eau pour permettre un accroissement des rendements agricoles et l'enrichissement d'une classe de propriétaires qui est en train de reconstituer les haciendas dissoutes, il y a à peine cinquante ans. Ce qui montre que si politique hydraulique il y a, elle n'est pas forcément cohérente à l'échelle du pays tout entier.

34 Toutefois, l'année 2004 ayant été très pluvieuse, le niveau de la lagune de Chapala est remonté pour la première fois depuis plus de dix ans.

BIBLIOGRAPHIE

Références

DESCROIX L., 2000 – « Les conflits d'usage de l'eau au nord du Mexique : une problématique multi-scalaire ». Publications de la MSH-Alpes, CNRS, Grenoble : 129-144.

DESCROIX L., LASSERRE F., 2003 – *Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitique.* Paris, L'Harmattan, 280 p.

HOMER-DIXON T.F., 1995 – The Ingenuity Gap : Can Poor Countries Adapt to Resource Scarcity ? *Population and Development Review,* 21 (3) : 587-612.

HOMER-DIXON T.F., BUTT J., 1998 – *Ecoviolence. Links among environment, population and security.* Rowman & Littlefiled, Lanham, 240 p.

OHLSSON L., 1999 – *Environment, Scarcity, and Conflict – A study of Malthusian concerns.* Dept. of Peace and Development Research, université de Göteborg, 253 p.

RIGAL G., 1988 – *Étude du problème de l'irrigation dans une région agricole du centre-nord du Mexique.* Mémoire de fin d'études, INAPG Paris Grignon, 96 p.

ROGERS P., 1996 – *America's Water. Federal Roles and Responsibilities.* Cambridge MIT Press et Twentieth Century, 286 p.

USGS-CERC, 1999 – The Lower Rio Grande Ecosystem Initiative. Page de présentation du Columbia Environmental Research Center de l'USGS : (http://www.cerc.usgs.gov/lrgrei.lrgrei.html).

AUTEURS

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

FRÉDÉRIC LASSERRE

Professeur de géographie à l'université Laval (Québec).

L'écotourisme : une alternative à la déprise et à la surexploitation ?

Des atouts pour développer une nouvelle activité

Luc Descroix

1 L'exploitation des ressources de la Sierra Madre se fait de manière générale mais sans colonisation réelle : les forêts sont coupées, et ensuite, pendant dix ou vingt ans, la coupe peut ne recevoir la visite d'aucun bûcheron, et d'aucun troupeau pour peu que le secteur soit éloigné des villages. De même, la dégradation des pâturages est le fait de troupeaux errants, souvent à demi sauvages, comme cela a été décrit dans le désert de Chihuahua (BARRAL et ANAYA, 1995).

2 De plus, l'espace est entaillé de vallées très encaissées côté Pacifique, cloisonnant certains secteurs, où même des villages sont coupés du reste du monde. Les dénivellations et les distances sont grandes, et les routes n'ont été goudronnées que récemment, si bien qu'il commence à peine à se former des « fronts de colonisation » sur certains axes de pénétration, où seuls les bûcherons intervenaient jusque-là. Ce sont souvent les pistes forestières qui deviennent zones pionnières, des paysans profitant des coupes pour installer des champs. Les villages de bûcherons se « durcissent » et les commerces se généralisent.

Vers le développement de l'écotourisme

3 Cependant, la Sierra Madre occidentale est encore un espace à peu près vierge, l'un de ces rares espaces de liberté qui restent près du grand marché nord-américain. Les équipements touristiques sont rares et il est facile de trouver des endroits très sauvages et dénués de toute installation d'accueil touristique. On pourrait très bien passer plusieurs semaines en marchant sur des sentiers ou des chemins en ne croisant que des

paysans et des éleveurs locaux, souvent d'ethnies indiennes (Tepehuanes ou Tarahumaras essentiellement). Cependant, il y a deux limitations à cela :

- les cartes topographiques existantes (elles sont en cours de renouvellement) sont dépassées quant aux chemins et routes : leur tracé ne correspond plus à la réalité ;
- les Autochtones, autant que les autorités, déconseillent formellement aux gens de se promener loin des villages, et surtout de camper, arguant de la dangerosité des sites, liée à la présence de bandits de grand chemin, de narco-trafiquants, de planteurs de marijuana ou de pavot peu désireux qu'on s'intéresse à leur activité.

4 Même sur les grands axes, les attaques à main armée ne sont pas rares, et les bals du samedi soir, dans les villages de bûcherons surtout, se terminent souvent en bagarre générale où les morts sont fréquents.

5 En dehors des aspects plus ou moins folkloriques tels l'usage du ***peyote*** (petit cactus hallucinogène très utilisé par les sorciers mexicains) ou la présence des *pistoleros*, un mythe tenace persiste dans la sierra : tel l'El Dorado aux confins des bassins de l'Orénoque et de l'Amazone, les villageois colportent volontiers l'idée selon laquelle il y aurait quelque part un trésor rassemblant toutes les prises d'un bandit qui a écumé la sierra au début du XX^{e} siècle. Chaque village revendique qui une grotte, qui un canyon ou une anfractuosité sur le flanc d'un volcan, dans laquelle reposerait cette richesse. En fait, il y a surtout un grand nombre de mines d'or dans toute la sierra, qui sont pour la plupart fermées (mais l'État de Durango reste le premier État minier du pays) mais qui ont entretenu des mystères et des légendes, où des paysans deviennent milliardaires, et où beaucoup meurent de mort violente sans avoir pu dévoiler la cachette de leur magot...

6 Cependant, toutes ces limitations ont un pendant positif : les conditions sont réunies pour permettre le développement de l'écotourisme. Une forme de tourisme fondée sur le respect et la meilleure connaissance des milieux naturels, permettant ainsi à la fois d'améliorer les ressources des paysans, et d'aider à préserver les ressources naturelles.

7 Ce type de tourisme cumule plusieurs avantages :

- c'est une alternative à l'élevage en tant que ressource économique ; ce peut être un tourisme « intégré » où les acteurs seraient les habitants des villages ; ceux-ci pourraient prendre en charge :
  - l'hébergement ;
  - l'aménagement des infrastructures touristiques ;
  - une partie des services nécessaires au développement du tourisme : commerces, restauration, artisanat, guide, transport, animation, etc.
- l'amélioration des conditions d'existence des habitants de la sierra et la diversification de leurs activités ; cela pourrait amoindrir la surexploitation des ressources en fourrages et en bois ;
- l'amélioration de l'emploi sur place permettrait de limiter la déprise rurale qui est aussi une cause de dégradation des paysages, voire des ressources végétales ;
- enfin, l'écotourisme permet de promouvoir une région pour son intérêt paysager et patrimonial ; il contribue à la préservation de l'environnement, puisqu'il est lié à celui-ci, qui est sa principale condition d'existence.

8 L'écotourisme constitue une nouvelle forme de mise en valeur du patrimoine naturel et parfois culturel. Il s'insère dans la population en en faisant un acteur du développement ; celle-ci en tire profit et cela dynamise la région tout en assurant la protection des milieux naturels sur le long terme.

9 Le regard extérieur, urbain, d'une clientèle du Nord, s'attarde sur les aspects naturels, romantiques et sauvages en même temps, de ces espaces peu peuplés.

10 Les traditions locales sont celles d'un pays neuf, puisque la colonisation y est récente. Les coutumes indiennes sont encore bien vivantes dans les communautés et villages tarahumaras, tepehuanos et huicholes.

11 L'un des aspects les plus folkloriques est l'ensemble des fêtes centrées sur le cheval et le dressage des animaux : rodeos, ***charreadas***, ***coliaderas***, et courses de chevaux, assez contrôlées en principe puisqu'elles donnent lieu à des paris (et de fait, beaucoup sont organisées clandestinement dans les villages un peu éloignés des rares postes de police).

12 L'artisanat est surtout centré sur le travail du cuir (attelages, sandales, etc.), la confection de fromages et de sucreries (pâtes de coings et de pommes). Il n'y a pas d'artisanat d'art comme dans les zones méridionales du pays où dominent les populations d'origine indienne.

13 Reste que le touriste venu des villes du Mexique, ou des pays du Nord, est avide de paysages et de points de vue, de richesse culturelle ; ici, c'est principalement la grande variété des paysages, liée à la diversité des reliefs et aux étagements altitudinal et latitudinal, qui constitue l'attrait principal de cette région en devenir. Les paysages sont plus ou moins anthropisés, des zones à peu près vides d'habitants permanents succédant aux clairières où quelques maisons sont entourées de champs de maïs et de haricots.

Course de chevaux au-dessus du village de Boleras (près de Tepehuanes, État de Durango)

Zone de pinacles rocheux sur le plateau rhyolitique de El Salto (État de Durango).

Clairière de El Tarahumar, sur la ligne de partage des eaux de la sierra.

14 Les sites d'intérêt touristique promis à un avenir dans ce domaine sont nombreux ; seuls les plus intéressants seront évoqués dans les pages qui suivent. C'est évidemment le point de vue d'un observateur occidental, urbain, mais cela permettra de cerner les potentialités de sites et des richesses culturelles qui pourraient servir de ciment à un

renouveau d'activités touristiques et des activités induites d'hébergement, de transport, de restauration, de formation de guides, d'aménagement des sites, etc.

« Ce que le canyon du Colorado aimerait être quand il sera grand »

La Barranca del Cobre

15 Le Copper Canyon est le seul site naturel un tant soit peu touristique du nord-ouest du Mexique, en dehors des plages de Basse-Californie. Il est l'un des plus profonds canyons du monde, d'où le slogan qui le fait connaître au Mexique comme aux États-Unis (« ce que le canyon du Colorado aimerait être quand il sera grand »). Il est effectivement plus profond que le canyon du Colorado (plusieurs tronçons sont encaissés de 1 850 m), mais ce qui fait l'originalité de ce site, c'est sa diversité et la multiplicité des gorges (sept bien individualisées, la plupart sur des affluents du río Fuerte, et une huitième, bien moins profonde, mais pleine de charme, s'écoulant vers l'Altiplano (fig. 53). Ces gorges sont aussi parsemées de cascades, surtout impressionnantes à la saison des pluies, de belvédères, et les plateaux dans lesquels elles sont inscrites sont couverts de belles forêts de pins et de sapins.

Fig. 53 – Carte de localisation des principaux points d'intérêt touristique de la Sierra Madre occidentale.

16 Les sept principales gorges sont les suivantes (fig. 54) : la Barranca del Cobre (haute vallée du río Urique), la Barranca de Urique, celle de Batopilas (sur la rivière du même nom), celle de Sinforosa, creusée par le río Verde, et celle de Oteros-Chinipas, sont toutes situées sur des affluents du río Fuerte. Plus au nord, les Barrancas de Huápoca et Candameña appartiennent respectivement au bassin du río Yaqui et du río Mayo. Enfin, la

plus petite est la haute vallée du río Conchos, un affluent de droite du río Grande (appelé río Bravo del Norte par les Mexicains).

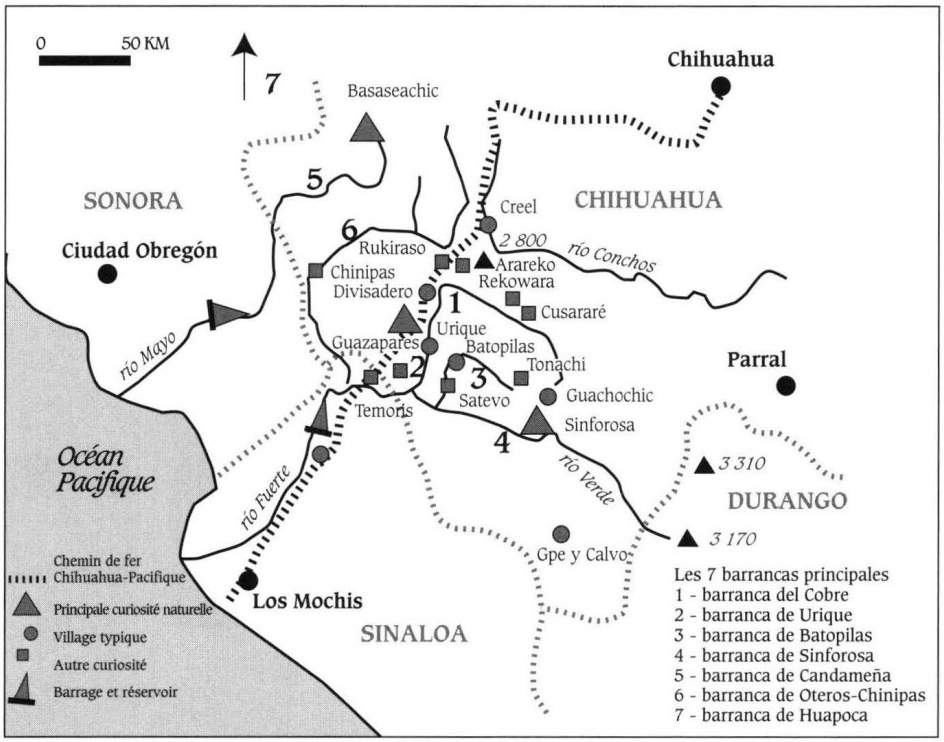
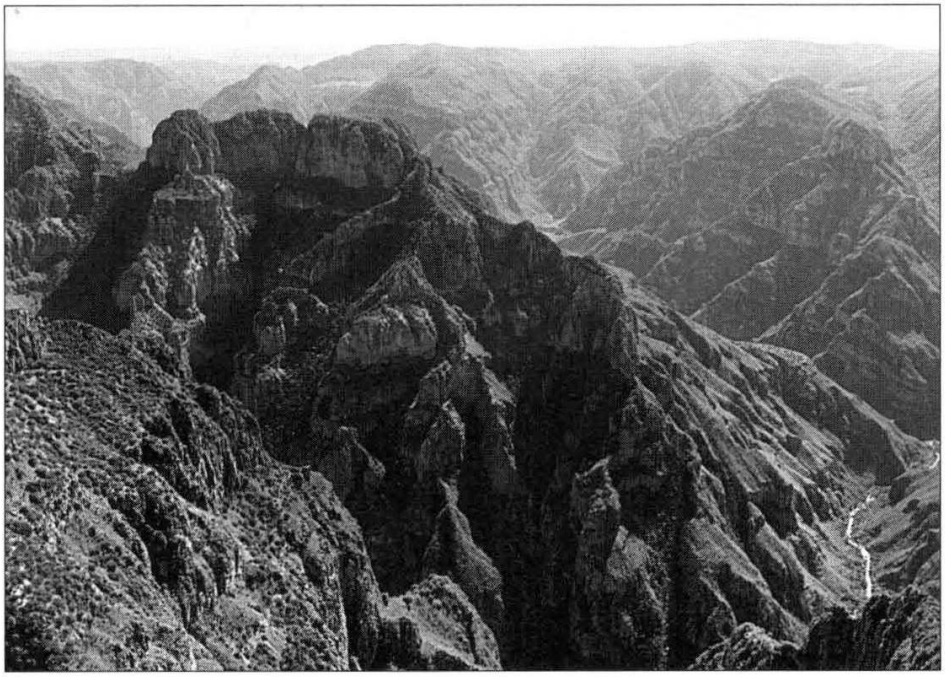
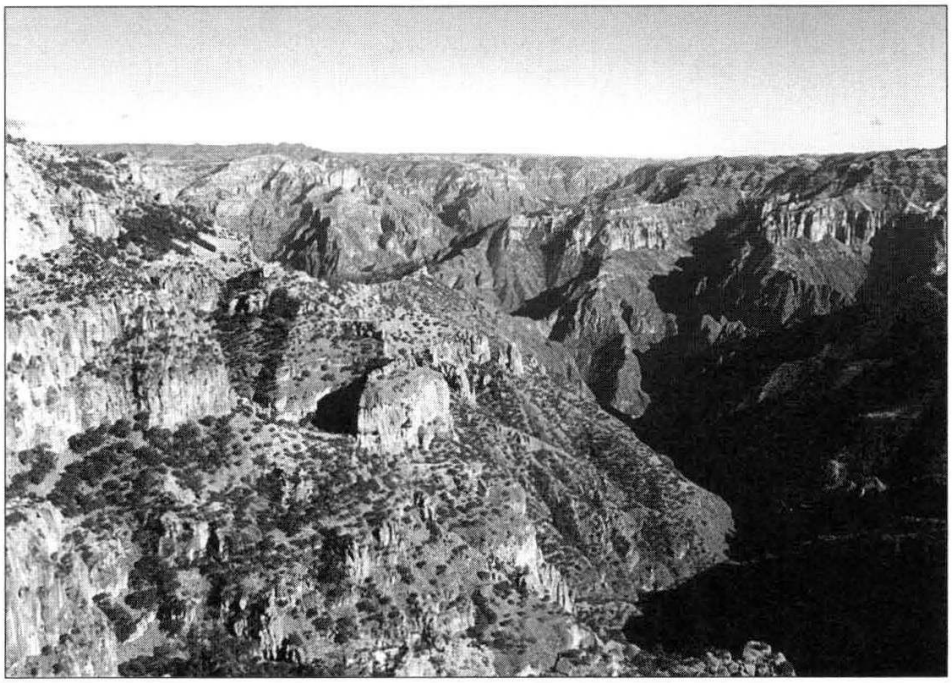


Fig. 54 – Carte des Barrancas del Cobre.

