

Bilan et perspectives de la ressource en eau dans le bassin du Nazas-Aguanaval (Nord-Mexique)

José L. González Barrios

Pédologue à l'INIFAP (CENID- RASPA)-AP 225-3, 35 071 Gomez Palacio, Etat de Durango, Mexique
email : glzbi@raspa.inifap.conacyt.mx

Luc Descroix

Hydrologue au LTHE-IRD- BP 53, 38 041 Grenoble CEDEX 9, France - email : descroix@hmg.inpg.fr

Introduction

La Région Hydrologique 36 (RH36) est le bassin endoréique des rios Nazas et Aguanaval ; elle s'étend sur une superficie de 92 000 km², au Centre-Nord du pays, sous un climat essentiellement aride et semi-aride (fig. 1).

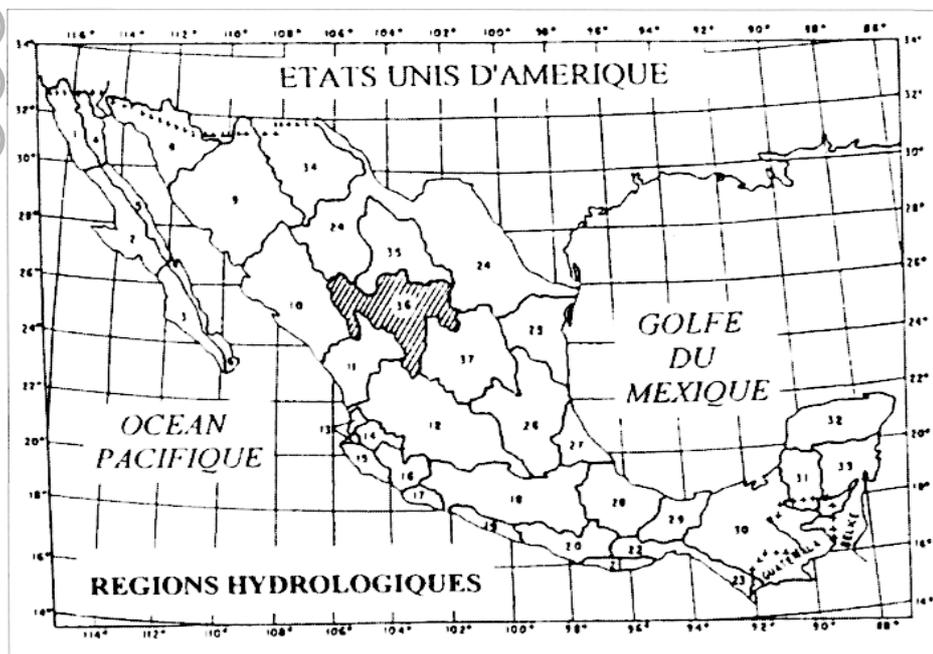


Figure 1 : Localisation de la RH 36, bassin versant des rios Nazas et Aguanaval

Les eaux de surface proviennent principalement de la partie amont du bassin du Nazas, située dans la Sierra Madre Occidentale ; elles sont utilisées, surtout pour l'agriculture, dans la partie la plus basse où se trouve le périmètre irrigué de la Laguna.

Le bilan de l'eau renouvelable et de l'eau consommée est négatif depuis plus de 60 ans, ce qui a provoqué une forte baisse des réserves en eaux souterraines dans le fond de la dépression ; c'est en effet dans l'aquifère que se pompe le volume d'eau manquant.

Cette situation ne pourra perdurer longtemps, étant donné que les réserves souterraines s'épuisent rapidement ; de fait, leur coût d'extraction devenant chaque fois plus élevé, les usagers sont contraints de diminuer leur consommation de près de 50 % à court terme (Rigal, 1988).

Il est urgent de trouver des alternatives pour réduire les besoins en eau dans les principaux secteurs de consommation.

Enfin, on note une rapide dégradation de l'environnement dans le haut bassin du Nazas :

- les savanes d'altitude sont touchées par un grave surpâturage (Viramontes, 1995 ; Viramontes et Descroix, 2000) ;
- les forêts font l'objet d'un déboisement massif (tableau 1 ; Rodriguez, 1997).

Formation végétale	Sup. 1972 (km ²)	Sup. 1992 (km ²)	Évolution 1972-1992 (%)
Forêt dense (pins)	400	155	- 62 %
Forêt ouverte (chênes)	1 228	915	- 26 %
« savane » d'altitude	1 417	1 805	+ 27 %
Pâturages	1 591	1 614	+ 1.5 %
Zones sans végétation	758	905	+ 19 %

Tableau 1 : Superficie des diverses formations végétales en 1972 et 1992 dans les Unités d'Administration Forestière de Tepehuanes et Guanacevi, Sierra Madre Occidentale (source : Rodriguez, 1997)

On trouve des problématiques de ce type dans de nombreuses autres régions arides ou semi-arides, tant en Amérique Latine (Leprun et Da Silveira, 1992, Ferrer *et al.*, 1984 ; Pourrut et Nuñez, 1995) qu'au Sahel (Sircoulon, 1992 ; Bille, 1992, Faurès, 1997).

1. Les apports d'eau par pluviométrie

La pluviométrie annuelle moyenne dans la Région Hydrologique n° 36 (RH36) est de 360 mm, ce qui est notoirement insuffisant pour une agriculture pluviale ; cependant, cette moyenne englobe des secteurs où les précipitations annuelles sont de 170 mm (dans les lagunes de Viesca et Mayran, zones d'évaporation naturelles des eaux du bassin endoréique) et d'autres où elles atteignent 900 mm (sur la ligne de partage des eaux avec le Pacifique).

VARIABILITÉ SPATIALE

La variabilité spatiale que l'on observe sur la carte des isohyètes (fig. 2) est due aux conditions géographiques de la RH36, les plus importantes étant la distance à l'Océan Pacifique et l'altitude ; l'exposition du site et la végétation semblent aussi jouer un rôle dans la répartition de la pluviométrie.



Figure 2 :
Isohyètes annuelles moyennes dans
la région hydrologique n° 36

La distance d'un poste pluviométrique à l'Océan Pacifique est corrélée négativement avec sa pluviométrie annuelle ; en effet, de cet océan arrivent les masses d'air humides qui apportent le plus de pluies à la RH36. Cependant, ces masses d'air se dessèchent en passant sur le continent, surtout en traversant la Sierra Madre. Ainsi, la pluviométrie annuelle diminue en moyenne de 150 mm par 100 km d'éloignement du littoral.

L'altitude est un autre facteur explicatif de la répartition des pluies. Les masses d'air humides, en s'élevant pour passer la chaîne montagneuse, se refroidissent du fait de l'altitude, qui provoque une condensation de l'humidité et les précipitations. L'altitude maximale de la Sierra Madre est de 3 300 m, mais il n'existe aucun passage à moins de 2 500 m ; la chaîne est donc massive et constitue un important obstacle aux masses d'air. Dans le haut bassin du Nazas, le fond des vallées, situé aux alentours de 1 800 à 2 000 m, est donc en position de climat d'abri orographique. Dans la RH36, le gradient pluviométrique est de 30 mm par 100 m d'altitude.

VARIABILITÉ TEMPORELLE

On constate également une forte irrégularité temporelle tant d'une année à l'autre (irrégularité interannuelle) qu'au cours d'une même année.

Du fait de la localisation de la RH36 à des latitudes sub-tropicales, le climat est sous l'influence des déplacements de la ZCIT (Zone de Convergence InterTropicale). La saison chaude est la saison des pluies, les mois de mars et d'avril sont les plus secs. 75 à 80 % des précipitations tombent de juin à septembre inclus (fig. 3).

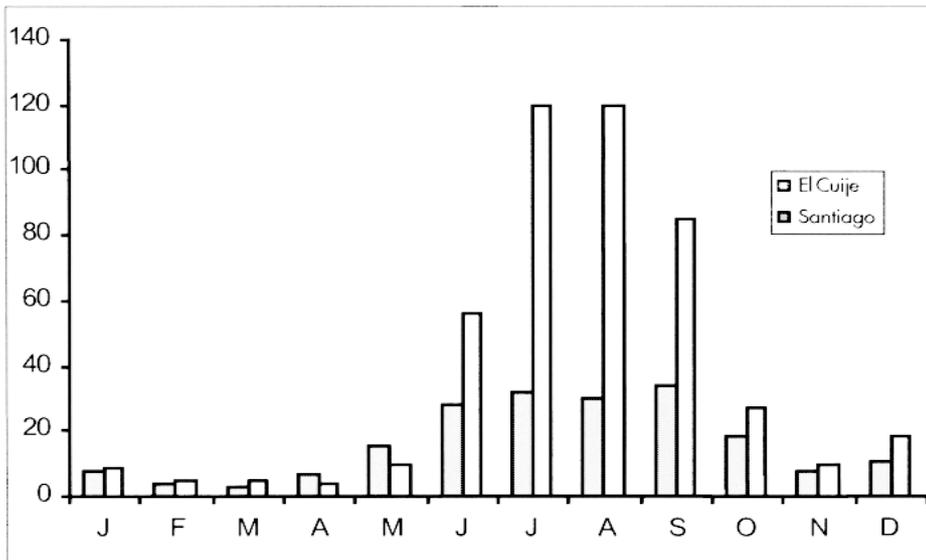


Figure 3 :
Pluviométrie annuelle
à Santiago Papasquiari
et EL Cuije

En général, on considère que l'irrégularité interannuelle des précipitations croît inversement au total des précipitations ; c'est-à-dire qu'elle est extrême dans les zones les plus sèches. Ceci s'observe clairement dans le bassin du Nazas-Aguanaval où l'irrégularité est la plus élevée dans le fond de la dépression endoréique (fig. 4).

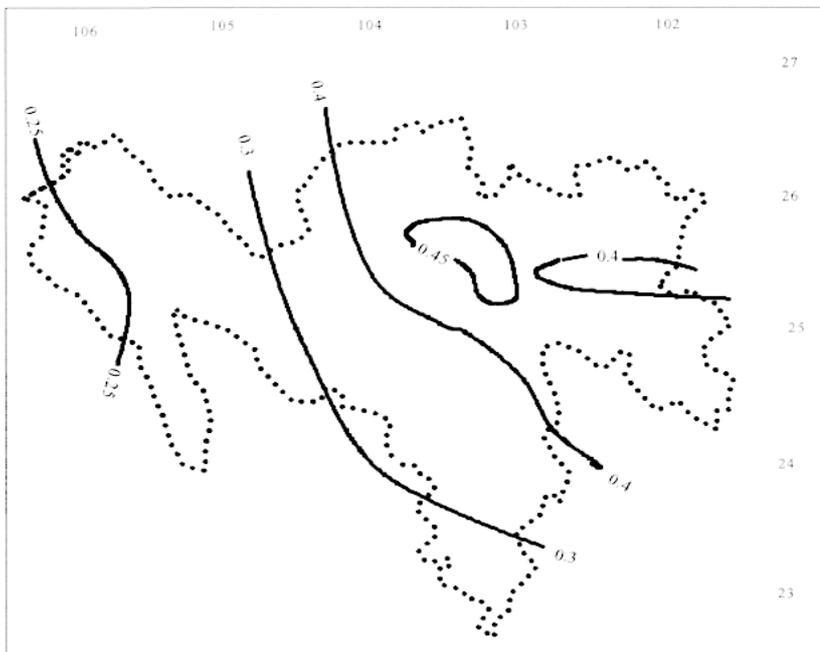


Figure 4 :
Coefficient de variation des
précipitations annuelles dans la
RH 36

De par sa proximité de l'Océan Pacifique, cette région peut être affectée par l'ENSO (El Niño Southern Oscillation), ce qui se traduit par un réchauffement des eaux du Pacifique Oriental, communément froides, et qui provoque des précipitations importantes dans les zones arides (Nouvelot et Descroix, 1996). C'est ce qui s'est produit durant les hivers 1991-1992 et 1997-1998. Ce phénomène se produit tous les 3 à 8 ans sans cyclicité notable.