17 Toutes ces *barrancas* ont été creusées dans le plus grand édifice rhyolitique au monde : la sierra mesure plus de 1 500 km du nord au sud, et elle a toujours au moins 200 km de largeur. Les eaux tombées sur la sierra ont eu à creuser de profondes vallées pour rejoindre la plaine côtière du Pacifique, s'encaissant de plusieurs centaines de mètres (et localement plus de 1 500 m) sur des centaines de kilomètres.



Le mirador de Los altos de Sinforosa, près de Guachochic.



Vue de la Barranca del Cobre depuis la terrasse de la gare « Divisadero » (« point de vue » en espagnol) du chemin de fer de Chihuahua au Pacifique ; le canyon a ici 1 850 m de profondeur.

18 Plusieurs circuits permettent de s'enfoncer dans les gorges en différents sites, et des hôtels ou pensions ont été installés permettant de rester plus longtemps ou de visiter plus en détail certains secteurs.

19 Le seul centre touristique est la estación Creel, du nom de l'ingénieur qui a construit le chemin de fer de Chihuahua au Pacifique ; près de ce village il y a la gare de Divisadero, de

laquelle on domine de 1 800 m le canyon de Urique, et où se trouvent deux hôtels de standing. Mais l'accès aux *barrancas* est aussi très facile par Guachochic au sud (Barranca de Sinforosa, la plus profonde) et par Basaseachic et Ciudad Madera au nord (Barrancas de Huapoca et Candameña).

Le train de Chihuahua au Pacifique

20 C'est l'un des plus impressionnants travaux d'ingénierie réalisés au Mexique ; cette ligne de chemin de fer achevée en 1961 dans le but d'offrir à Chihuahua un débouché sur l'Océan, traverse la « Sierra Tarahumara » et toute sa descente de la ligne de crête vers le Pacifique se fait dans les Barrancas del Cobre. Ces 500 kilomètres ont fait l'objet de prodiges de la part des ingénieurs et des ouvriers qui y travaillèrent : 410 ponts et 99 tunnels, une dénivelée de 2 450 m ; le tracé longe pendant plusieurs dizaines de kilomètres la Barranca del Septentrion, profonde de 1 600 m. La ligne a été privatisée en 1997, et le tarif a alors été multiplié par 20, transformant une ligne de liaison intra-mexicaine très utilisée (aucune route ne traverse la Sierra Madre à cet endroit-là ; il faut aller 300 km plus au nord ou 450 km plus au sud pour trouver des passages routiers à travers la chaîne) en une ligne touristique et élitiste aux wagons climatisés.

Le train de Chihuahua au Pacifique dans les Barrancas.

La « Sierra Tarahumara »

21 On appelle parfois la partie nord de la Sierra Madre (État de Chihuahua et nord du Durango) de ce nom-là, déformation de « raramuri » le vrai nom de cette ethnie dans la langue de ses membres. Le mot signifie « plante (des pieds) coureuse », ce qui sous-entend « les gens aux pieds légers ». Les Tarahumaras étaient traditionnellement installés aussi dans les grandes plaines de l'État de Chihuahua, mais les colons espagnols les en ont délogés, ne leur laissant que le refuge de la montagne. Dans cet ensemble de gorges et de

plateaux aux rebords vertigineux, les Tarahumaras se distinguent en effet par leur tradition de course en montagne. Ils pratiquent de nos jours une religion qui est un syncrétisme de leur religion traditionnelle et du christianisme. Les Jésuites, chassés des colonies espagnoles en même temps que sur le vieux continent, ont laissé ici une empreinte forte. La fête traditionnelle (au cours de laquelle ils courent en poussant un caillou, par équipes, d'un village à l'autre au milieu des falaises et précipices, comme les fêtes chrétiennes (en particulier, la Semaine Sainte) commencent à attirer les touristes. Au début des années trente, en pleine vague surréaliste, Antonin Artaud a passé trois semaines chez les Tarahumaras, d'où il a rapporté des notes qui lui ont servi à écrire un petit opuscule dont les paradis artificiels de la montagne (en particulier, le peyofe) semblent avoir inspiré l'essentiel.

22 Le reste de la Sierra Madre occidentale n'a aucun équipement touristique, mais elle n'en comporte pas moins de nombreux sites et aspects attractifs.

Petite retenue d'eau dans la forêt de la Sierra de la Candela.

Des paysages de montagne tempérée

23 Du fait de la latitude subtropicale, les sommets de la Sierra Madre occidentale, qui ne dépassent pas 3 400 m, n'ont pas une altitude suffisante pour porter des neiges éternelles. Du reste, la saison des pluies étant l'été, les précipitations hivernales sont rares, sauf les années « chaudes » en terme de ENSO (El Niño), et ces dernières ne se prêtent pas non plus aux précipitations neigeuses. Quand elle se produit, la couverture neigeuse ne tient que quelques jours. Par contre, du fait de la clarté de l'atmosphère, le gel est fréquent et peut être assez profond ; il y a environ 100 jours de gel par an à 2 500 m d'altitude.

24 De fait, la Sierra Madre comporte ainsi plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés de forêts denses qui ne sont pas sans rappeler les forêts alpines, avec ces successions et alternances de pins, chênes, sapins, de variétés très différentes, adaptées à l'exposition, à

la sécheresse et au froid hivernal ; le relief, par contre, est plus proche de celui de l'Auvergne ou des Vosges sur le côté plateau (altiplano), mais franchement original côté *barrancas.*

Un décor de western : Durango, mythe du cinéma mexicain

25 Durango a longtemps été considérée comme la capitale du cinéma mexicain ; de fait, en même temps que le surréalisme, qui a connu son heure de gloire dans les arts mexicains (certains artistes étaient dans les années trente à cinquante très liés aux milieux intellectuels européens), le Mexique a eu jusqu'aux années soixante-dix une période de production cinématographique de grande renommée, qui s'est exportée dans les pays d'Amérique latine avec beaucoup de succès ; des films comiques (c'est la période de Cantinflas), des films romantiques (où excellait la belle Maria Felix, récemment décédée) et des westerns ou assimilés (des films de *pistoleros* ou de souvenirs révolutionnaires) ont remporté d'énormes succès commerciaux tout à fait mérités. Les Américains ont été attirés par ce savoir-faire autant que par les bas coûts de la main-d'œuvre artistique et surtout les décors naturels de la Sierra Madre, qui convenaient très bien au tournage des westerns. Durango a accueilli John Wayne, qui y a habité, et John Ford et d'autres producteurs ont collaboré à forger cet éphémère Hollywood latin. Il en reste peu de choses, sinon des décors de cinéma posés dans la nature, comme le village – habité – de Chupaderos, à 20 km au nord de la ville, ou le vaste décor en cours de dépeçage par le vent, la pluie et les habitants du coin, des *Maîtres de l'Ombre,* film retraçant l'épopée de la première bombe atomique américaine durant la guerre et censé se situer à Los Alamos.

Des villages à l'architecture coloniale, quelques haciendas, et des missions jésuites

26 Comme toute l'Amérique hispanique, la Sierra Madre occidentale a attiré les colons espagnols en quête de matières précieuses. De fait, les grandes villes sont situées sur le piedmont interne de la sierra.

27 Durango (800 000 habitants), capitale de l'État du même nom, localisée à 1 800 m au pied du dernier contrefort de la sierra, est une ville minière, dominée par le Cerro del Mercado complètement éventré par une mine de fer encore en activité. La ville se consacre de plus en plus à l'industrie, celle du bois en particulier (scieries, papeteries), mais c'est avant tout une capitale administrative provinciale qui garde un côté très « norteño », pour ne pas dire « ranchero » du fait de l'intense activité pastorale qui reste l'économie principale de sa région. Durango est dominée par une belle cathédrale construite dès la fin du XVI^{e} siècle et compte encore de nombreuses maisons de l'époque coloniale.

28 Hidalgo del Parral (150 000 habitants), où fut assassiné Pancho Villa en 1923, est devenu le principal centre de traitement du bois de l'État de Chihuahua, et tend à distancer Durango (elle draine l'exploitation du nord de cet État).

29 Chihuahua (1 500 000 habitants) est sans conteste la plus moderne et la plus active des villes du piedmont interne ; sa superbe cathédrale se dresse au milieu de quartiers de plus en plus modernes et les immeubles ainsi que les industries liées aux investissements venus du Nord tendent à supplanter les anciens quartiers de style hispanique.

30 Les villes de la plaine côtière sont complètement coupées autant topographiquement qu'économiquement de la Sierra Madre, dont elles se contentent de recevoir l'eau relativement abondante qui alimente les périmètres irrigués et a contribué à leur développement récent (Los Mochis, Culiacán, Hermosillo, Ciudad Obregón), sauf Mazatlán dont l'essor est dû au tourisme.

31 Dans la Sierra Madre elle-même, pas d'agglomération importante, mais un grand nombre de petits bourgs souvent nés il y a plusieurs siècles autour des mines (surtout dans les États de Durango, Zacatecas et le nord du Jalisco) ou de missions jésuites (surtout dans l'État de Chihuahua) d'abord destinées à sauver de l'exode et de l'esclavage les habitants des montagnes membres d'ethnies semi-nomades qui y ont trouvé refuge lors de la conquête espagnole (Tarahumaras, Tepehuanes et Huicholes essentiellement).

32 Les villes minières les plus dignes d'intérêt sont Santa Maria del Oro et Indé (celle-ci ressemble à une ville fantôme tant elle a dépéri depuis quelques décennies, suite à la fermeture des mines), ainsi que Santiago

33 Papasquiaro et Guanaceví dans l'État de Durango, et Batopilas au fond des gorges du même nom (État de Chihuahua). Mais de nombreux petits bourgs ont encore une vieille église ou une maison coloniale en ruine, qui témoignent de leur passé plus dynamique.

34 Au nord, ce sont les missions jésuites qui, comme en Basse-Californie, ont laissé les plus belles traces architecturales. Ces missionnaires ont pénétré la sierra dès le début du XVII^e^ siècle et y ont mené un travail d'évangélisation non exempt de risques, puisqu'ils durent s'interrompre pendant près de quarante ans suite à une importante rébellion en 1632 à Varohios.

35 Cependant, jusqu'à leur interdiction en 1767, et de nouveau au XX^e^ siècle, ils ont construit de nombreux édifices dignes d'intérêt, comme les églises de Balleza (la première construite, en 1614), Chinipas (1626), Guazapares (1626), Temoris (1677), Cajurichi (1688) ou encore Cusarare (1752) ou Satevó (1760) près de Batopilas. Une cinquantaine de temples encore debout sont signalés dans la Sierra Tarahumara.

36 Par ailleurs, sur le piedmont occidental, des villages ont gardé un caractère typiquement colonial comme Copalá, près de Concordia (arrière-pays de Mazatlán), ou encore des villages comme Topia et Canelas situés en amont de Culiacán ont bien plus de liens avec la sierra et Durango qu'avec la plaine dont ils sont coupés par des gorges difficilement franchissables.

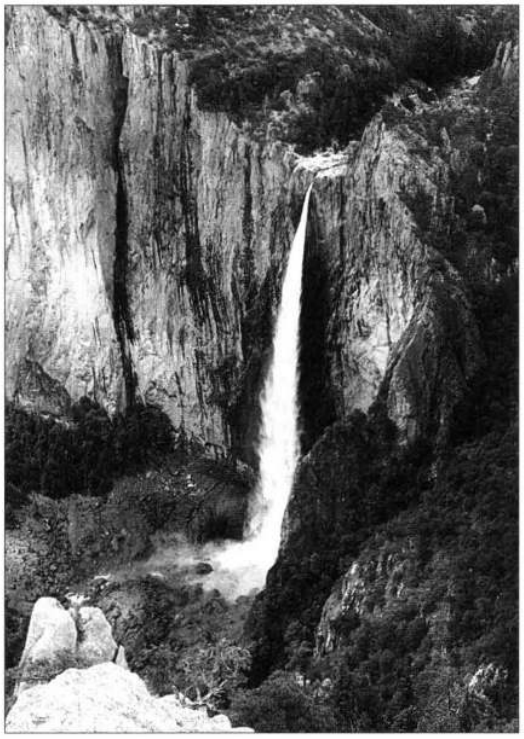
37 Enfin, des haciendas, dont la plupart ont été détruites ou sont tombées en ruine, ont participé à la colonisation économique de l'espace montagnard. Les plus importantes, encore une fois, se trouvent sur le piedmont oriental, où le contact montagne-hauts plateaux se prêtait bien à l'élevage bovin extensif. Ainsi dès la sortie de Durango ou de Parral, on trouve les restes de grands « *cascos* » (sièges) d'haciendas et parfois des églises qui les accompagnaient ; celle de Guatimapé (à 100 km au nord de Durango) est typique de ce genre de situation. Les plus grandes haciendas furent celles de Nahuerachi, au nord, près de Madera, de Sirupa et de Babicora en pays Tarahumar (cette dernière, à 60 km à l'est de Madera, était grande de 350 000 ha, et n'a été divisée qu'en 1952 ; elle est encore en assez bon état). Près de Tepehuanes (État de Durango), l'hacienda de El Ojito (35 000 ha) n'a été démembrée entièrement qu'en 1970, car elle appartenait au général Aguirre, un grand ami de Pancho Villa.

Champ de cosmos près de l'Hacienda El Ojito.

De nombreux autres centres d'intérêt

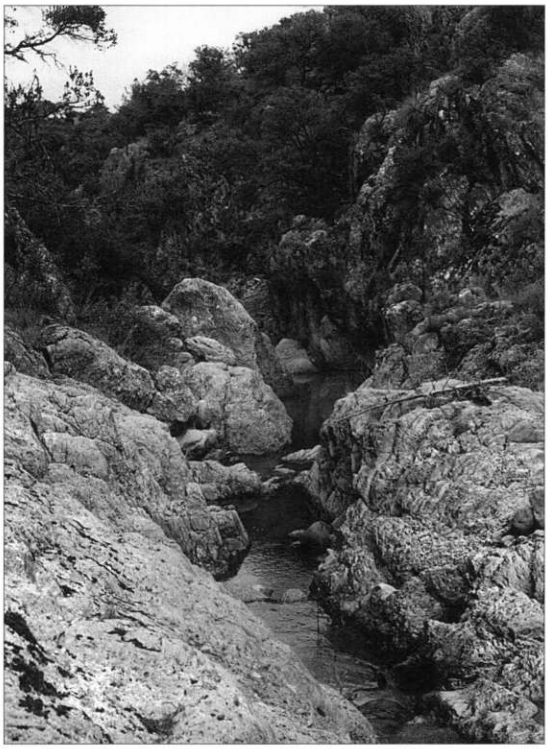
38 En fait, la Sierra Madre occidentale n'est pas encore ouverte au tourisme, et de nombreux sites méritent d'être découverts, même si pour l'instant aucune infrastructure ne permet

de s'y rendre ou de les visiter facilement, hormis quelques miradors et belvédères de la *barranca.*



La cascade de Basaseachic.

39 De nombreuses cascades permettent aux eaux abondantes (en saison des pluies) de la sierra de franchir les grands escarpements que constituent les différents affleurements rhyolithiques de la sierra. La plus connue est bien sûr celle de Basaseachic, au nord des *barrancas* (dans celle de Candameña) facilement accessible depuis le village du même nom, car celui-ci est situé sur la route goudronnée de Chihuahua à Hermosillo. Malgré ses 246 mètres, elle n'est pas la plus haute, puisque, proche d'elle dans le même canyon, se trouve la cascade de Pierra Volada, bien plus difficile à apercevoir, et qui n'a été découverte qu'en 1995 ; elle mesure 453 m de haut et n'atteint pas les débits de celle de Basaseachic. D'autres cascades coupent les cours des *barrancas* comme celles de Rukiraso et Cusárare (près de Creel) ou celle de Tonachic (près de Guachochic).

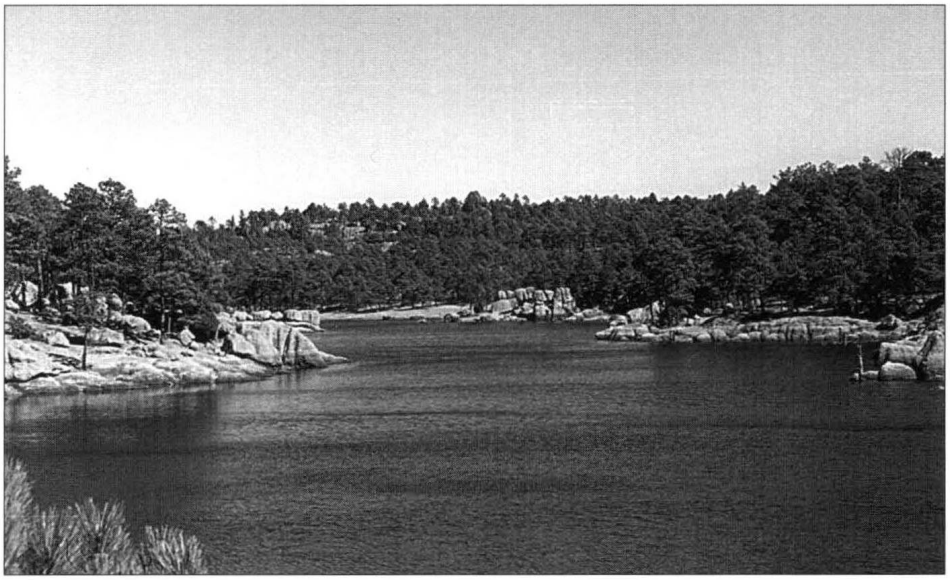


Petit ruisseau au-dessus du village de Boleras.

40 Bien plus au sud, sur la route de Durango à Mazatlán, la petite cascade de Mexiquillo, à 2 km de La Ciudad, le dernier village du plateau avant que la route ne plonge sur le versant Pacifique, constitue une espèce de voile de mariée. De fait, dans l'immense Mexique semi-aride du Nord, la Sierra Madre et ses nombreux points d'eau sont très attractifs pour les pêcheurs et les randonneurs.

41 La Sierra Madre recèle peu de lacs, du fait de sa constitution géologique et morphologique (pas de volcanisme récent, pas de glaciation importante) ; le seul lac intéressant est celui d'Arareko, près de Creel, qui est un site connu et fréquenté par les Tarahumaras depuis des siècles ; il commence à être équipé d'hébergements touristiques. De nombreux petits lacs souvent temporaires parsèment les quelques grandes dépressions fermées situées sur les secteurs les plus hauts de la Sierra Madre.

42 Les sources thermales sont à l'inverse nombreuses du fait de l'histoire géologique de la sierra. Des sites sont équipés pour recevoir les touristes, en particulier La Joya, près de San Francisco de Mezquital, au sud de Durango. D'autres sont aménagés pour les bains villageois, comme à El Zape ou à J.M.Morelos, entre Tepehuanes et Guanacevi (Durango) ; à côté de Durango, les habitants de cette ville peuvent profiter des sources chaudes du canyon du río Chico, qui franchit là les derniers reliefs de la Sierra Madre avant d'entrer dans la plaine. Plus au nord, la source thermale de Rekowara, dans le canyon de Tararecua, est la plus connue des Barrancas del Cobre.



Le lac d'Arareko.

43 Enfin, et parce que la vie rurale est encore très active malgré l'urbanisation et surtout malgré un très fort exode vers les États-Unis, il existe un folklore local, riche du mélange des modes de vie ancestraux des Raramuris (courses à pied, rites religieux ou profanes), des éleveurs (rodéos, courses de chevaux clandestines), des bûcherons et des villageois. On trouve aussi dans cette région le fameux fromage ranchero, très recherché en ville et concurrencé par les productions des Mennonites, membres d'une secte arrivée là au XIX^{e} siècle et à qui les gouverneurs des États de Zacatecas, Durango et Chihuahua ont volontiers donné à coloniser des terres jusque-là en grande partie vierges du piedmont oriental de la Sierra Madre (secteurs de Juan Aldama – Zacatecas –, Nuevo Ideal - Durango - et Cuauhtemoc – Chihuahua –).

44 Promouvoir l'écotourisme peut être une opportunité dans ces régions de montagne où les paysages ont déjà été considérablement rabotés ; c'est une alternative à la monoproduction des bovins, un moyen de préserver celle-ci tout en créant des activités pour les habitants de la Sierra Madre. Par ailleurs, cette anticipation sur le développement rural durable nous donne un avant-goût de gestion patrimoniale de l'espace.

BIBLIOGRAPHIE

Références

BARRAL H., ANAYA E., 1995 – La ganadería y su manejo en relation con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México. Publication Orstom-Inifap, Gômez Palacio, Dgo, Mexique, n° 5, 78 p.

Coordinación General de Turismo, 1995 – *Conozca Chihuahua, n° 1.* Chihuahua, Mexique, Ed. Coord. Gen. Del Turismo del Gobierno del Estado de Chihuahua, 40 p.

Guia México Desconocido, 1996 – *Barrancas del Cobre.* México n° 26, Ed. Jilguero, 72 p.

AUTEUR

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

Eau et espace à Valle de Bravo

La bataille pour l'eau

Luc Descroix, Michel Esteves, David Viramontes, Céline Duwig, Jean-Marc Lapetite et Technicien hydrologue à l'IRD.

1 Le sud et le centre du Mexique sont beaucoup plus favorisés que le nord en terme de bilan hydrique. On considère qu'ils regroupent 46 % des terres arables du pays, mais disposent de 93 % des ressources en eau. Cependant, c'est une région qui est aussi bien plus peuplée, du fait de l'ancienneté de la présence des cultures indiennes, et aussi du fait de la fertilité de ses sols (ce fait et l'ancienneté des civilisations ne sont probablement pas étrangers l'un à l'autre) ; les sols volcaniques sont connus en effet pour leur richesse ; par contre, ils sont aussi fragiles et très sensibles à l'érosion.

2 On se propose d'examiner ici le rapport entre la gestion de l'eau et celle de l'espace à travers une autre région du Mexique, celle du haut basin du Cutzamala, situé à 150 km environ à l'ouest de la ville de México.

3 En effet, si deux des trois problèmes hydrologiques « majeurs » que connaît le Mexique de nos jours concernent avant tout le nord (cf. « L'eau, agent économique et enjeu politique », p. 249), le sud n'en est pas exempt, comme en témoigne malheureusement la disparition prochaine du lac de Chapala.

Petite géopolitique des eaux au Mexique

4 Effectivement, les autorités mexicaines ont décrété en l'an 2001 qu'il y avait trois urgences nationales en matière hydrologique :

- la première est le conflit au sujet du partage des eaux du río Grande/río Bravo (cf. « L'eau, agent économique et enjeu politique », p. 249) qui envenime les relations entre les deux grands voisins et représente la parfaite illustration à la fois du rapport de force normal entre un pays du Nord et du Sud, de l'échange inégal, de l'arrogance de la seule superpuissance du moment, de ce qu'est l'absence de solidarité amont-aval, des conflits d'usage et de la raison du plus fort ;

- la deuxième concerne le lac de Chapala, qui est en train de s'assécher une bonne fois pour toutes : il pourrait disparaître au milieu de la décennie 2000, ce dont se réjouissent presque les propriétaires terriens qui ont les moyens d'en acheter le fond et de le mettre en valeur quand il sera asséché. La disparition progressive de cette lagune est due à la surconsommation d'eau dans le bassin : l'extrémité amont du bassin du rio Lerma sert de plus en plus à alimenter Mexico en eau, et le bassin comporte les meilleures terres arables du Mexique. On y a peu à peu installé l'irrigation pour accroître les rendements et diversifier les cultures. Par ailleurs, plus de la moitié du bassin et de cette zone de grande culture est incluse dans l'État de Guanajuato, dont le gouverneur de 1994 à 2000 n'était autre que l'actuel président - libéral - de la République mexicaine, Vicente Fox, qui a veillé et continue à le faire, sur l'intérêt des grands cultivateurs. L'absence de concertation amont/aval et l'égoïsme de chaque acteur ont tué la lagune de Chapala ;
- la troisième urgence nationale est la Laguna, périmètre irrigué de 160 000 ha situé dans le centre-nord du pays, au sud du désert de Chihuahua, et qui est sinistré depuis une dizaine d'années du fait de la sécheresse récurrente (cf. « L'eau, agent économique et enjeu politique », p. 249). Dans ce dernier cas n'apparaît aucun problème de solidarité amont-aval, sinon pour le devenir des ressources ; les paysans de la Laguna ont causé eux-mêmes leur perte en surexploitant la ressource plus de cinquante ans durant.

5 Il peut paraître étonnant de ne pas voir figurer dans cette liste de priorités absolues le problème de l'alimentation en eau de la ville de Mexico. Cet approvisionnement étant en fait de plus en plus épineux, s'il n'est pas dans les trois urgences, c'est que celles-ci relèvent vraiment du désespoir de l'hydrologue ! En effet, la ville de Mexico est un bon exemple à la fois de stress hydrique, tant la ressource est surconsommée dans son bassin naturel (situé en altitude mais en position d'abri topographique), et d'absence de solidarité amont-aval. La ville ayant épuisé toutes les ressources proches et situées en amont ou dans les nappes du plateau de l'Anahuac, elle va depuis une vingtaine d'années, chercher l'eau plus bas, sur les versants mieux arrosés de l'Eje Volcanico Central, à l'ouest de la ville. Dans le bassin du Cutzamala, les paysans de plus en plus nombreux et avides de terres se voient déposséder d'une ressource qui leur permettait d'accroître leurs rendements, de s'assurer de bonnes récoltes ou de pratiquer des cultures plus rémunératrices qu'auparavant, pour alimenter les marchés urbains proches.

6 Cet exemple souligne aussi l'importance de préserver la ressource en amont tant en qualité qu'en quantité, pour pérenniser ses usages. Dans le contexte de changement climatique actuel, des modifications de couverture végétale ou d'usages des sols en amont, des détournements d'eau d'un bassin à un autre, des surpompages des nappes de piedmont ne peuvent-ils pas affecter durablement le bilan de l'eau d'un bassin, remettre en question tout le fonctionnement de systèmes hydrauliques parfois séculaires en aval ou compromettre la simple survie d'un périmètre irrigué ou la gestion d'une nappe alluviale de la plaine aval ?

7 L'antériorité, le fait d'être en amont, d'avoir des besoins en eau supérieurs à cause d'une population plus nombreuse, sont toutes des raisons tout à fait honnêtes d'utiliser l'eau qui passe chez soi ; mais comme la liberté des uns s'arrête là où commence celle des autres, il est important d'apprendre à gérer la ressource dans la plus grande intelligence, dans le cadre d'un bassin, et si nécessaire en signant des traités clairs et ne prêtant pas à confusion entre États.

8 De même que la limite géographique du bassin, il est primordial que soient pris en compte tous les usages de l'eau, ceux qui ne font que prélever momentanément sans

altérer (en principe) la qualité de l'eau, ceux qui la réchauffent, ceux qui la polluent, ceux qui s'en servent comme agent de transport ou aire de loisir, ceux qui la consomment partiellement ou intégralement (et en premier lieu bien sûr l'irrigation, de loin le premier usage), etc. Tous les usagers doivent chercher à gérer au mieux la ressource, à en garantir la qualité et à en prélever les plus petites quantités possibles, de manière à préserver la ressource et l'environnement.

La Culture ou les cultures

9 Avant d'évoquer le bassin du Cutzamala, un dernier élément est à prendre en considération. Le Mexique est un État nation solide et démocratique (la guerilla chiapanèque est *a contrario* une preuve de l'existence d'un vaste espace de dialogue démocratique, malgré la répression dont elle a fait l'objet directement et par l'intermédiaire des églises néoconservatrices exportées par le voisin du Nord). Ce pays est une société indigène, métisse, créole, latine tout à la fois, et aussi bien sûr l'intime mélange de toutes ces cultures ; cependant, il y a tout de même, en plus du clivage très fort entre les 10-20 % de la population qui a intégré le « marché » et le reste du pays, une cassure culturelle fortement déterminée par l'espace, l'histoire et les ressources, entre un Nord-Mexique aride, semi-aride, et peu peuplé et le Sud occupé depuis des millénaires. Le Nord aussi avait ces ethnies indiennes. Mais, essentiellement nomades, celles-ci ont peu marqué le paysage et ont été complètement marginalisées par la colonisation rurale au XX[e]. Il faut de ce fait opposer :

- ce Nord où les paysans comme ceux de l'Ouest américain, ont une mentalité de pionnier, sont prêts à tout pour pousser la frontière, et se soucient peu du lendemain et de la pérennisation des ressources naturelles comme de la durabilité de leur système de production ;
- et le Sud, pays de « vieilles » civilisations indiennes, où l'agriculture se pratique depuis des millénaires (POSTEL, 1999 ; DESCROIX et LASSERRE, 2003) et a fait preuve de son adaptation aux milieux de montagne en assurant de bonnes récoltes dans ces milieux fragiles, depuis très longtemps.

10 Après avoir, dans cet ouvrage, analysé les rapports homme/nature sous un système minier que l'on n'essaie que depuis peu de faire perdurer, dans le Nord, il est intéressant de voir comment l'irruption de besoins et de moyens nouveaux peut menacer les régions de vieille culture du sud du Mexique. Les habitants de cette région, bien plus peuplée, doivent tant bien que mal adapter la très forte croissance démographique qu'ils connaissent depuis quelques décennies, à un contexte de pression extrême sur les ressources (eau, forêt, espaces de loisirs, etc.) imposé par la proximité de l'une des plus grandes et plus exubérantes villes du monde.

Historique de l'alimentation en eau de México

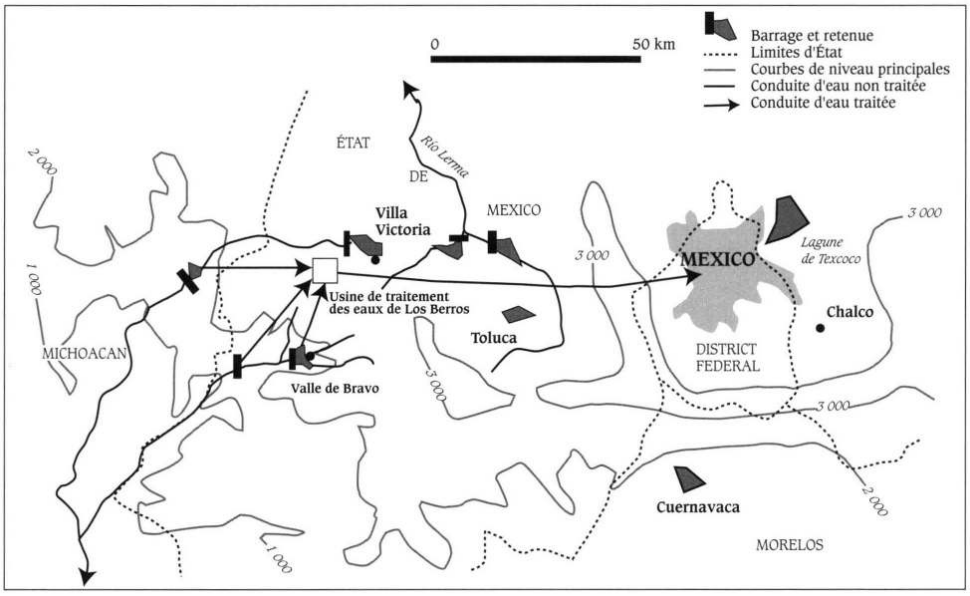
11 La vallée de México rassemble sur 4 000 km^2 situés à 2 240 m d'altitude une vingtaine de millions d'habitants. L'alimentation en eau de ces habitants et des activités qu'ils développent constitue un défi permanent, étant donné que la croissance démographique est forte (2-3 % par an), soit un demi-million d'habitants de plus chaque année.

12 De plus, il s'agit aussi de réduire le surpompage de l'aquifère qui est une des sources d'approvisionnement depuis plus de cinquante ans. Le site de la ville se prête fort peu à la constitution de réserves d'eau : la zone urbanisée occupe tout le fond de la dépression et l'ancien lac de Tenochtitlán, qui bordait en 1520 la plus grande ville du monde, déjà peuplée de plus d'un million d'habitants. De ce fait, les 7 milliards de m^3 d'eau que reçoit chaque année le bassin constituent aussi un défi en terme de gestion des crues. 80 % de ce volume est évapotranspiré, 11 % s'infiltre, le reste s'écoule et doit donc être évacué par pompage de la dépression localement endoréique et globalement très plane sur laquelle s'est installée la ville. La recharge naturelle de la nappe est donc de 24 m^3/s.