2. Les eaux d'écoulement superficiel

Avec une pluviométrie moyenne annuelle de 360 mm sur l'ensemble du bassin, le coefficient d'écoulement moyen est compris entre 0 et 2 %. A l'échelle spatiale, on considère que les régions où les précipitations annuelles sont inférieures à 350 mm ne produisent pas d'écoulement de surface (Descroix et Nouvelot, 1997) ; ce qui fait que plus de la moitié du bassin ne produit aucun écoulement en année moyenne.

Les zones de plus forte pluviométrie ont des écoulements importants. Au-dessus de 500 mm de précipitations annuelles, on peut attendre des coefficients d'écoulement supérieurs à 5 %. C'est le cas dans les parties les plus élevées du bassin, où les coefficients d'écoulement dépassent localement 15 %. Entre ces deux extrêmes, les zones semi-arides ont des coefficients d'écoulement compris entre 0 et 5 % par an.

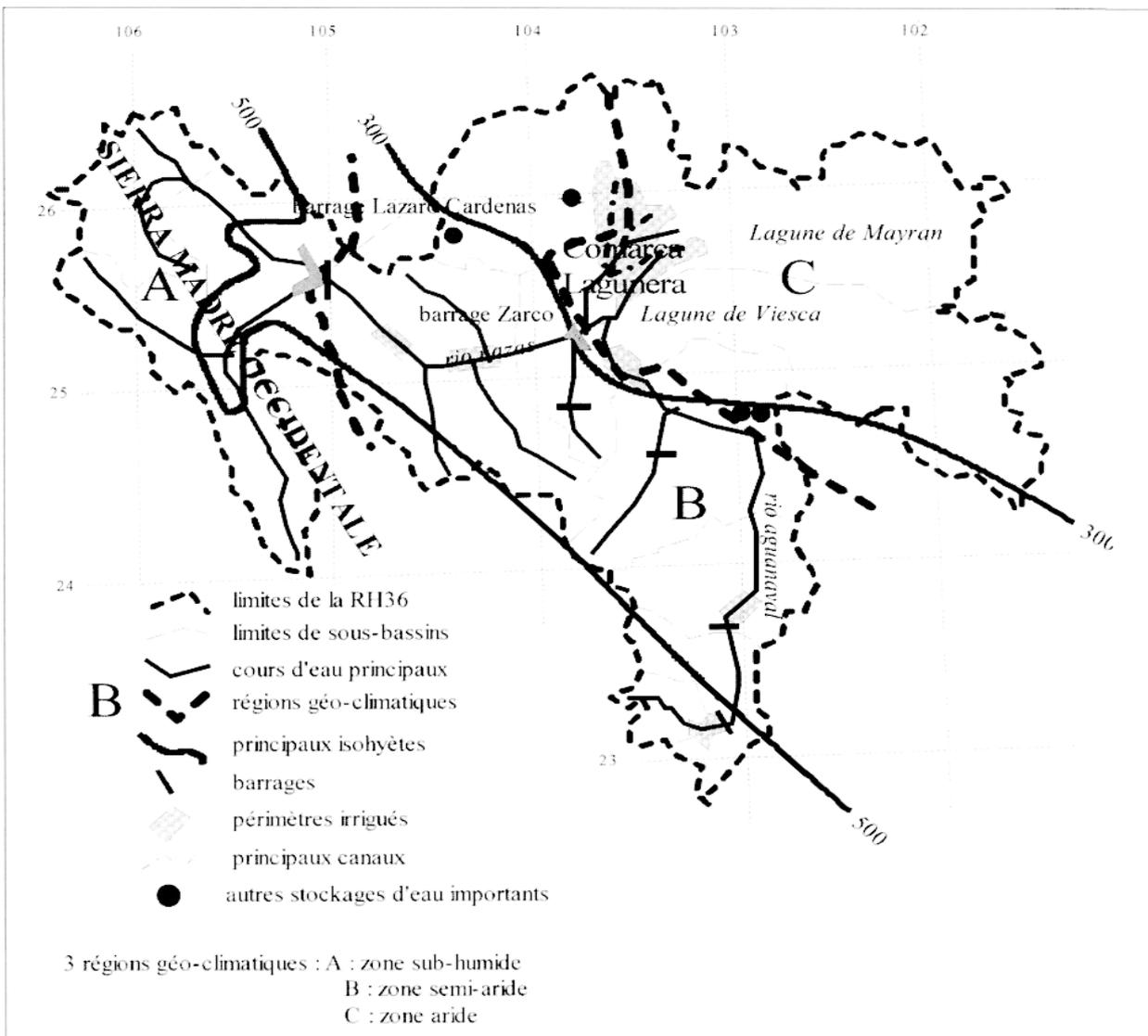


Figure 5 : Les 3 zones géoclimatiques de la RH 36

Le rio Nazas apporte 88 % des eaux de surface qui sont utilisées dans le périmètre de la Comarca Lagunera ; le reste provient du rio Aguanaval. Les eaux du Nazas proviennent majoritairement de la Sierra Madre Occidentale, qui ne représente que 20 % de la superficie du bassin-versant (Descroix et Nouvelot, 1997).