13 Or le pompage a commencé à aggraver les affaissements de terrain liés aux tremblements de terre, dès les années 1930 ; il n'est que de visiter le centre historique de la ville pour en percevoir des signes nets sur les édifices anciens : partie droite de la cathédrale de guingois, Palacio de Bellas Artes dont le socle et le perron forment un entonnoir autour du bâtiment, églises et immeubles penchés, etc.

14 Dès les années cinquante, en plus du pompage, toutes les eaux de surface du bassin étaient exploitées. On a alors créé le « sistema Lerma » dans les années 1960, afin de capter 14 m^3/s dans le haut bassin de cette rivière, initiant le problème de déficit qui est à l'origine de l'actuelle disparition du lac de Chapala. La surexploitation du haut Lerma est manifeste dès 1972, ce qui a poussé à réaliser des études pour aller chercher l'eau encore plus loin. Dans le même temps, le pompage dans les nappes de la vallée de Mexico atteignait plus de 50 m^3/s, soit plus du double de la recharge naturelle, accélérant l'enfoncement des terrains par abaissement du niveau phréatique.

Fig. 55 – Situation du sistema Cutzamala.



15 Durant cette même période d'expansion rapide, la ville a eu besoin de se fournir en électricité, d'où l'installation d'un vaste complexe sous le président Miguel Alemán (1940-1946), qui porte son nom « sistema Miguel Alemán ». Celui-ci, constitué d'une dizaine de barrages de tailles diverses, turbinait les eaux du haut bassin du río Cutzamala et de ses affluents. Ce bassin est situé immédiatement à l'ouest du haut bassin du río Lerma, à 150 km environ à l'ouest de la capitale (fig. 55).

16 Ce système a été peu à peu démantelé et transformé, afin de fournir des quantités croissantes d'eau de bonne qualité à la ville de México ; la fourniture de courant électrique est dans le même temps devenue dérisoire (celle-ci a été remplacée par la production de centrales thermiques, le Mexique étant un des principaux producteurs mondiaux de pétrole).

Le sistema Cutzamala

17 Le sistema Cutzamala a été réalisé en plusieurs tranches :

- la première tranche a consisté à capter en 1982, les eaux du barrage de Villa Victoria (qui fait partie, comme presque tous les autres, du sistema Miguel Alemán), et à les traiter à l'usine de Los Berros afin de les rendre potables ; ensuite, par des stations de pompage, il faut faire monter 4 m^3/s de 174 m afin de pouvoir les acheminer par gravité jusqu'à la vallée de Mexico, par un aqueduc de 77 km rejoignant le système existant de captage du haut rio Lerma ;
- la deuxième tranche, achevée en 1985, a permis de tirer profit de 6 m^3/s supplémentaires provenant du barrage de Valle de Bravo ; cela a nécessité la réalisation d'une prouesse technique, celle de faire monter ce débit de 822 m de dénivelée entre ledit barrage et l'usine de Los Berros, située à 29 km de là, et agrandie pour l'occasion. La puissance de la station de pompage (voir première tranche ci-dessus) relevant l'eau de la station de traitement de Los Berros vers Mexico a également dû être augmentée. La puissance des pompes installées pour cette nouvelle section Valle de Bravo-Los Berros atteint 22 000 chevaux ;
- la troisième tranche a été mise en service en 1993 : il s'agissait de capter 9 m^3/s provenant des barrages Chilesdo et Colorines. Ce dernier, le plus bas du système (1 600 m), reçoit lui-même les eaux de trois barrages situés plus à l'ouest sur les affluents de rive droite du rio Cutzamala ; ce sous-ensemble fournit 8 m^3/s qu'il s'agit de faire monter de 1 000 m jusqu'à

l'usine de Los Berros. Comme pour les tranches précédentes, il a fallu encore augmenter le débit à remonter de l'usine de traitement de Los Berros vers Mexico (fig. 56).

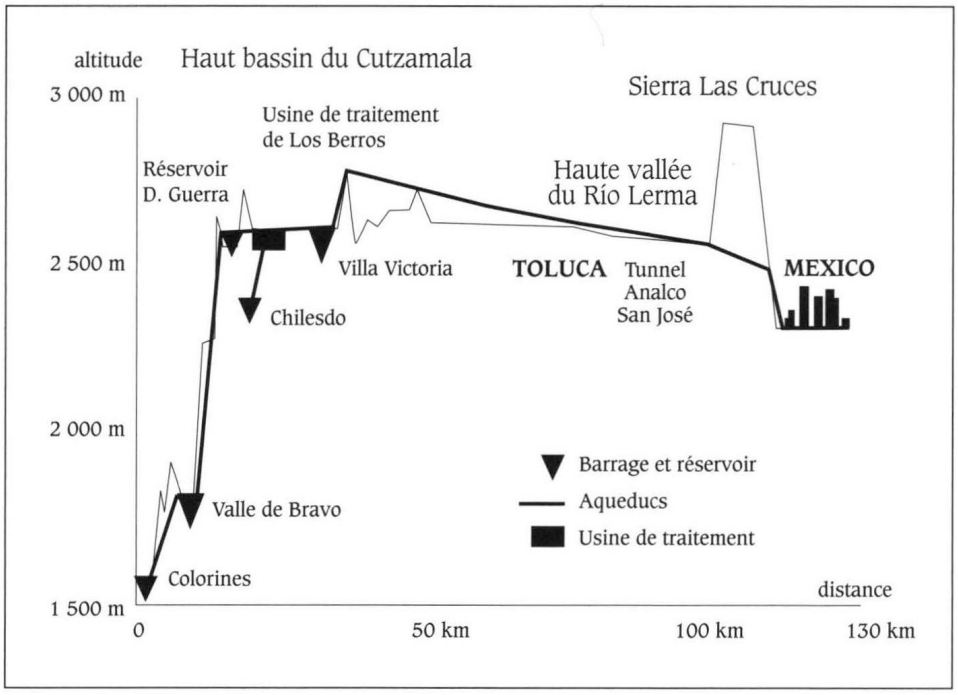


Fig. 56 – Coupe du sistema Cutzamala.

Et l'avenir ?

18 L'ensemble de ce système d'approvisionnement est impressionnant en termes de travaux de génie civil, mais l'enjeu a été à la portée des ingénieurs mexicains qui ont su mettre leur savoir-faire au service de la collectivité et de la forte demande en eau.Alors qu'en sera-t-il quand l'approvisionnement sera à nouveau insuffisant ? En fait, il l'est déjà, depuis la mise en service de ces tranches successives, car l'addition de ces 19 m^3/s au total n'a pas suffi à faire baisser le pompage (et donc le surpompage) dans les nappes de la ville. Il existe donc toujours un déficit de l'ordre de 30 m^3/s si l'on veut vraiment maintenir le système en équilibre (c'est-à-dire en assurer la durabilité). Et les progrès à faire en terme d'économie d'eau ont été en grande partie déjà réalisés. En effet, les incitations aux économies d'eau domestiques sont très fortes, le travail d'éducation à la citoyenneté est très efficace et les enfants comme les adultes ont conscience de la fragilité de la ressource et agissent globalement en conséquence ; les industriels sont également en train d'équiper leurs installations afin de consommer et de polluer au minimum les eaux de surface comme celles de profondeur, de recycler au maximum. La multinationale qui a en charge la distribution d'eau a réduit en cinq ans les pertes en lignes de 40 % à 33 %, et l'effort se poursuit.

Conflits entre les usages de l'eau

19 Les gestionnaires de l'eau de la ville de Mexico ont réalisé un exploit assez unique : changer complètement l'usage principal d'un bassin de 2 000 km^2, d'une fonction

énergétique à un usage d'approvisionnement en eau, et cela en une quinzaine d'années, sans conflit majeur et en effectuant au passage des prouesses de génie civil.

20 Ceci étant, on entre de fait en plein dans la logique des conflits d'usage pour l'eau. Le conflit électricité/eau potable a pu être éludé, le Mexique étant un gros producteur d'énergie fossile. Mais l'eau turbinée par les centrales était restituée au réseau hydrographique, ce qui n'est bien sûr pas le cas des eaux transférées du haut Cutzamala (et du haut Lerma) vers le bassin de l'Anahuac.

21 Or, le haut Cutzamala est une riche région agricole, comptant un grand nombre de petites et grandes propriétés, et surtout de communautés rurales et d'*ejidos.* De ce fait, l'eau qu'on attribue depuis vingt ans à la ville de Mexico est celle que pourrait utiliser cette activité agricole afin d'accroître ses rendements. Cette eau était du reste auparavant en grande partie utilisée pour l'irrigation. Celle-ci est devenue pratiquement impossible et les dirigeants locaux de la *Comisión Nacional del Agua* du district de Valle de Bravo ont été poursuivis en justice en 2001, car, devant la pression exercée par les usagers locaux, ils avaient vendu des droits d'eau illégaux à des agriculteurs.

22 En fait, devant l'urgence des besoins en eau de la capitale, on n'a pas vraiment demandé aux paysans du bassin s'ils étaient d'accord pour affecter leur eau aux besoins urbains. Il faut dire qu'avec une pluviométrie de 1 200 mm en moyenne, ils peuvent paraître privilégiés à l'échelle du Mexique. Mais la région est assez densément peuplée, et les usages de l'eau sont nombreux : irrigation, pêche, loisirs (golfs et aires vertes de Valle de Bravo, qui est la zone de récréation des classes aisées de Mexico). Il faut ajouter que le niveau du lac doit être maintenu constant puisque de nombreuses bases nautiques entourent le plan d'eau.

Comment pérenniser la ressource ?

23 On a vu que la fourniture du système Cutzamala ne permettait même pas de réduire le surpompage de la nappe ; il faut dire qu'il n'alimente qu'à hauteur de 25 % le marché de l'eau de la ville. Mais au moins, peut-on s'assurer que cette ressource va perdurer ?

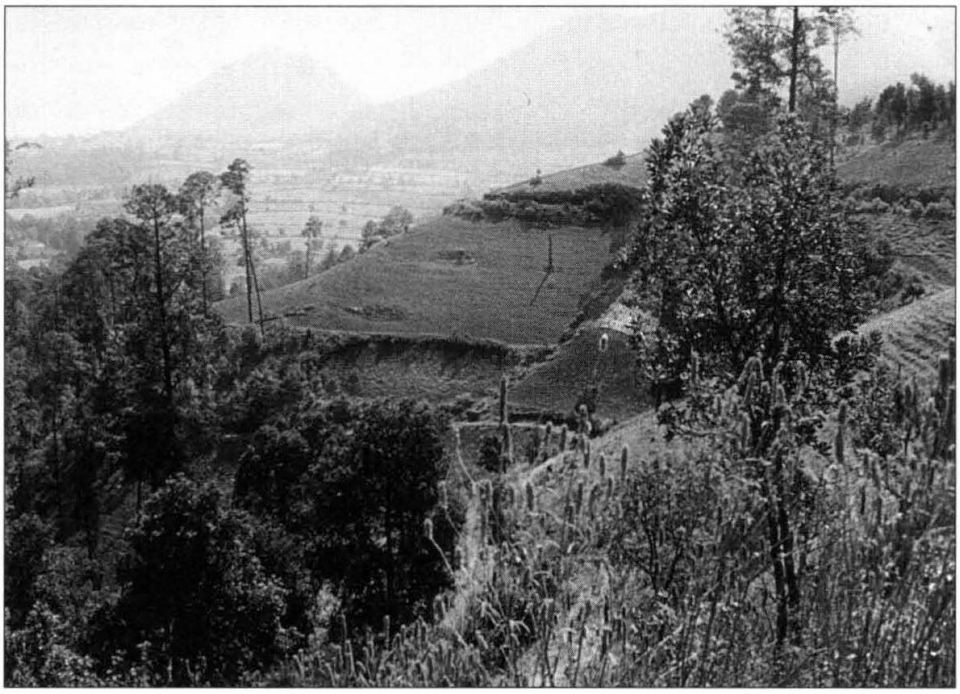
24 Le problème majeur, en dehors de la pression sur la ressource en eau, est celui de la pression pour la terre. Tout le Mexique central est très peuplé, et cet axe volcanique comportant les meilleurs sols en terme de fertilité, les andosols, ne fait pas exception, bien au contraire ; comme dans beaucoup de pays volcaniques, les montagnes sont ici cultivées depuis des siècles, voire des millénaires (dans la vallée de Tehuacán, État de Oaxaca, par exemple, cf. POSTEL, 1999).

25 On assiste en effet, depuis quelques décennies, à une accentuation de la pression foncière, liée à la croissance démographique et à celle, parallèle, de la demande en produits agricoles. Cela se traduit, logiquement, par des défrichements de terrains de plus en plus pentus (les moins en pente ayant été exploités auparavant). Comme la loi fédérale mexicaine prohibe pratiquement l'abattage des arbres, les paysans, soucieux par ailleurs de ne pas détruire une ressource dont ils savent l'importance en terme de protection des sols et des eaux, utilisent des stratagèmes qui viennent à bout des arbres sans les couper, en les tuant à petit feu ou en les « étranglant » littéralement au moyen de fils de fer barbelés autour des troncs.

26 Quoi qu'il en soit, cette faim de terre se traduit par le recul de la forêt, celle-ci étant de plus en plus reléguée sur les secteurs les plus élevés où l'agriculture est impossible (sur

les flancs du Nevado de Toluca, par exemple) ou sur les seuls versants les plus pentus, où le labour à l'aide d'animaux de trait serait même impossible. Les forêts sont de plus en plus remplacées par des zones de cultures, ce qui ne manque pas d'entraîner des conséquences importantes en terme hydrologique.

27 Trois séries d'impacts sont déjà notables et malheureusement appelés à croître :



Champs cultivés sur fortes pentes : La Loma de Amanalco, haut bassin du Cutzamala, État de México.

- l'érosion des sols : les andosols sont, on l'a vu extrêmement fertiles mais aussi très fragiles ; ils ont la faculté de conserver longtemps l'humidité propice aux cultures (fortes valeurs de capacité au champ et de point de flétrissement). Par contre, leur dessiccation conduit à la perte totale de leur cohésion, et devenus pulvérulents, ils sont très fortement soumis à l'érosion éolienne comme à l'érosion hydrique ;
- l'agriculture remplace la forêt, ce qui fait que les eaux de ruissellement et d'infiltration sont de plus en plus chargées en intrants agricoles non consommés : engrais, nitrates, produits phytosanitaires. Cette situation nuit à terme à la qualité des eaux nécessaires à une agglomération et peut entraîner des risques d'eutrophisation des lacs de retenue ;
- les changements d'usage des sols peuvent conduire à une évolution des régimes des cours d'eau, de leur régularité, voire de leur coefficient d'écoulement, c'est-à-dire de leur capacité à fournir des eaux à leur exutoire. De fait, on a noté une nette diminution des apports naturels dans le bassin entre les années 1950-1960 et les années 1990 (– 40 %). Cela pourrait être dû aux ponctions réalisées par l'agriculture et la micro-irrigation, mais aussi aux déboisements et autres défrichements opérés en grand nombre dans le bassin.

28 Les paysans de Valle de Bravo sont tout à fait conscients de ces problèmes et des risques sur la durabilité de leur système de culture, mais leur production est le plus souvent destinée à l'autoconsommation, et ce qu'ils vendent sur le marché leur sert à couvrir les dépenses indispensables. Ils sont du reste très réceptifs aux consignes données par les autorités en charge de l'eau et de l'agriculture afin de préserver les champs de l'érosion, et de tradition, ils savent très bien qu'il faut labourer sur les lignes de niveau et disposer

tous les 10 ou 20 m dans la pente, une ligne de « magueys », ces agaves énormes si typiques des montagnes du centre du Mexique. Mais la pression démographique est l'élément clé, incontournable. Beaucoup d'agro-systèmes au monde ont un jour basculé par l'inadaptation de leurs structures à un changement de ce type. Il faut espérer que dans ce cas, les mesures conseillées seront appliquées, et à même de garantir la fertilité des sols comme la durabilité des ressources en eau.

Des recherches à approfondir : le programme HVA

29 L'acuité des problèmes posés dans le haut bassin du Cutzamala en termes de conflits d'usage et de conflits pour la ressource eau et l'espace, justifie la poursuite des études dans cette région. C'est l'objectif d'un programme de recherche mené conjointement par l'équipe « Hydrologie des versants agricoles » de l'IRD, l'équipe « Manejo de cuenca » de l'Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, basé à Cuernavaca dans l'État de Morelos, et le Laboratorio de fertilidad de suelos du Colegio de Postgraduados de Montecillo (État de México).

30 Ce programme se propose de répondre aux questions scientifiques suivantes :

- quelles sont les conséquences hydrologiques des changements intervenus ces dernières décennies, dans l'usage des sols, tant en terme de volumes d'eau qu'en terme de qualité ?
- quelles sont les solutions à entrevoir pour espérer assurer la durabilité de l'agriculture dans le Valle de Bravo ?
- comment concilier cette activité et celles, en plein développement, liées à la proximité de la capitale (loisirs aquatiques, pêche à la truite, etc.), avec la fourniture d'une eau indispensable au maintien de la population et à la survie de l'économie de l'aire métropolitaine ?