Le bassin du Nazas-Aguanaval peut être divisé en trois grandes sous-régions géo-climatiques (fig. 5) :

- * le haut bassin du Nazas, caractérisé par un climat sub-humide (précipitations annuelles moyennes supérieures à 500 mm) et des écoulements importants ;
- * la zone semi-aride, de 300 à 500 mm de précipitation annuelle moyenne, qui comprend le bassin moyen du Nazas et l'essentiel du bassin de l'Aguanaval (dont les eaux sont utilisées, localement, au moyen de barrages et d'ouvrages de dérivation de crues) ;
- * la zone aval, aride (précipitations inférieures à 300 mm par an), où il n'existe pas d'écoulement hiérarchisé et qui inclut le périmètre d'irrigation de la Laguna, principal utilisateur de l'eau.

Les apports au barrage Lazaro Cardenas, situé à la sortie du bassin amont du Nazas et qui permet l'approvisionnement de la Laguna en eaux d'irrigation, sont en moyenne de $10^9 \text{m}^3 \text{an}^{-1}$, mais ils connaissent aussi une très forte irrégularité interannuelle. Le coefficient de variation de ces apports est bien plus élevé que celui des précipitations ; à titre d'exemple, en 1996, les apports ont été 7 fois plus importants qu'en 1995 et 30 fois supérieurs à ceux de 1994 (Nouvelot et Descroix, 1996).

3. Les eaux souterraines

Avec une extraction annuelle moyenne de $1.3 \cdot 10^9 \text{m}^3$, l'aquifère, dans le bassin aval, est l'objet d'une surexploitation intense étant donné que la recharge annuelle de la nappe est de seulement $300 \cdot 10^6 \text{m}^3$, ce qui représente 23 % du volume effectivement extrait annuellement.

Ces eaux souterraines représentent la source d'approvisionnement la plus importante en eau potable, domestique et industrielle de la Laguna (région qui regroupe un million d'habitants). Elles sont aussi une source d'apport complémentaire indispensable pour l'irrigation (le périmètre couvre 150 000 ha en moyenne).

La figure 6 indique la baisse de l'aquifère qui a été observée depuis le milieu du siècle, avec une valeur moyenne d'environ 1,50 mètre par an. On remarque des remontées temporaires du niveau au cours des périodes plus pluvieuses comme en 1968 et 1991, ce qui montre la grande sensibilité de la nappe à la pluviométrie. Cette sensibilité est plus forte dans les puits proches du lit du rio Nazas, ce qui souligne le rôle important joué par la vallée du Nazas dans la recharge de l'aquifère (Gonzalez-Barrios, 1992 ; Brouste, 1996 ; Brouste *et al.*, 1997).

Les courbes piézométriques de la Comarca Lagunera montrent le sens du flux actuel des eaux souterraines vers deux grandes zones localisées dans les « municipios » (communes) de Francisco I. Madero et Matamoros. Ce sens du flux souterrain, contraire au

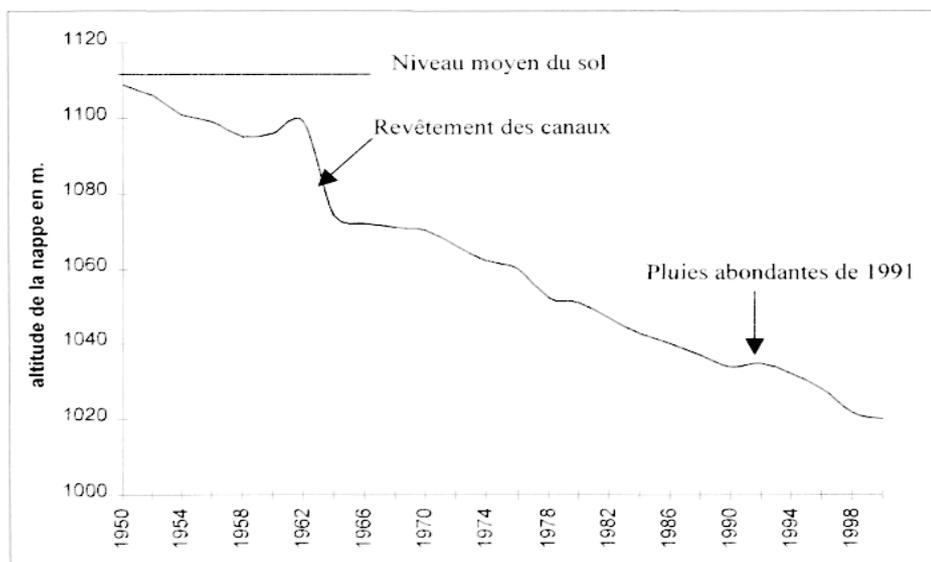


Figure 6 :
Abaissement du niveau
phréatique depuis 1950
dans la Laguna

flux attendu au vu des principales zones de recharge de la nappe du rio Nazas, s'explique par l'intensité du pompage d'eau souterraine qui crée de grands cônes d'abattement et modifie le flux naturel de l'eau souterraine (fig. 7).

Sur la base d'études hydrochimiques et géochimiques effectuées dans les eaux souterraines de la Laguna, on peut expliquer quelques uns des processus qui s'y produisent (diversité des familles hydrochimiques, détérioration de la qualité des eaux, contaminations), en associant l'âge de l'eau aux changements de flux souterrain provoqués par l'intensité du pompage.

Suite aux résultats de datations isotopiques, on peut identifier trois grandes familles d'eaux souterraines (Brouste, 1996 ; Brouste *et al*, 1997).

- * Les eaux récentes de moins de 4 000 ans de résidence, localisées dans la zone de reliefs à l'Ouest de la Laguna, et aussi dans la dépression endoréique à proximité du lit du Nazas, principales zones de recharge de l'aquifère ;
- * Les eaux d'âge intermédiaire (4 000 à 12 000 ans d'ancienneté), que l'on trouve au Nord et au Sud des eaux plus récentes, dans la dépression ;
- * Les eaux anciennes avec des temps de séjour compris entre 16 000 et 30 000 ans, situées à l'extrême Nord (municipios de E.I.Madero, San Pedro et Tlahualilo) et dans le Sud-Est de la Comarca Lagunera (municipios de Matamoros et Viesca).

4. Les eaux résiduelles

Les eaux usées domestiques, urbaines et industrielles représentent un volume important à l'échelle de toute la RH36. Cependant, tout ce volume n'est pas susceptible d'être recyclé et réutilisé, du fait du manque d'installations de traitement physico-chimique et de la dispersion spatiale des points de collecte de ces eaux.

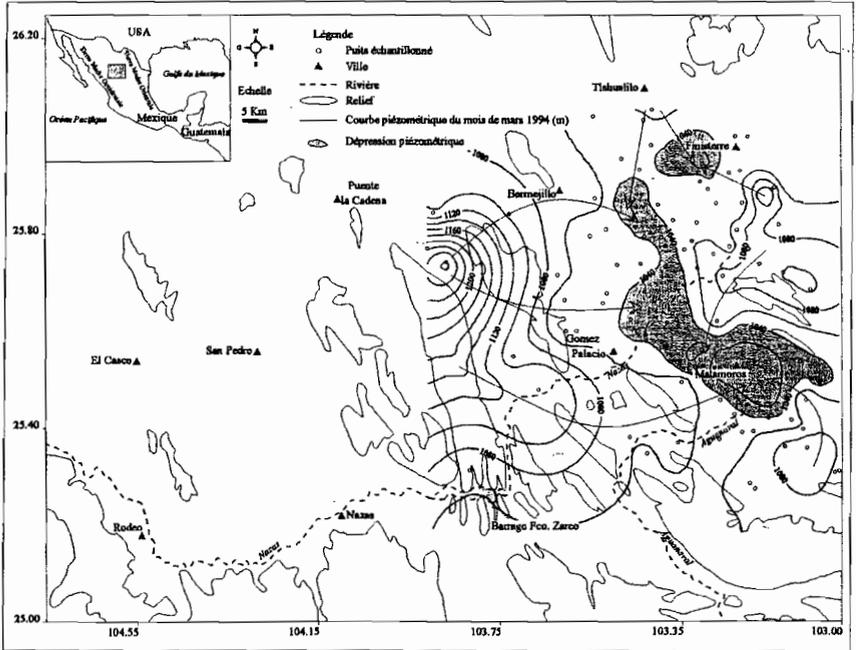


Figure 7 : Courbes piézométriques de la Comarca Lagunera en mars 1994 (Brouste, 1996)

Dans la partie basse de la RH36, les eaux usées représentent une ressource complémentaire pour l'agriculture irriguée. La zone urbaine de Torreón-Gomez Palacio, au cœur de la Laguna, fournit 50 millions de m³ par an d'eaux qui après recyclage, sont utilisées en irrigation (Gonzalez Barrios et Loyer, 1995). Toutefois, ces eaux ne font l'objet d'aucun traitement physico-chimique préalable, ce qui crée un risque sanitaire.

5. La qualité de l'eau

Une étude des caractéristiques chimiques des eaux permet de connaître les processus qui conditionnent leur contenu minéral et leur qualité. Tous les groupes hydro-chimiques classiques sont représentés dans les eaux du bassin Nazas-Aguanaval : leur teneur en matières minérales dissoutes va de 25 à 16 500 ppm (milligrammes par litre), et le pH de 6.3 à 9.2 (Gonzalez Barrios, 1992 ; Gonzalez Barrios, 1997).

Les eaux superficielles se caractérisent par une faible teneur en minéraux dissous ; elles sont en général bicarbonatées. De la partie haute à la zone aval du bassin du Nazas, les eaux de ruissellement montrent une augmentation de leur contenu dissout. Ainsi, l'écart entre les 25 mg/l d'un affluent du haut bassin et les 350 mg/l de l'eau du barrage San Fernando situé environ 500 km en aval, est le produit du brassage avec les eaux d'autres affluents du Nazas, et de la mise en contact avec divers matériaux géologiques et autres

couvertures pédologiques des versants où ces eaux s'écoulent : d'origine volcanique dans la partie amont, mixte (vulcano-sédimentaire) dans le bassin moyen, et sédimentaire dans la zone aval.

Les eaux souterraines présentent une plus grande variabilité des teneurs minérales dissoutes (de 140 à 16 500 mg/l) et des familles hydro-chimiques. Cependant, dans une grande partie de la RH36, les eaux souterraines sont marquées géochimiquement par la calcite et le gypse, minéraux qui saturent surtout les eaux les plus concentrées de la zone aval.

Par rapport à l'âge des eaux souterraines de cette zone basse (Brouste, 1996 ; Brouste *et al.*, 1997), les eaux récentes alimentées par l'écoulement ou la pluie sont les moins salines, avec un faciès bicarbonaté calcique quand elles ont une relation directe avec les eaux de surface ; et de faciès sulfato-calcique quand elles ont eu une évolution géochimique par mélange avec des eaux d'âge intermédiaire.

Les eaux d'âge intermédiaire ont un faciès essentiellement sulfato calcique qui s'explique par leur contact avec des formations riches en gypse.

Les eaux anciennes sont les plus salines et ont un faciès sulfato sodique, produit d'une évolution géochimique avancée en milieu sédimentaire, qui provient de la dissolution du gypse et de l'échange calcium-sodium avec les argiles.

La dégradation de la qualité des eaux souterraines traduite par une augmentation du contenu en minéraux dissous (Gonzalez Barrios, 1992), s'explique par les modifications du gradient hydraulique souterrain provoquées par l'intensité de l'extraction d'eau de l'aquifère (Brouste, 1996 ; Brouste *et al.*, 1997).