31 Des recherches expérimentales, menées en particulier sur le petit bassin de La Loma de Amanalco (52 ha) doivent permettre d'apporter des résultats à ces questions, et de constituer une base de données et une modélisation des flux. Cela dans le but de fournir aux gestionnaires de l'eau et aux aménagistes des outils d'aide à la décision indispensables au devenir des sociétés en développement.

BIBLIOGRAPHIE

Références

DESCROIX L., LASSERRE F., 2003 – *L'eau dans tous ses États : Chine, Australie, Sénégal, États-Unis, Mexique, Moyen-Orient.* Paris, L'Harmattan, 350 p.

LASSERRE F., DESCROIX L., 2003 – *Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitique.* Paris, L'Harmattan, 280 p.

POSTEL S., 1999 – *Pillar of sand. Can the irrigation miracle last ?* New York, Worldwatch book, Norton, 312p.

AUTEURS

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

MICHEL ESTEVES

Hydrologue, chercheur à l'IRD.

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

CÉLINE DUWIG

Hydrologue, chercheur à l'IRD, en poste à México.

Conclusion

Une région à construire, un territoire et des ressources à préserver

Luc Descroix, David Viramontes et José Luis Gonzalez Barrios

Vers une gestion partagée et raisonnée des ressources eau-sol-végétation

1 Les recherches effectuées sur les modifications des conditions hydrologiques des bassins liées aux changements d'usage des sols sont de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que l'on se rend compte des impacts réels que ces changements ont sur la ressource elle-même. La Sierra Madre n'est qu'un exemple parmi d'autres, où un massif montagneux sert de « château d'eau » aux régions qu'il domine. Une grande partie des régions arides de la Planète sont dans le même cas ; or, en montagne plus qu'ailleurs, les conditions de surface du sol influent énormément sur le devenir de l'eau, sur la part de celle-ci qui va s'infiltrer, ruisseler, s'évaporer...

2 Quoi qu'il en soit, les travaux qui sont présentés dans ce recueil montrent l'intérêt de préserver les forêts et les pâturages, afin de protéger les sols contre la dégradation à laquelle ils sont soumis dès lors qu'ils ne sont plus couverts de végétation. Ils montrent aussi que c'est de la préservation des sols que dépend l'avenir des ressources en eau. En faisant abstraction du fait que les forêts influent peut-être sur la répartition et la quantité des précipitations, il a été démontré que la dégradation de la végétation conduit vite à des modifications des états de surface, lesquelles à leur tour provoquent une évolution des régimes d'écoulement. *Le devenir d'une goutte d'eau tombant à la surface du sol dépend en premier lieu de la présence ou non d'une végétation, d'un système racinaire, d'un horizon superficiel aéré et structuré.* Le surpâturage et localement le déboisement entraînent un accroissement de la pierrosité, l'extension des aires de sol nu, l'encroûtement de la surface du sol, la croissance des biodermes (croûte algale fréquente en milieu semi-aride), un tassement du sol et une augmentation de sa densité, avec comme conséquences une diminution de sa conductivité hydraulique, de ses capacités d'infiltration et une aggravation du ruissellement et des phénomènes d'érosion laminaire et linéaire.

3 La conséquence de cette dégradation à l'échelle locale est drastique et ruissellement et érosion augmentent dans des proportions très significatives. A l'échelle des bassins versants, VIRAMONTES (2000) a montré que le changement d'usage des sols provoquait aussi une évolution dans les régimes des cours d'eau pour des bassins versants de l'ordre de 5 000 km^2. Les travaux de recherche réalisés dans la Sierra Madre ont donc montré l'intérêt de prévoir une gestion patrimoniale à la fois de l'espace et des eaux. En effet, c'est l'ensemble du bassin versant qui réagit aux changements d'usage des sols, et une bonne gestion des eaux ne peut plus de nos jours se concevoir sans un aménagement du territoire à l'échelle de la région naturelle, sans prendre en compte l'ensemble du bassin versant. Cela sous-entend que l'on va prendre en considération tous les *usagers de l'eau* et tous les *usagers de l'espace* pour élaborer un scénario de mise en valeur qui préserve au mieux les intérêts des producteurs, tout en permettant de maintenir cette production.

4 Donc plus que jamais, il faut considérer les changements d'usages des sols dans les bassins amont dans la perspective des impacts que cela pourra avoir en aval. Les recherches qui ont été menées conjointement par le Cenid Raspa et l'IRD dans la Sierra Madre ont montré l'impact du surpâturage, et secondairement, des déboisements, dans le bilan de la ressource en eau. Il est par ailleurs possible que la dégradation de la couverture végétale puisse par rétroaction influencer la répartition spatiale des précipitations ; des recherches sont en cours au Sahel.

5 Ces travaux ont pu aider à la prise de conscience de cet élément primordial pour une gestion raisonnée des ressources en eau.

6 Ainsi, la *Cruzada para los bosques y el agua* (croisade pour les forêts et l'eau) a amené au rang de priorité nationale la conservation des milieux et des ressources des zones de montagne du Mexique. S'il est vrai qu'il y a culturellement deux Mexique, l'un du sud, aux civilisations multi-millénaires et où la pression sur l'espace menace des agro-systèmes anciens qui avaient réussi à préserver les forêts sur les pentes, et l'autre au nord, bien plus sauvage et où l'exploitation minière de l'espace est en train d'épuiser les forêts à grande vitesse, l'un et l'autre ne font qu'un face à la déforestation : ils prennent actuellement conscience de l'impérieuse nécessité de préserver les milieux montagnards, ou d'y maintenir les activités rurales mais tout en préservant les ressources, c'est-à-dire les forêts qui sont garantes de l'avenir des sols et des ressources en eau.

La spécificité de la Sierra Madre occidentale

7 Dans cette optique, la Sierra Madre occidentale est une des régions-clés pour l'avenir du pays : véritable château d'eau du Nord, elle est la montagne au milieu des déserts, la source de tous les écoulements, le plus grand massif forestier du pays, mais aussi une région vide. Les centres urbains sont dynamisés par l'exploitation des ressources en bois, et localement par les mines (l'État de Durango reste le premier pour la production d'or et de métaux rares, le second pour l'argent) ou par une spéculation agricole (les fromageries mennonites, les pommes de Chihuahua ou Canatlán). Les zones rurales, essentiellement consacrées à l'élevage naisseur bovin extensif, se vident très vite. En effet, les jeunes sont attirés par les États-Unis et certaines communautés et *ejidos* se sont complètement vidés au cours de la dernière décennie. Le nombre de maisons abandonnées croît rapidement et témoigne de l'importance de cet exode. L'abolition de la Réforme agraire a simultanément accéléré l'émigration, provoqué un agrandissement et une sélection

notoires des exploitations agricoles, et accru le niveau et la qualité de vie des rares habitants restés sur place.

8 Cependant, on s'aperçoit que la Sierra Madre est un milieu forcément spécifique. Elle diffère beaucoup par ses paysages évoquant localement les latitudes tempérées, du fait de l'altitude, des paysages désolés du Bolsón de Mapimi (dépressions fermées du sud du désert de Chihuahua) et des déserts côtiers du Sonora et de Basse-Californie. Et pourtant, elle ne constitue pas une région en soi, elle a été justement partagée en plusieurs États ; de ce fait, ils sont une demi-douzaine (Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Nayarit, Zacatecas et un tout petit bout du Jalisco) à pouvoir profiter de ce « château d'eau » sans forcément prendre garde à l'intérêt d'en préserver le milieu et les ressources. Il n'y a pas de « région » Sierra Madre, et pourtant il y a en maints endroits, des bassins d'emploi, micro-régions économiques qui se sont bâties autour d'une mine, d'un gros bourg, d'une riche plaine agricole. Dernièrement, les zones les plus dynamiques sont sans conteste possible les régions où l'on transforme le bois, activité surimposée aux autres activités rurales, complètement indépendante et déconnectée du système communautaire ou *ejidal* en voie de disparition. En fait, la privatisation des terres va rapprocher par la tenure le comportement des exploitants agricoles de celui des forestiers. Bien que cette privatisation se traduise premièrement par la destruction des liens sociaux, de la vie villageoise, de l'équipement scolaire et médical, elle devrait au moins faire prendre conscience aux exploitants de l'intérêt de préserver le capital forêt, le capital sol et le capital eau qui sont entre leurs mains. Sinon, on pourra dire que l'abrogation de l'article 27 de la Constitution mexicaine en 1992, qui a conduit à la privatisation des terres, aura été un fiasco environnemental.

9 Il reste donc une « région » à construire. À défaut d'être une région administrative ou économique unique, la Sierra Madre occidentale, sous la pression de ses habitants, pourrait devenir une région pilote pour la gestion patrimoniale de l'espace. Une gestion économiquement rentable, socialement acceptable, écologiquement durable, dans une optique de développement durable, pourrait apporter une alternative intéressante à ses habitants. Fondée sur l'écotourisme, ce nouveau mode d'aménagement, s'il est adopté par ses habitants, permettrait à la sierra de mettre en œuvre une gestion patrimoniale, raisonnée et concertée, de l'espace. L'écotourisme permet de développer les atouts de la région, en mettant à profit localement les produits du terroir (fromages, fruits, etc.), en aménageant les sites naturels et en valorisant les ressources culturelles, pour susciter ou préserver des activités en milieu rural.

Quel enseignement en tirer à l'échelle mexicaine et à l'échelle globale ?

10 La spécificité de la Sierra Madre occidentale n'empêche en rien de chercher les leçons de ces résultats et de les étendre à d'autres régions de la Planète. Tout d'abord, au Mexique même, et c'est pourquoi a été abordée la thématique scientifique qui est celle des travaux menés dans le haut bassin du Cutzamala, dans le centre du pays. On constate que dans le centre et le sud du Mexique, la pression démographique est bien plus forte, et, partant, la pression sur le milieu et les ressources également. Bien que ces régions reçoivent beaucoup plus d'eau que le Nord, elles sont aussi en « stress hydrique » relatif, c'est-à-dire qu'y apparaissent des conflits pour les ressources ou pour l'accès à ses ressources, et, plus fréquemment encore, des problèmes de qualité. Les problèmes d'ampleur nationale

que sont l'approvisionnement en eau de la ville de México (cf. « Eau et espace à Valle de Bravo. La bataille pour l'eau », p. 283) ou celui de la lagune de Chapala (cf. « L'eau, agent économique et enjeu politique », p. 249) s'ils sont les plus aigus, ne sont pas les seuls, loin s'en faut.

11 Et plus largement, presque toutes les zones arides, semi-arides ou méditerranéennes de la Planète connaissent des problèmes de ressource ou d'usage. Certaines sont des régions très peuplées : quelques secteurs du pourtour méditerranéen, vallée du Nil, Mésopotamie, vallée de l'Indus, Chine du Nord, etc. Ce sont en général des régions qui ont pu bénéficier d'approvisionnements en eau importants, venus de secteurs montagneux, châteaux d'eau naturels, plus ou moins proches. Le fait de dépendre complètement d'eaux exogènes rend terriblement fragiles certaines économies. Mais en incitant les responsables des régions aval arides à dialoguer avec les usagers des secteurs amont « pourvoyeurs », cette dépendance est aussi créatrice de « gestion partagée ». Elle force à considérer le bassin comme l'unité de gestion, et tous les usagers de l'espace comme des usagers de l'eau.

Eau, espace et territoire

12 *Eaux et territoires,* tel est le titre d'un récent ouvrage traitant de géopolitique de l'eau (Lasserre et Descroix, 2003) ; de plus, « faire territoire, c'est résoudre ensemble un problème », comme l'affirment des géographes « du territoire » (comm. orale de Hervé Gumuchian, novembre 2004). Par ailleurs, le savoir penser l'espace (le travail du géographe « aménageur ») exige que concernant la gestion de l'eau, le territoire soit le bassin versant. C'est dire si les aménageurs assimilent de plus en plus le bassin versant comme unité de gestion. Celui-ci devient un outil de gestion des territoires de l'eau, c'est-à-dire de l'ensemble du territoire d'où vient cette eau. Gumuchian évoque la notion de « ressource territoriale », qui peut être « construite sur des composantes matérielles (données naturelles, faune, flore, patrimoine) et/ou idéelles (des valeurs comme l'authenticité, la profondeur historique...) ». Ainsi il y a une dizaine d'années, le département des Hautes Alpes s'est-il acheté le slogan « les Alpes vraies » ; les Alpes-de-Haute-Provence, souvent très proches à tout point de vue au niveau naturel comme culturel, ont surenchéri en se baptisant « Alpes authentiques ». Selon Gumuchian, « le recours à l'expression de "ressource territoriale" implique que l'on se situe dans une logique de gestion intégrée du territoire, faisant ainsi référence au développement durable ». En matière de gestion de l'eau, cet ouvrage prétend avoir expliqué par un exemple la pertinence de considérer l'ensemble du bassin comme unité de gestion ; *des bûcherons et des éleveurs, exerçant leur activité sur les lignes de crête, loin du cours d'eau, sont aussi des usagers de l'eau, et doivent à ce titre intégrer les assemblées d'usagers des comités de bassin.* C'est ce qui est en cours de mise en place au Mexique, du moins dans le bassin Nazas-Aguanaval, et pour la partie montagneuse. Dans ce château d'eau naturel (la Sierra Madre occidentale), ces acteurs économiques sont intégrés aux comités de bassin au même titre que les agriculteurs pratiquant l'irrigation, les industriels pompant l'eau des nappes ou ceux qui utilisent les eaux de surface pour le refroidissement d'un processus de fabrication. La territorialité s'entend aussi bien sûr pour les groupes et les individus qui occupent ou utilisent ce territoire ; ces groupes et individus deviennent alors des « acteurs territorialisés » (GUMUCHIAN, 2004). Par ailleurs, des spécialistes de l'aménagement du territoire montrent que « le territoire et la territorialité, loin d'être des conceptions anachroniques du rapport à l'espace des sociétés contemporaines, loin

d'être des modalités périmées de ce rapport, restent des outils opératoires d'analyse de ce rapport à condition de renoncer au caractère uniscalaire et totalisant que la signification de chacun de ces termes avait pu prendre » (DEBARBIEUX et VANIER, 2002). Enfin, est suggérée la création d'observatoires qui, en tant qu'outils fonctionnels et dynamiques de gestion du territoire considéré, doivent « en matière de développement territorial, privilégier partenariat, concertation, négociation, recherche de consensus sur des sujets aussi sensibles que ceux de la qualité environnementale, de qualité de vie, ou encore de pérennisation des ressources ». (GUMUCHIAN, 2004).

13 C'est exactement la mission qui a été confiée aux agences de bassin récemment créées au Mexique. Mais le système y a été enfanté dans la douleur, à un moment où les nombreux conflits d'usage étaient déjà aigus et exacerbés par une longue période de sécheresse qui en a fait réapparaître d'anciens avec le grand voisin du Nord.

Mise en relation avec d'autres thématiques

14 Les travaux de recherches menés dans la Sierra Madre occidentale nous ont conduit à faire des incursions dans d'autres espaces – ou territoires ! – agro-pastoraux, à faire des comparaisons avec d'autres régions de montagnes, d'autres secteurs semi-arides. On a fait appel à d'autres disciplines que l'hydrologie et la géographie physique ; cette dernière est indissociable de la géographie humaine et sociale, et tout géographe sait qu'une étude d'un milieu anthropisé (y en a-t-il encore qui ne le soit pas ?) ne peut se faire sans prendre en compte le côté humain, économique, social et culturel d'un territoire, même si on donne à celui-ci une limite physique (les lignes de partage des eaux pour un bassin versant).

15 Les principaux thèmes qui sont sous-jacents à cette recherche sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin sont :

- les systèmes agro-pastoraux tant il a été montré que les versants sont « modelés » par le passage des troupeaux ; les paysages de zones d'élevage sont, comme les zones de cultures, des paysages « construits » ; il n'est pas question de parler de « destruction » d'un paysage quand celui-ci souffre de surexploitation ou au contraire de « déprise » ; il faut accepter qu'un paysage – ou un territoire – évolue ;
- la démographie, très liée au système d'exploitation, est primordiale ici, puisque la population évolue, au gré de taux de natalité encore élevés (bien qu'en forte baisse) et de migrations telles qu'elles ont pu laisser l'impression d'une très forte déprise ;
- la géopolitique s'est invitée par l'intermédiaire des conflits d'intérêts pour la ressource et pour l'espace : les secteurs d'élevage et d'exploitation forestière doivent-ils être gérés dans l'intérêt de pérenniser une ressource en eau qui n'est utilisée que loin en aval, pour l'irrigation des périmètres irrigués ?