L'impact de ces changements de gradient souterrain a une grande répercussion du fait des problèmes de contamination :

- des eaux douces récentes (dont des eaux potables) par les eaux anciennes salées,
- des sols agricoles sensibles qui sont irrigués par des eaux de mauvaise qualité, leur apportant en moyenne 7,6 tonnes de sels par hectare et par an (Gonzalez Barrios, 1997).

6. Bilan et devenir de l'eau

Le bilan annuel de la quantité d'eau captée et consommée dans la RH 36 peut se résumer comme suit :

APPORTS (10⁶m³ an⁻¹)		
* eaux superficielles		1 200
* recharge de l'aquifère		300
sous-total		1 500
PRÉLÈVEMENTS (10⁶m³ an⁻¹)		
* en eaux de surface		1 200
* en eaux de pompage		1 300
sous-total		2 500
BILAN TOTAL (10⁶m³ an⁻¹)	DEFICIT	1 000
<i>(d'après données de la Comisión Nacional del Agua, México)</i>		

Le déficit de un milliard de m³ par an est couvert par des eaux non-renouvelables, c'est-à-dire par le pompage de la réserve d'eau souterraine, ce qui induit l'abaissement annuel déjà évoqué du niveau phréatique (fig. 6).

La consommation d'eau d'irrigation continuera à diminuer probablement comme elle le fait depuis deux décennies déjà, du fait du coût chaque fois croissant de l'extraction des eaux profondes et de l'épuisement de quelques compartiments de la nappe souterraine. Toutefois, la croissance démographique et économique de la « Comarca lagunera » pourrait provoquer un accroissement de la consommation d'eaux souterraines (pour l'usage domestique et industriel). La population est ainsi passée de 260 000 habitants en 1960 à 840 000 aujourd'hui (soit une croissance annuelle de plus de 4 % en moyenne), et de nombreuses usines s'installent chaque année, en particulier les usines sous douane (maquiladoras) attirées par les bas coûts de main d'œuvre et la proximité du marché étatsunien. Il faut d'ores et déjà surveiller de près cette consommation, afin de ne pas aggraver la surexploitation de l'aquifère. Il est également primordial de s'assurer qu'il n'y ait pas contamination des nappes par les utilisateurs agricoles et industriels, ou par les décharges sauvages qui apparaissent sur les zones de recharge de l'aquifère comme le lit du Nazas.

7. Alternatives

Avant la construction du barrage Lazaro Cardenas (El Palmito), il existait déjà une exploitation intense des réserves en eaux souterraines. La variabilité des apports au barrage est forte, bien qu'il s'agisse de la zone où les écoulements sont les plus constants (fig. 8).

L'extension des zones irriguées et la sécheresse des décennies 1940 et 1950 ont accéléré la baisse de la nappe.

A partir de ce moment, on a pensé à chercher des volumes d'eau supplémentaires dans d'autres régions hydrologiques voisines pour approvisionner la RH36 ; cependant, à présent, ces régions aussi sont parfois devenues déficitaires en eau renouvelable. Actuellement, dans la zone aride et semi-aride du Centre-Nord du Mexique, on utilise la totalité des eaux d'écoulement superficiel essentiellement pour l'irrigation. C'est ainsi que les projets pour importer de l'eau des États de Zacatecas et Chihuahua sont désormais impossibles à réaliser.

Plus récemment l'agence chargée de la gestion de l'eau, la Comisión Nacional del Agua (CNA) a pensé faire un tunnel sous la Sierra Madre Occidentale, pour dévier les eaux du versant ouest, plus abondantes, vers le versant est. Cette option, bien que coûteuse, est techniquement possible et intéressante : il pleut localement plus de 1 200 mm sur le versant occidental de la sierra, et les coefficients d'écoulement y sont plus élevés ; cependant, durant les années sèches 1994 et 1995, les barrages, dans les basses vallées du versant ouest, se sont vidés dangereusement, si bien que la réalisation de ce projet poserait de graves problèmes à long terme sur le bilan de l'eau dans cette région voisine.

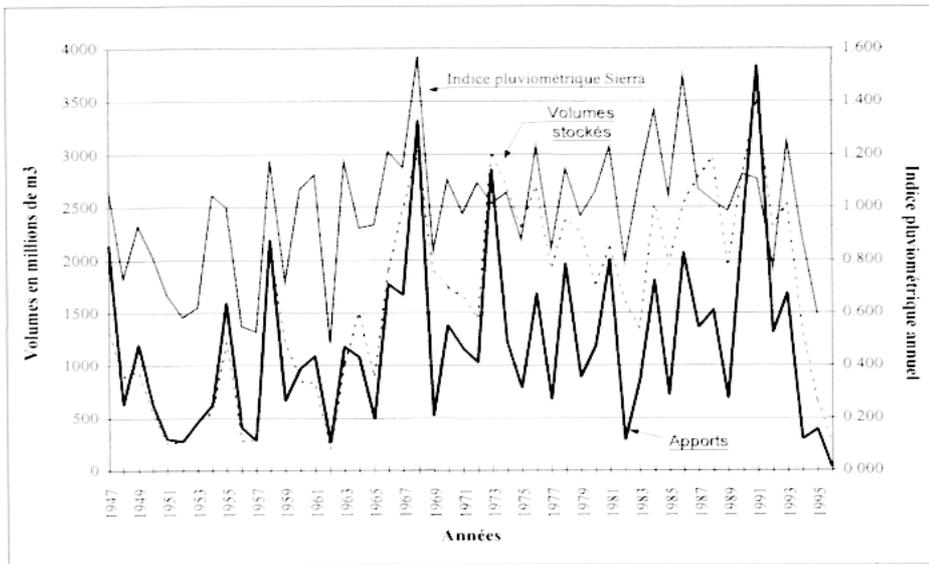


Figure 8 :
Retenue El Palmito.
Apports et volume
stockés. Indice
pluviométrique annuel de
la Sierra Madre
occidentale

Trait plein : indice pluviométrique
 Trait épais : apports annuels
 Trait pointillé : volume stocké

Il manque peut être aussi, dans ces régions occupées récemment, une culture de la préservation et pérennisation du milieu comme celle que l'on trouve autour du bassin méditerranéen (Floret *et al.*, 1989) ou dans les sociétés hydrauliques du Moyen Orient ou d'Asie du Sud Est.