16 On n'aura qu'effleuré certaines des sciences de la Planète qui sont en lien direct avec l'étude des ressources en eau, en particulier la climatologie ; mais la question de savoir si la forêt attire la pluie, ou du moins si elle peut jouer un rôle dans sa distribution spatiale, reste en suspens. Par ailleurs, l'étude archéologique des sites des cultures anciennes de la sierra et celle du contexte historique et politique sont indispensables pour mieux comprendre le contexte culturel et social actuel.

Vers une vision partagée de la gestion de l'eau ?

17 C'est le chemin que semble prendre le Mexique depuis quelques années, avec la mise en route, lente mais effective, d'une politique d'agences de bassin, partiellement inspirée du modèle français, qui vise à abolir les systèmes autonomes où chacun puisait dans la ressource à sa convenance, dans un type d'exploitation minière. La gestion patrimoniale de l'ensemble du bassin versant devrait être à même de limiter la surexploitation de l'espace et de faire cesser le pillage des ressources en bois, pâturages et eau tel qu'il est pratiqué encore à l'heure actuelle par endroits. Le « Consejo de Cuenca Nazas Aguanaval » réunit depuis 2001, deux fois par an, tous les usagers du bassin afin de planifier la future gestion des eaux. Et il a bien inclus dans ses membres tous les usagers de l'espace, même ceux qui n'utilisent pas l'eau directement, mais dont l'action sur l'espace peut entraîner des modifications du cycle de l'eau et du bilan des ressources. Plus que jamais, cette ressource eau doit s'entendre comme un ensemble eau-sol-végétation, et l'unité de gestion de la ressource doit gérer le territoire et non plus la seule ressource en soi.

BIBLIOGRAPHIE

Références

DEBARBIEUX B., VANIER M., 2002 – *Ces territorialités qui se dessinent.* Datar, Éditions de l'Aube, 268 p.

GUMUCHIAN H., 2004 – *Entre forme et sens : le territoire comme objet géographique soumis à l'observation.* Synthèse d'une communication orale, novembre 2004.

LASSERRE F., DESCROIX L., 2003 – *Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitique.* Paris, L'Harmattan, 280 p.

AUTEURS

LUC DESCROIX

Géographe et hydrologue, chargé de recherches à l'IRD, actuellement en poste à Niamey (Niger).

DAVID VIRAMONTES

Éco-pédologue et géographe, chercheur à l'Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA, Cuernavaca).

JOSÉ LUIS GONZALEZ BARRIOS

Hydro-pédologue, directeur de recherche au Cenid Raspa (Inifap) de Gômez Palacio.

Glossaire

1 ***Arroyo :*** ruisseau, cours d'eau temporaire de petite taille.

2 ***Barranca :*** canyon ; on désigne par « Barrancas del Cobre » l'ensemble des sept canyons qui coupent les plateaux de la Sierra Madre dans le sud de l'État de Chihuahua ; cf. *Quebrada.*

3 **Battance :** cf. Splash.

4 **Capacité au champ :** correspond à l'eau retenue par le sol, après une période de pluie, et un ressuyage de deux ou trois jours, le sol étant protégé contre l'évaporation.

5 **Cappusien** (ruissellement) : type de ruissellement induit par la saturation du sol, indépendamment donc de l'infiltrabilité de la surface ; on dit aussi « ruissellement par surface contributive saturée » (par opposition à « hortonien »).

6 ***Charreada :*** du nom « charro » qui constitue un spectacle et un sport équestre typiquement mexicain ; il consiste à prendre des veaux ou vachettes au lasso ou à les faire tomber en se jetant dessus à partir d'un cheval ; le spectacle est entouré de tout un cérémonial avec de jolis costumes et des cavalières en tenue traditionnelles. Ce type de spectacle se produit dans le « lienzo charro », que l'on trouve dans toutes les grandes villes mexicaines au même titre que la plaza de toros ou le stade ; cf. *Coliadera.*

7 **Chroma** (d'après Lozet J. et Mathieu C, 1990, *Dictionnaire de Science du Sol.* Paris, Lavoisier Tec. Doc. : 67.) : terme indiquant une des trois variables du code Munsell pour la détermination de la couleur des objets. Elle représente la pureté relative de la couleur spectrale et est indiquée sur les planches Munsell en abscisse. Le chroma le plus faible (0) étant à l'origine. Il est chiffré de 0 à 8 et est indiqué en dernier lieu dans le sigle Munsell. La traduction française la plus fréquente est l'intensité.

8 **Coefficient d'écoulement :** rapport des pluies écoulées aux pluies tombées, sur un bassin versant, ou une parcelle expérimentale, donc sur un impluvium donné.

9 ***Coliadera :*** (nom « norteno », c'est-à-dire typique du Nord-Mexique) même spectacle de rodeo que le *charro* (cf. *Charreada*) mais organisé dans les villages et donnant lieu à une fête foraine.

10 ***Comunidad rural :*** nom donné aux communautés rurales préexistantes à la Réforme agraire (c'était le système en vigueur dans les zones de peuplement indien en dehors de celles contrôlées par les haciendas).

11 **Conductivité hydraulique :** caractérise la vitesse d'infiltration d'un flux d'eau dans le sol, en cm/s ; elle manifeste l'effet de résistance à l'écoulement dû aux forces de frottement.

12 **Conglomérats :** il s'agit de matériaux volcaniques constitués ni de lave pure, ni de scories meubles, mais de pyroclastites ; ils sont proches des tufs et des ignimbrites dans la Sierra Madre.

13 **Débit de base :** débit d'un cours d'eau en dehors des périodes de précipitation.

14 **Débit de crue :** débit supplémentaire généré par une crue, dans l'écoulement total d'un cours d'eau.

15 **Densité apparente :** c'est la densité du sol sec, concernant l'ensemble, fraction solide et pores.

16 **Densité réelle :** c'est la densité de la fraction solide seule, indépendante des vides.

17 ***Ejido :*** nom des communautés rurales créées par la Réforme agraire (dès 1936, et jusqu'au début des années 1970 pour les zones cadastrées en dernier) sur les terres confisquées des haciendas. Une majorité d'entre eux au nord du pays s'est peu à peu auto-dissous lors de la distribution des titres de propriété après l'abrogation, en 1992 et sous pression américaine comme condition à l'entrée dans l'Aléna, de l'article 27 de la constitution instaurant la Réforme agraire.

18 ***Ejidal*** (système) : adjectif définissant le système des *ejidos.*

19 ***Ejidatario :*** paysan membre d'un *ejido* ; les terres étaient partagées régulièrement entre les travailleurs en fonction de leur nombre.

20 ***Encomienda :*** système d'exploitation de la main-d'œuvre indienne mis en place par les Espagnols sous la colonie. La communauté, la paroisse ou la personne qui en bénéficiait devait en retour prendre en charge ces populations.

21 **Endoréique :** se dit d'un bassin versant débouchant vers une dépression fermée (par opposition à exoréique quand il y a drainage vers la mer et à aréique lorsqu'il n'y a pas d'écoulement permanent).

22 **Espace poral :** cf. Porosité.

23 **État de surface :** ce terme peut désigner :

- une seule surface élémentaire (voir définition ci-après) ;
- la juxtaposition de plusieurs ;
- ou un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire un ensemble, au sein duquel jouent des interactions.

24 (Surface élémentaire : ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivants :

- le couvert végétal ;
- la surface du sol ;
- les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques).

25 **Fersiallitiques** (sols) : ce sont des sols brun-rouge subtropicaux ou tropicaux typiques, riches en oxydes de fer bien cristallisés, bien drainés et à altération avancée et assez argileux.

26 **Gilgaï :** modelé original des sols tropicaux à argiles gonflantes dû au passage de l'état humide à l'état sec et comportant des micro-reliefs courbes, en petites dépressions et dorsales inter-dépressions.

27 **Gleyique** (sol) : adjectif venant de gley : horizon de couleur grise (fer réduit) résultant d'une hydromorphie (excès d'eau libre).

28 **Granulométrie :** cf. Texture.

29 **Hacienda :** nom des grandes propriétés (plus de 1 000 ha en général, et jusqu'à un million d'hectares dans le Nord) avant la Révolution. La plupart ont été saccagées et occupées puis autogérées par les paysans organisés en comité durant la période révolutionnaire. Elles ont été diminuées, lors de la Réforme, des terres surnuméraires, celles-ci étant partagées en ***ejidos.***

30 **Hortonien** (ruissellement) : c'est le ruissellement qui se produit par dépassement de l'infiltrabilité ; il se déclenche lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol.

31 **Ignimbrites** (cf. Tufs) : projections émanant d'éruptions brutales et de grande ampleur, retombant sous forme de tufs soudés.

32 **Impluvium :** surface considérée recevant une précipitation ; parcelle ou bassin versant d'un cours d'eau.

33 **Indigène :** au Mexique, 90 % de la population a des ascendances indiennes, très généralement majoritaires ; les « indigènes » sont, parmi eux, ceux dont la langue maternelle n'est pas l'espagnol ; en général ils parlent cette langue du fait que l'analphabétisme a pratiquement disparu au Mexique, et que la presque totalité des enfants vont à l'école ; on trouve toutefois, dans les hameaux éloignés, encore bien des personnes âgées ne parlant que tarahumar ou tepehuano.

34 **Lame écoulée :** quantité d'eau écoulée d'un impluvium (bassin ou parcelle) rapportée à la surface de l'impluvium, et donnée en mm. (comparable de ce fait à la lame précipitée ; leur rapport donnant le coefficient d'écoulement, à l'échelle d'un événement ou d'un laps de temps donné)

35 **Latifundium :** terme latin désignant dans les pays de culture latine la grande propriété (cf. Hacienda).

36 **Mousson :** alizé maritime dévié lors de son passage de l'Équateur (changement d'hémisphère entraînant un changement de sens de la force de Coriolis).

37 Anciennement : par extension, régime de pluie tropicale des façades sud des continents exposées à de grandes masses océaniques : Asie du Sud, Afrique de l'Ouest, ouest du Mexique, caractérisé par une longue saison sèche très marquée et de forts abats d'eau durant la saison des pluies qui se produit durant l'été boréal.

38 Cette conception est remise en cause aujourd'hui ; donc elle est utilisée ici par les auteurs mais sans but polémique ; on pourra donc remplacer « pluies de mousson » par « pluies de front intertropical ».

39 ***Municipio :*** commune.

40 ***Patio :*** cour intérieure des maisons latino-américaines et hispaniques (se prononce patio en espagnol, n'a aucune raison d'être prononcé pacio en français). Désigne ici un grand espace ouvert (de plusieurs centaines de mètres carrés à un hectare) que l'on retrouve au centre de nombreux sites archéologiques typiques de la Méso-Amérique.

41 ***Peladero :*** nom mexicain des zones de sol nu, fréquentes en zone semi-aride et plus encore en zone aride ; elles sont dues en grande partie à l'érosion éolienne qui favorise le départ des éléments fins et riches du sol, emportés par les tourbillons de poussière.

42 ***Pequeno*** (pour « pequeno propietario ») : litt. « petit propriétaire ». En fait, ce sont les propriétaires privés de terres, puisque la propriété privée était maintenue sous la Réforme agraire. Simplement, pour permettre le démantèlement des latifundia improductifs (la plupart des haciendas avaient des rendements médiocres et appuyaient leur richesse sur la grande extension des terres), la Réforme agraire de 1936 avait fixé une taille maximale d'exploitation, qui différait bien sûr suivant le type de culture pratiquée, la fertilité des sols et la possibilité d'irriguer ou non. Dans le Nord, les limites étaient d'une centaine d'hectares irrigués dans la Laguna par exemple ; tout le reste, n'étant pas cultivable, était considéré comme pâturages, et dans cette catégorie-là, la limite supérieure des propriétés était « la surface nécessaire à l'élevage de 500 têtes de bétail bovin adulte. La surface nécessaire à chaque unité de bétail avait été fixée par la Cotecoca (*Comisión Técnica de los Coeficientes de Agostadero*), commission ad hoc créée pour déterminer région par région la superficie nécessaire à l'élevage d'un bœuf adulte. Ceci fait que les « pequenos » pouvaient avoir conservé (de leur ancienne hacienda) ou acheté des propriétés supérieures à 10 000 ha, là où cette commission estimait qu'il fallait 20 ha par tête de bétail. De même, 100 ha irrigués pouvaient être l'équivalent de la surface d'un *ejido* voisin, en périmètre irrigué ; donc les grandes propriétés ont été démantelées pour permettre de fournir des terrains aux *ejidos,* mais cela n'a pas pour autant fait disparaître la bourgeoisie rurale.

43 ***Peyote :*** cactus hallucinogène que l'on trouve dans tout le Mexique et qui est à la base de nombreuses prestations offertes traditionnellement par les sorciers indiens. C'est le peyofe qui a permis à Antonin Artaud (dans son périple chez les Tarahumaras en 1933) d'atteindre ses « paradis artificiels ».

44 **Point de flétrissement :** correspond à la valeur limite de l'eau liée, donc non absorbable par les racines.

45 **Porfiriat :** période de formation du capitalisme mexicain, sous le régime de Porfirio Diaz, dictateur éclairé qui a suscité la venue des capitaux étrangers, permettant la naissance de l'industrie et du grand commerce au Mexique.

46 **Porosité :** c'est le volume des vides d'un sol, exprimé en pourcentage du volume total ; elle est en étroite relation avec la densité réelle et la densité apparente.

47 ***Potrero :*** « pré », vaste enclos de pâture.

48 ***Presôn*** (pl. *presones*) *:* petits réservoirs collinaires ou petits barrages installés sur les talwegs, ayant en général une vocation d'abreuvoir.

49 ***Quebrada :*** gorge canyon, synonyme de *barranca.*

50 ***Rancho :*** terme général désignant la ferme, l'exploitation, et, par extension, la campagne, les villages ; utilisé aussi dans la sierra pour désigner les hameaux situés sur les pâturages éloignés, où l'on va passer quelques semaines ou quelques mois par an (en saison des pluies) avec le bétail.

51 **Réforme agraire :** période de la Réforme agraire, lancée officiellement en 1936 sous la présidence de Lázaro Cárdenas, considéré comme le représentant mexicain du courant populiste latino-américain qui a conduit à la constitution d'industries nationales, en particulier dans les industries de base (gétulisme au Brésil, péronisme en Argentine, période correspondant ensuite à une phase d'autarcie forcée du fait de l'arrêt presque total du commerce durant la Seconde Guerre mondiale).

52 À ne pas confondre avec « la Reforma » période de modernisation de la Nation mexicaine sous l'impulsion de Benito Juárez (après la chute de Maximilien d'Autriche).

53 ***Repartimiento :*** système mis en place dès le début du XVI^e^ siècle, qui répartissait la main-d'œuvre destinée à l'*encomienda* entre exploitations minières et agricoles principalement.

54 **Révolution :** la Révolution mexicaine commence en 1910 par rejet unanime de Porfirio Diaz et à l'appel de F.l. Madero, qui fut suivi immédiatement par les paysans, véritables laissés-pour-compte des régimes précédents ; ceux-ci formèrent le gros de la Division du Nord, armée rassemblée par Villa qui parvint à entrer à México en 1911 et à chasser Diaz. La Révolution finit officiellement en 1920 avec l'arrivée au pouvoir de Alvaro Obregón, après que les paysans eurent relancé plusieurs fois et en vain la dynamique révolutionnaire, chaque président une fois installé instaurant un régime bourgeois reniant les engagements précédents (Madero, puis Huerta, puis Carranza) ; mais la période troublée, avec de nombreux retournements de situation, va durer jusqu'à l'assassinat de Emiliano Zapata (1919) et de Pancho Villa (1923).

55 **Rhyolite :** roche volcanique microlithique ayant les mêmes constituants que le granite (quartz, orthose, biotite), sur une matrice finement grenue et vitreuse de couleur claire rougeâtre ou légèrement rosée dans le cas de la Sierra Madre occidentale.

56 **Sorptivité :** capacité d'un sol à absorber l'eau lorsque l'écoulement se produit sous l'effet d'un gradient de potentiel de pression uniquement ; c'est donc la lame d'infiltration en écoulement horizontal.

57 **Splash** (ou saltation pluviale, ou rejaillissement, ou battance) : phénomène de détachement des particules fines du sol (nu) sous l'impact des gouttes d'eau ; celles-ci déplacent les particules les plus fines, qui à leur tour peuvent boucher les pores, aidant, avec le tassement lié au splash lui-même, à la constitution d'une « croûte de battance » limitant très sérieusement l'infiltration de l'eau (cf. Birot, 1981, *Les processus d'érosion à la surface des continents*, Masson : 310). Dans les secteurs pentus, il est évident que le déplacement des particules se fait sur une plus grande distance vers l'aval que vers l'amont, contribuant à moyen terme à l'érosion et au transport des éléments les plus riches du sol.