Ces perspectives sont à insérer dans le cadre de la nouvelle législation mexicaine, où les ejidos (communautés agraires constituées après la Révolution Mexicaine) sont de fait dissous : dans les zones de pâturage extensif, cela ne modifie pas le type d'exploitation des sols. Par contre, dans le périmètre irrigué, les ejidatarios (membres des ejidos) décident souvent de vendre leur terre et leur droit d'eau ; ceci était l'un des buts de l'abolition des ejidos, et permet d'agrandir les exploitations et les parcelles (ce sont des propriétaires privés qui achètent les terres). En principe, cela pourrait amener les exploitants à diminuer le volume d'eau extrait de la nappe, puisque jusqu'à présent, l'eau gravitaire venue des barrages était réservée aux ejidos, les propriétés privées pompant l'eau nécessaire à leur exploitation dans la nappe. La réforme a également conduit à réviser le prix de l'eau ; les paysans payaient celle-ci à un prix symbolique jusqu'en 1994 ; depuis le prix de vente de l'eau tend à rejoindre son prix de revient et il en est attendu une baisse de la consommation agricole, en même temps qu'une optimisation de son utilisation.

Les mesures à suggérer pour éviter une hausse de la consommation d'eau dans les années à venir sont les suivantes :

- une « technification » de l'irrigation, avec le goutte à goutte, la fertirrigation, et d'autres techniques, nombreuses, déjà testées expérimentalement dans la Laguna ; leur généralisation pourrait permettre d'économiser 30 % du volume d'eau utilisé ;
- un retour à une production plus variée ; aujourd'hui, 80 % de la surface utile est plantée en luzerne, destinée à l'alimentation de vaches laitières sélectionnées en stabulation libre, ce qui, malgré de bons rendements (plus de 30 l/jour/vaches) n'est pas économe en eau : il faut 1 000 litres d'eau pour produire un litre de lait. L'adoption de cultures et de fourrages d'hiver permet de limiter l'évaporation, de 30 à 40 % sur l'année, mais avec une légère diminution de la qualité des fourrages.

La généralisation de ces mesures permettrait de consommer moins d'eau au niveau agricole, donc de limiter le surpompage, et à terme, de dégager les quantités d'eau nécessaires pour l'industrie et les villes. Il faudrait aussi veiller à limiter l'implantation d'industries fortes consommatrices d'eau ; les maquiladoras sont le plus souvent des entreprises textiles qui ne consomment pas de gros volumes d'eau.

L'intégration du Mexique dans l'ALENA (Alliance de libre-échange nord-américaine) a conduit le gouvernement à régler le problème par la voie libérale ; les producteurs ont une dizaine d'années pour s'adapter au prix réel de l'eau ; ce sont en général ceux qui ont accès aux capitaux (c'est-à-dire les propriétaires privés d'avant la réforme actuelle) qui ont les moyens de s'en sortir.

Conclusion : la nécessité d'économiser l'eau et de préserver le milieu naturel

Du fait qu'il n'y ait pas d'alternatives pour augmenter le volume d'eau disponible, l'unique solution est de faire un usage plus efficace et contrôlé de l'eau renouvelable pour couvrir les besoins de la région, cela sans toucher aux réserves d'eaux souterraines dont la surexploitation actuelle provoque des problèmes de contamination. Globalement, il faudrait baisser de 40 % la consommation d'eau pour équilibrer le bilan actuel.

Dans le domaine agricole, il est urgent de mettre en pratique des techniques d'irrigation de précision qui permettent une économie considérable de l'eau tout en maintenant ou augmentant le niveau de la production. Une autre option possible simultanément est de promouvoir les cultures d'hiver qui consomment moins d'eau en irrigation.

L'approvisionnement en eau renouvelable dépend de la Sierra Madre, qui est la principale zone d'apports en eau de surface et en eau de recharge de la nappe de la Comarca Lagunera (Brouste, 1996). Il est donc très important d'y protéger la végétation et les sols ; depuis deux ou trois décennies, ces ressources sont très intensément exploitées.

La dégradation des bassins versants par déforestation et surpâturage est réelle et sévère. Cela représente à moyen terme moins d'eau renouvelable pour la Laguna et un risque de désertification. Il est urgent de fait, de prendre des mesures pour limiter la dégradation du milieu dans la Sierra Madre Occidentale, et les atteintes au cycle hydrologique.

Bibliographie

BILLE J.-C., 1992. – Tendances évolutives comparées des parcours d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique de l'Est. in « L'aridité, une contrainte au développement », coll. Didactiques, Orstom éditions, pp. 179-196.

BROUSTE L., 1996. – Hydrochimie et géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique) ; thèse Université Paris XI-Orsay, 220 p.

- BROUSTE L., MARLIN C., DEVER L., GONZÁLEZ BARRIOS J.-L., 1997. – Hidroquímica y Geoquímica isotópica del manto freático de la Comarca Lagunera (Norte de México). Memorias del 25 aniversario del CENID-RASPA INIFAP-SAGAR. Gómez Palacio, Dgo. México p 87-100.
- DESCROIX L. et NOUVELOT J.-E., 1997. – Esgurrimento y erosión en la Sierra Madre Occidental folleto científico n° 7, INIFAP/ORSTOM, Gomez Palacio, 50 p.
- FAURÉS J.-M., 1997. – Évaluation régionale des ressources en eau au moyen d'un SIG : le cas du bassin du Niger. Actes de l'atelier « Télédétection et ressources en eau », FAO, Montpellier, p. 41.
- FERRER J.-A., MENDIA J., IRISARRI H.-I. et FIGUEIRA H.-L., 1984. – Degradación de los suelos en la alta cuenca del río Neuquén. Aplicación de la metodología de la FAO. Actas del seminario « Metodología regional del proceso de desertificación ; Universidad nacional del Comahue », 1984, pp. 67-86.
- FLORET C., PONTANIER R. et SOUISSI A., 1989. – Optimisation de l'utilisation de l'eau en zone aride méditerranéenne. In Actas del seminario Mapimi, Orstom/Instituto de Ecologia, Xalapa, Mexico, pp273-284.
- GONZALEZ-BARRIOS J.-L., 1992. – « Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine : exemple dans la Comarca Lagunera » ; thèse de l'Université Montpellier II, 315 p.
- GONZALEZ-BARRIOS J.-L., 1997. – El ensalitramiento por riego en la Comarca Lagunera. en : memorias del 25 aniversario del CENID-RASPA INIFAP-SAGAR. Gómez Palacio, Dgo. México p 37-41.
- GONZÁLEZ BARRIOS J.-L. and J.-Y. Loyer. 1995. – Availability and Quality of irrigation waters in Arid « Lagunas » of Northern Mexico. Transactions of the International Symposium on Salt-Affected Ecosystems. ISSS-Univ. of Valencia, Spain. September 1995. 192-193.
- LEPRUN J.-C. et DA SILVEIRA C.O., 1992. – Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides : le Sahel de l'Afrique de l'Ouest et le Nordeste Brésilien. : in « L'aridité, une contrainte au développement », coll. Didactiques, Orstom éditions, pp. 131-153.
- NOUVELOT J.-E. et DESCROIX L. 1996. – Aridité et sécheresses du Nord-Mexique ; Trace, revue du CEMCA (Centre d'Études Mexicaines et Centro-Américaines), n° 30, pp 9-2.
- POURRUT P. et NUNEZ, 1995. – Agua, ocupación del espacio y economía campesina en la región atacameña. Orstom/Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chili, 110 p.
- RIGAL G., 1988. – Étude du problème de l'irrigation dans une région agricole du Centre-Nord Mexique. Mémoire de fin d'étude, INAPG, 100 p.
- RODRIGUEZ M.G., 1997. – « Determinación de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental para su calibración por percepción remota » tesis de licenciatura, Universidad Juárez del estado de Durango, 57 p.
- SIRCLOULON J., 1992. – Caractéristiques des ressources en eau de surface en zones arides de l'Afrique de l'Ouest. Variabilité et évolution actuelle. in « L'aridité, une contrainte au développement », coll. Didactiques, Orstom éditions, pp. 53-68.
- VIRAMONTES D., 1995. – Caracterización de los suelos y la vegetación en la parte alta de la cuenca del Nazas ; folleto científico n° 3, INIFAP/ORSTOM, 42 p.
- VIRAMONTES D. et DESCROIX L., 2000. – Dégradation progressive du milieu et conséquences hydrologiques. Étude de cas dans la Sierra Madre Occidentale (Mexique). Soumis à la Revue de Géographie Alpine, Grenoble

Résumé : Le bilan de l'eau dans une région semi-aride du Nord-Mexique est fortement négatif, du fait d'une surconsommation d'eau notoire dans un périmètre irrigué de 150 000 hectares. Le climat aride oblige à irriguer avec d'abondantes quantités d'eau. La consommation dépasse de près de un milliard de mètres cubes chaque année le volume d'eaux renouvelables. Ce déficit est comblé par un surpompage dans la nappe ; de ce fait, le niveau de celle-ci s'abaisse rapidement, rendant le coût d'extraction plus fort ; par ailleurs, la qualité des eaux de pompage se dégrade, rendant chaque jour plus aléatoire l'avenir de l'irrigation dans la Laguna, région peuplée de plus d'un million d'habitants et principal bassin laitier mexicain. Devant la faiblesse des alternatives possibles, il est urgent de faire encore baisser la consommation d'eau et de préserver le milieu naturel dans le haut bassin du Nazas, principale zone d'apport en eaux de surface.

Mots-clés : zones arides, irrigation, bilan de l'eau, nappe phréatique, Nord Mexique

Abstract : A semiarid region of northern Mexico has a very negative water balance because of water overuse in irrigated districts (150 000 ha). Water consumption is one billion cubic meters higher than renewable water yearly. This deficit volume is taken from groundwater provoking a decrease of the water table level, and an enhancement of the pumping cost. Moreover, the quality of pumping water decreases making unsustainable the irrigation of the Laguna region (1 million of inhabitants and first milk producer region of Mexico). It is urgent to diminish the volume of water consumption and restore the natural environment of the Nazas river higher basin, which is the main water yield supply.

Keywords : arid zones, irrigation, water balance, groundwater, Northern Mexico

Resumen : El balance de agua en una región semiárida del Norte de México es fuertemente negativo por el sobreuso de agua en sus tierras de riego (150 000 ha). El clima árido obliga a regar con abundantes cantidades de agua. El consumo sobrepasa en mil millones de metros cúbicos, cada año, el volumen de aguas renovables. Ese volumen déficit es bombeado de las aguas subterráneas lo cual provoca un rápido abatimiento del acuífero, aumentando los costos de bombeo ; además la calidad de las aguas bombeadas se degrada haciendo cada día menos sostenible el riego en la Laguna, región con más de un millón de habitantes y principal productora de leche en México. Ante las pocas alternativas posibles, es urgente disminuir el volumen de agua consumido y preservar el medio ambiente natural de la cuenca alta del río Nazas, principal zona de aporte de aguas de escurrimiento.

Palabras claves : zonas aridas, riego, balance de agua, manto fréatico, Norte de México