58 **Stationnarité :** les variables appartenant à une série chronologique sont dites stationnaires quand leurs caractéristiques statistiques (moyenne, auto-covariance) ne changent pas au cours du temps. Dans le cas contraire, un effet de tendance est à mettre en cause.

59 **Structure :** désigne le mode d'assemblage des particules du sol ; elle détermine la répartition dans l'espace de la matière solide et des vides (ou pores) dont certains sont occupés par de l'eau, d'autres, les plus grossiers, par de l'air.

60 **Texture** (ou **granulométrie** d'un sol) : correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur (en fait de diamètre, les particules étant supposées sphériques).

61 **Tufs** (volcaniques) (cf. Ignimbrites) : cendres et lapilli volcaniques (projetés par les volcans) qui ont été colmatés et cimentés par des circulations d'eaux chargées de sels minéraux ; si le matériel est hétérogène, ce qui est souvent le cas dans la Sierra Madre, on a des brèches volcaniques.

Résumé

1 La Sierra Madre occidentale est un espace relativement vide dans l'ensemble du Mexique ; elle constitue à la fois une « frontière » au sens d'une zone de colonisation possible dans un pays neuf et, paradoxalement, une réserve de main-d'œuvre, qui se vide de ses habitants ces dernières années. Elle est aussi proche de l'autre frontière au sens géopolitique et administratif, entre le Nord et le Sud, que représente la limite entre le Mexique et les États-Unis d'Amérique.

2 Cette longue chaîne de montagne d'origine volcanique est aussi le plus long massif rhyolitique au monde ; il est formé d'un vaste ensemble de plateaux étagés, entrecoupés de fossés d'effondrement orientés parallèlement à l'axe de la chaîne et au littoral (nord-ouest/sud-est). Ces fossés peuvent être profonds de plus de 1 000 m, mais leurs bords sont en général en pente relativement douce pour un secteur de montagnes, des gradins de faille coupant la dénivellation générale. Les principaux cours d'eau coulent au fond de ces fossés et en sortent par des gorges pour rejoindre le Pacifique ou l'altiplano nord central mexicain ; dans ce dernier cas certains, comme le río Conchos, rejoignent le río Bravo del Norte (le fleuve frontière appelé río Grande par les Américains), d'autres, comme le río Nazas, alimentent temporairement les lagunes d'évaporation des grandes dépressions fermées du nord du pays. La Sierra Madre occidentale est profondément dissymétrique sur ses deux côtés, puisque le versant oriental descend doucement et régulièrement sur les hauts plateaux (sis à 1 000 ou 2 000 m d'altitude) de l'altiplano, alors que sur le versant occidental, la dénivelée est bien plus brutale, obligeant les principaux cours d'eau à creuser des gorges profondes pour atteindre au plus vite leur niveau de base : c'est la région des fameuses *Barrancas del Cobre* que les habitants de l'État de Chihuahua assurent être les plus profondes du monde (elles atteignent de fait en deux endroits 1 850 m de profondeur).

3 L'eau est rare au nord du Mexique ; 54 % des terres arables du pays sont localisées dans sa moitié nord, qui ne reçoit que 7 % des précipitations. Cela ne va pas sans poser des problèmes d'usage de la ressource, avec de nombreux utilisateurs souvent en concurrence pour un faible volume disponible. La Sierra Madre occidentale apparaît indéniablement comme un « château d'eau » au milieu du Nord-Mexique aride et semi-aride ; les précipitations y atteignent localement plus de 1 000 mm par an, et presque partout plus de 500 mm. Or, cette chaîne est encadrée à l'ouest par le désert de Sonora, qui est le plus sec d'Amérique du Nord (moins de 50 mm par an à Mexicali) et, à l'est, par celui de

Chihuahua, qui est le plus étendu, et où les précipitations sont en général inférieures à 200 mm au fond des dépressions endoréiques. Cependant, partout la saison des pluies ne dure que trois ou quatre mois, ce qui rend nécessaire le stockage de l'eau pour de nombreuses activités. De fait, de nombreux barrages ont été construits sur les cours d'eau coulant tant vers le Pacifique (rio Yaqui, río Humaya, río Sonora, río San Lorenzo, río Matapé, etc.) que vers l'est et ses grandes dépressions intérieures (principalement le río Conchos et le río Nazas déjà cités).

4 L'abondance relative d'eau permet à la Sierra Madre de posséder des pâturages de meilleure qualité que ceux des secteurs arides ou semi-arides environnants. Ces pâturages sont dominés, au-dessus de 2 400 m d'altitude, par des forêts de pins qui couvraient naturellement l'essentiel des hauts plateaux. Ces conditions favorables à l'exploitation agropastorale expliquent la grande ancienneté des établissements humains.

5 On constate tant dans l'étage de pâturages que dans celui de la forêt une surexploitation des milieux et des ressources, et cela depuis semble-t-il plusieurs décennies. Le partage des terres des haciendas en application de la réforme agraire de 1936 s'est réalisé entre les années 1940 et 1970 dans la Sierra Madre qui était alors peu colonisée. Il s'est traduit par un accroissement sensible de la population, qui a eu pour corollaire une augmentation du nombre de troupeaux et de la charge pastorale, une désorganisation du système de gestion des pâturages. Cette désorganisation a eu à son tour pour conséquence une diminution rapide de la qualité des herbages et une dégradation des sols qui sont d'autant plus sollicités que le cheptel continue de croître. En effet, l'élevage bovin (naisseur en l'occurrence) est dédié essentiellement à fournir des veaux de neuf mois au marché américain ; il est très porteur et rémunérateur.

6 Dans le même temps, la Sierra Madre occidentale a été ouverte, au début des années 1970, à l'exploitation forestière. Très vite, l'État de Durango est devenu le premier du Mexique pour la production de bois (rappelons que le Mexique est un État fédéral, dont le nom officiel est d'ailleurs « Estados Unidos Mexicanos », les États-Unis du Mexique). Les villes les plus importantes, souvent nées de l'exploitation des minerais (Durango, Parral, Santiago Papasquiaro, etc.), se sont ouvertes aux industries du bois et à la papeterie, ce qui a provoqué aussi une très forte demande en bois et une surexploitation de la ressource, dont une partie est extraite clandestinement. À la fin des années 1990, la production a dépassé les 5 millions de m^3 par an pour une production autorisée de 1,7 million de m^3. Or, un mode d'exploitation « minier » (ne se souciant guère du renouvellement de la ressource) associé au pouvoir corrupteur d'entreprises privées peu soucieuses de l'état de l'environnement au Mexique a conduit à une très rapide déforestation : aucun reboisement n'était effectué, peu d'entretien était assuré, et les villages étaient prêts à laisser partir tout leur bois contre du numéraire. Cette situation s'est améliorée ces toutes dernières années.

7 Ces deux processus de dégradation de l'environnement ont déjà eu des conséquences sur les ressources en eau et ont conduit au lancement du programme de recherche « Gestion de l'eau dans un bassin du Nord-Mexique » en 1991, dont les résultats et conclusions ont été rendus sous forme de rapports techniques entre 1998 et 2001, puis sous forme de publications scientifiques depuis 2001. De nombreuses études ont été menées par ce programme piloté par le département Eaux continentales de l'IRD en association avec le Cenid Raspa (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua Suelo Planta Atmósfera), centre de recherche de l'Inifap (Instituto Nacional de Investigaciôn

Forestal y Agro-Pecuaria) situé à Gómez Palacio, dans l'État de Durango, au nord du Mexique.

8 De ces recherches, il ressort que la surexploitation du milieu dans la Sierra Madre occidentale, dont les principales causes sont comme on l'a vu, le surpâturage et la déforestation, a entraîné une dégradation des sols sur une grande proportion de l'espace. Cette dégradation des sols s'est traduite par une forte modification de leurs caractéristiques hydrodynamiques. Le piétinement du bétail, l'arrachage des graminées, la mise à nu de plages croissantes de sol, ont conduit à un tassement de celui-ci et au décapage des matériaux les plus fins et les plus riches des horizons superficiels.

9 À son tour, la dégradation du sol et de la végétation a entraîné une diminution de la capacité d'absorption en eau des sols, et donc de la rétention naturelle en eau totale du bassin versant, un accroissement du ruissellement, un renforcement des pics de crue et un creusement parallèle des étiages. De ce fait, l'hydraulicité (sa capacité à fournir de l'eau aux secteurs aval) de la Sierra Madre occidentale a été fortement amoindrie. Au cours des années 1990, plutôt sèches au nord du pays, on a vu maintes fois les grands barrages-réservoirs construits sur les deux versants de la sierra, être pratiquement vides parfois même à la sortie de la saison des pluies.

10 À l'échelle de la parcelle expérimentale, du petit bassin versant expérimental et du bassin versant de 1er ordre (plusieurs milliers de km^2 ici), l'analyse des données hydrologiques historiques et de celles engrangées pendant les huit années de mesure a permis de constater les phénomènes suivants :

- une stabilité du coefficient d'écoulement : aucune baisse des écoulements n'a encore été observée ;
- une diminution du temps de réponse des bassins aux précipitations, ce qui signifie que l'eau ruisselle plus vite qu'auparavant ;
- un accroissement des débits de crue par rapport aux débits de base ; cela veut dire que l'eau s'écoulant plus vite lors des crues, le sol et les nappes se rechargent moins et il reste moins d'eau stockée sur le bassin pour assurer l'écoulement pérenne, celui qui est le plus utile durant la longue saison sèche de huit mois ;
- une diminution de la teneur en eau des sols et de leur capacité physique d'infiltration et de stockage de l'eau ;
- des crues plus courtes et plus accentuées, des étiages plus longs et prononcés.

11 Autant d'éléments qui fragilisent le rôle de château d'eau de la Sierra Madre et vont rendre la gestion de l'eau pour les années à venir plus délicate encore qu'elle ne l'est actuellement. En effet, en aval, les régions « consommatrices » ont parfois eu par le passé encore récent, une gestion peu économe des ressources en eau. L'irrigation a été développée à outrance à partir des années 1940, grâce à la construction de grands barrages et à la constitution de grands périmètres irrigués. Ceux-ci ont d'abord utilisé intégralement l'eau renouvelable venue de la montagne. Puis ils ont eu recours aux eaux souterraines pour pouvoir continuer à croître sans améliorer leur rendement hydraulique : la politique de l'énergie pas chère a conduit à aller chercher de l'eau de plus en plus profond ou de plus en plus loin au lieu d'optimiser les rendements et d'investir dans des systèmes irrigués plus coûteux mais économes en eau ; de même, on a longtemps négligé les fuites et les pertes en conduction. Les années 1990 ont vu la conjonction d'une longue sécheresse avec l'entrée dans l'Aléna, qui s'est traduite par la fin des subventions et la vérité des prix agricoles (côté mexicain, bien sûr ; car de l'autre côté de la frontière,

les paysans ont vu toutes leurs subventions s'accroître substantiellement, leur permettant d'inonder le marché mexicain de maïs et de *frijoles* I).

12 Dans le même temps, le Mexique a été heureusement touché par la vague et la mode de la « Gestion intégrée des ressources en eau » si bien que le nouveau Code de l'Eau, adopté en grande pompe en avril 2004, fait la part belle aux associations d'usagers afin de créer et gérer un système utilisateur-payeur (ou pollueur-payeur, si l'utilisateur modifie l'eau au lieu de la consommer ou en plus de la consommer) basé sur le bassin versant et non sur les simples cours d'eau. L'idée est que tout utilisateur de l'espace d'un bassin versant hydrologique qui risque de modifier la ressource en eau doit être considéré comme un utilisateur de l'eau : c'est le cas des éleveurs dont les troupeaux modifient le comportement des sols, ou des négociants en bois qui bouleversent le cycle de l'eau.

13 Ce nouveau code devrait aider à régler de nombreux problèmes latents sur l'usage de l'eau, des conflits qui sont apparus dans les dernières décennies :

- à la frontière américaine pour le partage des eaux des fleuves transfrontaliers (rio Tijuana, río Colorado et río Bravo del Norte/Grande) ;
- entre les États mexicains pour le même partage (des projets de transferts d'eau ont dû être annulés faute d'entente entre eux) ;
- entre usagers surtout car à présent, l'eau se paye et seules les activités à forte valeur ajoutée vont pouvoir perdurer dans les zones arides ou semi-arides où l'eau sera forcément chère puisqu'elle y est rare.

14 Moyennant quelques règles de bonne gestion de l'espace et des ressources sol-végétation-eau (et non pas seulement la dernière), la Sierra Madre occidentale restera le château d'eau du Nord-Mexique ; le retour d'une bonne pluviosité (en 2004) et l'application de la nouvelle loi sur l'Eau devraient permettre le maintien des périmètres irrigués de piedmont, tout en autorisant un développement des zones de montagne grâce à une agriculture spécialisée (vergers, horticulture, etc.) et à l'« écotourisme », favorisé par la richesse et la variété des sites naturels de cette chaîne de montagnes.

Summary

Translation : Simon Barnard

1 The western Sierra Madre is a relatively empty part of México, forming both a 'frontier zone' in the sense of a possible area for colonisation in a new country and, paradoxically, a reserve of labour whose inhabitants have been leaving in recent years. It is also close to the other frontier in the geopolitical and administrative sense - between north and south - formed by the boundary between México and the United States of America.

2 This long range of mountains of volcanic origin is also the longest rhy-olitic range in the world; it consists of a vast set of staggered plateaux cut by rifts lying parallel to the range and to the coast (northwest/south-east). These rifts are sometimes as much as 1,000 metres deep, but the edges usually slope fairly gently for a mountain region, with fault steps breaking the overall difference in level. The main watercourses flow at the bottom of these rifts and leave through gorges to flow to the Pacific or to the Mexican central northern altiplano; in the latter case, some such as the Río Conchos flow into the Rio Bravo del Norte (the frontier river that the Americans call the Río Grande) while others like the Río Nazas provide temporary supplies for the evaporation lagoons in the large closed depressions in the north of the country. The two sides of the western Sierra Madre are extremely asymmetrical, with a gentle, regular eastern slope from the high plateaux (at an elevation of 1,000 to 2,000 m) of the altiplano, while the slope is much steeper on the western slope, and the main watercourses have cut deep gorges to descend more rapidly. This is the region of the renowned *Barrancas del Cobre* that the inhabitants of the state of Chihuahua hold are the deepest in the world (they are 1,850 m deep in two places).

3 Water is scarce in northern México: 54 percent of the arable land is in the northern half of the country, which receives only 7 percent of precipitation. This results in problems in the use of the resource, with many users often competing for small quantities available. The western Sierra Madre clearly seems to be a ‘water tower’ in the centre of arid and semi-arid northern México. Precipitation is locally over 1,000 mm per year and is over 500 mm almost everywhere. However, the range is bracketed by deserts—in the west by the Sonora desert, the driest of North America (precipitation less than 50 mm per year at Mexicali) and in the east by the Chihuahua desert, the larger of the two and where precipitation is generally less than 200 mm per year in the endorheic depressions.

4 However, the rainy season lasts for only three or four months everywhere, making it necessary to store water for numerous purposes. Many dams have therefore been built on the watercourses flowing either to the Pacific (Río Yaqui, Río Humaya, Rio Sonora, Rio San Lorenzo, Río Matapé, etc.) or eastward to the large interior depressions (mainly the Río Conchos and the Rio Nazas that have already been mentioned).

5 The comparative abundance of water means that the Sierra Madre has better grazing land than that in the neighbouring arid or semi-arid areas. Above 2,400 m, these pastures are dominated by pine forests that are natural cover in the greater part of the high plateaux. These conditions are favourable for agropastoral exploitation and account for the very ancient human presence in the area.

6 Over-exploitation of the environment and its resources is observed in both the pasture and forest storeys. This appears to have been the case for several decades. The sharing out of the hacienda land in application of the 1936 agrarian reform was performed from the 1940s to the 1970s in the Sierra Madre, which was then little occupied. This resulted in a considerable increase in population, and a resulting increase in livestock and grazing pressure and the disorganisation of the grazing management system. The latter feature then caused the rapid deterioration of the quality of pastures and damage to the soil— under increasing pressure as livestock numbers continue to increase. Indeed, cattle farming (calf production) is devoted mainly to supplying 9-month calves to the extremely buoyant and profitable US market.

7 At the same time, the western Sierra Madre was opened to forestry exploitation at the beginning of the 1970s. Durango very soon became México's leading state for timber production (it is reminded that México is a federal state, whose official name is Estados Unidos Mexicanos— United Mexican States). The largest towns, that had often grown with mining operations (Durango, Parral, Santiago Papasquiaro, etc.) opened to wood and paper industries, also causing very strong demand for wood and over-exploitation of resources, with a proportion extracted on a clandestine basis. At the end of the 1990s, production exceeded 5 million m^3 per year while authorised production was 1.7 million m^3. A ‘mining’ approach to exploitation with hardly any attention paid to the renewal of resources combined with the corruptive power of private companies that cared little about the state of the environment on México led to very rapid deforestation. No reforestation was performed, very little maintenance was carried out and the villagers were ready to let all their wood go for cash. The situation has improved in the last few years.

8 These two environmental deterioration processes have already affected water resources and have led to the launching of the research programme on 'Water management in a basin in northern México' in 1991, whose results and conclusions were delivered in the form of technical reports from 1998 to 2001 and then as scientific publications since 2001. Numerous studies have been conducted within the framework of this programme managed by IRD continental water specialists in association with the CENID RASPA (Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua Suelo Planta Atmósfera) at the INIFAP research station (Instituto Nacional de Investigaciôn Forestal y Agro-Pecuaria) in Gómez Palacio, Durango state, in northern México.

9 This research showed that the over-exploitation of the environment in the western Sierra Madre resulting from over-grazing and deforestation, as has been seen above, caused land degradation in a large proportion of the area. This resulted in marked changes in the hydro-dynamic characteristics of the land. Trampling by cattle, the uprooting of

Gramineae, and the stripping of increasing large areas led to compaction and the stripping of the finest, richest material in the surface horizons.

10 In turn, deterioration of land and vegetation has reduced soil moisture absorption capacity and hence the total natural water retention of the drainage basin, increased runoff, more serious flood peaks and, in parallel, more marked low water levels. As a result, the capacity of the western Sierra Madre to supply water to downstream sectors has been strongly reduced. The 1990s was a somewhat dry period in northern México and the reservoirs of the large dams built on the two slopes of the sierra were very often practically empty even at the end of the rainy season.

11 Analysis of hydrological records and the data collected during the 8-year period of measurements revealed the following phenomena at the scale of the experimental plot, the small experimental drainage area and the first order drainage basin (several thousand square kilometres in this case):

- the runoff coefficient is stable: no decrease in flows has yet been observed;
- a decrease in lag time in the basins after precipitations, meaning that runoff is faster than before;
- an increase in flood discharges in comparison with the base flows; this means that water flows more rapidly during floods, the land and groundwater are recharged to a smaller extent and less water is stored in the drainage basin for sustainable flow, which is very useful during the long eight-month dry season;
- a decrease in the moisture content and the infiltration and water storage capacities of soils;
- shorter, more marked floods and longer, more marked low water periods.

12 All these features make the Sierra Madre's ‘water tower’ function more fragile and will make water management even more delicate in the years to come. Indeed, the ‘consumer’ regions downstream have sometimes not managed water very economically in the still recent past. Irrigation was developed excessively from the 1940s onwards with the construction of large dams and the establishment of large irrigated perimeters. These first used all the renewable water flowing from the mountains. They then tapped underground water in order to continue growth without improving water efficiency. The cheap energy policy led to seeking water at increasing depths instead of optimising efficiency and investing in irrigation systems that are more expensive but more economical with regard to water consumption; likewise, leaks and conveyance losses were neglected for a long time. The 1990s saw the combination of a long drought and the setting up of NAFTA, resulting in the end of subsidies and the beginning of real farm prices (on the Mexican side of the border of course, as on the other side farmers received substantially increased subsidies, enabling them to flood the Mexican market with maize and *frijoles*!).

13 At the same time, México was affected—fortunately—by the fashion for 'integrated water resource management' and the new Water Code, adopted with due ceremony in April 2004, gives a fine position to users' associations for the setting up and management of a user-payer system (or polluter-payer if the user modifies the water instead of or in addition to using it) based on drainage basins and not just on watercourses. The idea is that any user of an area in a drainage basin who might modify water resources must be

considered as a water user. This is the case of livestock farmers whose herds change the behaviour of soils and of timber traders who upset the water cycle.

14 The new code should help to solve numerous latent problems concerning water use and conflicts that have emerged in recent decades:

- at the US frontier for the sharing of transfrontier water (Río Tijuana, Río Colorado and Rio Bravo del Notre/ Río Grande);
- between the Mexican states for the same sharing operation (water conveyance projects have had to be cancelled for lack of agreement between the states);
- above all between users as there is now payment for water and only high value-added activities will be able to subsist in the arid and semi-arid zones where water will necessarily be expensive as it is in short supply.

15 With a few rules for the good management of land and of land-vegetation-water resources (and not just water), the western Sierra Madre will continue to play the role of water tower for northern México. The return of satisfactory rainfall (in 2004) and the application of the new water law should make it possible to conserve the irrigated perimeters in the foothills while allowing the development of mountain areas thanks to specialised agriculture (orchards, horticulture, etc.) and ecotourism enhanced by the richness and variety of the natural areas in this range of mountains.

Resumen

Tradución : Luc Descroix

1 La Sierra Madre Occidental sigue siendo un espacio relativamente vacío en México; constituye a la vez una *"frontera"* en el sentido de zona de colonización posible en un pais nuevo, y paradójicamente, una reserva de mano de obra, que se está vaciando en los ûltimos anos, pues también queda muy cerca de la otra frontera (la frontera geopolftica y administrativa), entre el Sur y el Norte, que constituye el limite entre México y los Estados Unidos de América.

2 Esta larga cordillera de origen volcánico es el mayor macizo de riolita del mundo ; conformado por un gran conjunto de mesetas cortadas por fosas geológicas (graben) orientadas paralelamente al eje montanoso y al litoral, del Noroeste hacia el Sureste. Estas fosas pueden alcanzar más de 1 000 metros de profundidad, pero sus orillas son de pendiente relativamente suave para ser de un sector de sierra, debido a la presencia de escalones de fallas que disminuyen el desnivel aparente general. Los principales rios corren al fondo de estas fosas y deben abrir quebradas profundas para alcanzar el océano Pacifico o el altiplano del centra norte mexicano ; en este ultimo caso, algunos rios como el Conchos, escurren hacia el río Bravo del Norte, otros, como el río Nazas, alimentan temporalmente las lagunas de evaporación de las grandes depresiones cerradas del norte del pais. La Sierra Madre Occidental es completamente disimétrica cuando se comparan sus dos laderas. Su vertiente oriental deciende regularmente y suavemente hacia el altiplano central del norte, cuya altitud varia entre 1 000 y 2 000 metros, mientras que en su vertiente occidental, el desnivel es mucho más abrupto, y los rios escarban quebradas profundas para alcanzar su nivel base; es la regíón de las famosas "Barrancas del Cobre" que los habitantes del Estado de Chihuahua piensan son las más profundas del mundo (tienen localmente una profundidad de 1 850 metros).

3 El agua es un recurso raro en el norte de México; ahí se localizan 54 % de las tierras cultivables del pais, pero solo reciben un 7 % de las lluvias. Esto no deja de causar problemas de usos del recurso, debido a que hay muchos usuarios a menudo en competencia por un bajo volumen disponible. La Sierra Madre Occidental es indudablemente una *fuente de agua* en el centra del norte mexicano árido y semi-árido; las lluvias anuales alcanzan localmente 1 000 milímetros, y en casi toda el área, superan los 500 milimetros. La Sierra está limitada al noroeste por el desierto de Sonora, el más seco de Norteamérica (llueven menos de 50 mm anuales en promedio en Mexicali), y al oriente

por el desierto de Chihuahua, que es el mayor en superficie del continente, y que recibe menos de 200 mm en las depresiones endoréicas. Sin embargo, por todas partes, la estación de lluvias solo dura 3 o 4 meses, lo que hace necesario almacenar agua para los perfodos secos cuando se necesita más el recurso. De hecho, numerosas presas fueron construídas en los ríos, tanto en los que escurren hacia el Pacífico (rio Yaqui, río Humaya, río Sonora, río San Lorenzo, río Matapé, etc.) como en los que corren hacia las grandes depresiones interiores (principalmente los ya mencionados rios Conchos y Nazas).

4 La relativa abundancia de agua de la Sierra Madre tiene como consecuencia la presencia de *pastizales* de mejor calidad nutritiva que los de las áreas áridas o semi-áridas circundantes. Estos pastizales son sustituidos, arriba de los 2 400 m de altitud, por *bosques de pino* que cubrian anteriormente la mayoría de la superficie de las mesetas. Estas condiciones favorables a la actividad agropecuaria explican la antigüedad de los asentamientos humanos.

5 Se nota tanto en el pastizal como en el bosque una *sobre-explotación del medio ambiente y de los recursos naturales.* Los pastizales están sobre explotados, aparentemente desde hace varias décadas. El reparto de tierras de las haciendas en aplicación de la Reforma Agraria de 1936 se realizó entre las décadas 1940 y 1970 en la Sierra Madre que estaba entonces poco poblada. Este reparto produjo un aumento rápido de la población, que a su vez tuvo como consecuencia un aumento del numero de rebanos y de la carga pastoral, así como *una desorganización del sistema de manejo de los pastizales.* Esta desorganización poco a poco provocó una disminución de la calidad de los pastizales y una degradación de los suelos. Como los pastizales son cada vez menos productivos, pero la carga sigue creciendo pues la ganaderia vacuna es muy redituable ; la especialidad del norte del país es criar becerros de nueve meses para el mercado norte-americano.

6 Al mismo tiempo, la Sierra Madre Occidental se abrió, a principio de los ahos 1970, a la *explotación forestal.* Rápidamente, el estado de Durango se volvió el primero de México (recordemos que México es un estado federal, cuyo nombre es "Estados Unidos Mexicanos") en la producción maderera. Las ciudades más importantes, a menudo nacidas de la explotación minera en siglos anteriores (Durango, Parral, Santiago Papasquiaro, etc.) crearon industrias de la madera y del papel. Esto provocó una fuerte demanda de madera, lo que creó una sobre explotación del bosque, del que gran parte se extrae clandestinamente; al final de los ahos 1990, la producción efectiva alcanzó los 5 millones de m^3 anuales mientras que la producción autorizada era solo de 1,7 millones de m^3. Este *tipo de explotación "minera"* (que no planea el manejo del bosque para periodos futuros ni una minima renovación de sus recursos) aunado con el poder de corrupción de las empresas privadas poco interesadas en el estado del medio ambiente en México, produjo un fuerte desmonte : sin reforestación, y con poco mantenimiento efectuado, los pueblos estaban listos a dejar salir toda su lena a cambio de algo de dinero. Esta situación se mejoró mucho en los últimos anos.

7 Estos dos procesos de degradación del medio ambiente ya tuvieron consecuencias en el recurso agua. Eso fue lo que motivó la creación del programa de investigación *"Uso y manejo del agua en una gran cuenca del Norte de México"*, iniciado en 1991 y cuyos resultados han sido expuestos en reportes técnicos entre 1998 y 2001 y en publicaciones cientificas desde 2001. Numerosos estudios se llevaron a cabo en este programa manejado por el Departamento de Aguas Continentales del IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) y el CENID-RASPA (*Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relation Agua Suelo Planta Atmósfera*), centro de investigación del INIFAP (*Instituto National de*

Investigación Forestal y Agro-Pecuaria), ubicado en Gómez Palacio, estado de Durango, en el Norte de México.

8 De estas investigaciones, resulta que la sobre explotación del medio ambiente en la Sierra Madre Occidental, cuyas causas principales son, como lo vimos, *el sobre pastoreo y el desmonte,* causó una *degradación de los suelos* en una proporción importante del área total. Esta degradación de los suelos provocó una *fuerte modification de sus características hidrodinámicas.* El pisoteo del ganado, la desaparición progresiva de las gramíneas, el crecimiento de las áreas de suelo desnudo, causaron una compactación del suelo y la exportación de los elementos más finos y más nutritivos de los horizontes superficiales.

9 A su vez, la degradación del suelo y de la vegetación causaron una reducción de la capacidad de absorción de agua en los suelos y, con ello, *la retentión total de agua en las cuencas*, un incremento del escurrimiento instantáneo, un aumento del pico de avenida y una disminución del gasto base. La capacidad hidráulica de la Sierra Madre Occidental (o sea su capacidad para proveer agua a las partes ubicadas aguas abajo) que fuertemente disminuida. Durante los ahos 1990, relativamente secos en el norte del pais, se vieron quedar vacías varias veces a las grandes presas construidas de ambos lados de la Sierra, aûn al final de la temporada de lluvias.

10 A la escala de la parcela experimental, o de la pequena cuenca experimental, o de la cuenca hidrológica de primer orden (varios miles de km2) se analizaron ocho arios de observaciones hidrológicas así como los datos históricos que permitieron comprobar los procesos siguientes :

- una estabilidad del coeficiente de escurrimiento : no se observa todavia una reducción de los escurrimientos totales ;
- una disminución del tiempo de respuesta a las precipitaciones; el agua escurre en la cuenca más rápido que antes ;
- un aumento de los gastos de avenida en relación con los gastos base ; esto significa que el agua, al escurrirse más pronto en las avenidas, recarga menos el suelo y los acuiferos ; queda menos agua en las cuencas para garantizar un escurrimiento perenne, que resulta más util durante la larga temporada seca (8 meses) ;
- una reducción del contenido en agua del suelo y de su capacidad física de infiltración y de almacenamiento de agua ;
- las avenidas son más cortas y más fuertes que antes, los estiajes más largos y pronunciados.

11 *Todos estos procesos hacen más frágil el papel de fuente de agua a la Sierra Madre Occidental* y van a hacer más dificil el manejo del agua en los próximos anos. Efectivamente, aguas abajo, las áreas "consumidoras" de agua han tenido, en el pasado, un manejo poco patrimonial de los recursos. El riego se desarrolló muy rápidamente a partir de los anos 1940, gracias a la construcción de grandes presas y a la instalación de grandes distritos de riego. Estos usaron primero la totalidad de las aguas superficiales venidas de la sierra. Luego empezaron a usar las aguas subterráneas para poder seguir creciendo sin mejorar el rendimiento hidráulico : una política federal de bajo costo de la energía condujo a ir a buscar el agua cada vez más profunda o más lejana en vez de optimizar los rendimientos e invertir en técnicas de riego más costosas pero ahorradoras del recurso; también se dejaron desarrollar fugas y pérdidas en conducción. Los anos 1990 vieron llegar una larga y pronunciada sequla y la entrada de México en el TLCAN (tratado de libre comercio con América del Norte), que tuvo como consecuencia el final de los subsidios a la agricultura (esto del lado mexicano, por supuesto, ya que del otro lado de la frontera, los campesinos

americanos tuvieron mayores subsidios para seguir creciendo, autorizándoles a inundar el mercado mexicano con su maíz y sus frijoles !).

12 Durante el mismo periodo, México fue afortunadamente tocado por la moda del *"Manejo Integtado del Recurso Agua",* así que la nueva *Ley de Aguas Nacionales,* inaugurada en abril del 2004, promueve fuertemente las asociaciones de usuarios a fin de crear y manejar un sistema de usuario-pagador (o de contaminador-pagador, si el usuario modifica el agua en vez de o además de consumirla) basado en la cuenca hidrológica y no sobre el simple control de los rios. El principio es que todo ocupante de espacio en una cuenca o quien pueda modificar el recurso agua con su actividad es considerado como un usuario : asi los ganaderos cuyos rebanos modifican el comportamiento de los suelos, o los industriales de la madera que provocan cambios en el ciclo del agua son considerados como usuarios del agua.

13 Esto deberia ayudar en resolver numerosos problemas pendientes en el uso del agua, conflictos surgidos en las últimas décadas :

- en la frontera con Estados Unidos por el reparto de las aguas de los rios fronterizos : río Tijuana, río Colorado, río Bravo del Norte ;
- entre estados de México por el mismo reparto (proyectos de transferencia masiva del agua que fueron anulados por falta de convergencia entre los estados ;
- entre usuarios sobre todo, pues actualmente, el agua se paga y solo las actividades creadoras de fuerte valor agregado por unidad de volumen de agua, podrán permanecer en las zonas áridas o semiáridas, donde el agua es cara por ser escasa.

14 Mediante reglas de buen manejo del espacio y del recurso suelo-vegetaciónagua (y no únicamente del agua), la Sierra Madre Occidental seguirá siendo la fuente de agua principal del Norte de México ; el regreso de anos con buenas lluvias (en 2004) y la aplicación de la nueva Ley de Aguas Nacionales deberían permitir la permanencia de los distritos de riego de pie-de-monte y el desarrollo de las áreas de montana gracias a una agricultura especializada (huertos, hortalizas...) y al ecoturismo, favorecido por una gran riqueza y variedad de sitios naturales en esta cordillera.