

Gestion de l'eau et des sols au Nord-Mexique dans la région hydrologique 36 (RH 36)

Ce premier article de synthèse fait le bilan des connaissances acquises par le projet Cenid Raspa/Orstom (nouvellement IRD) à propos de l'usage et de la gestion de l'eau et des sols à l'échelle de la région hydrologique 36 (RH 36). Trois articles présentent ensuite, pour chacune des sous-régions – la zone montagneuse sub-humide, la zone semi-aride et la zone aride – les problèmes posés par la gestion des eaux et des sols. Un dernier article présente le cas original du bassin-versant du *Río Aguanaval* dans cette même région.

Climats de la région hydrologique 36

Circulation atmosphérique

Le climat du Nord-Mexique et plus particulièrement celui de la RH 36, partie méridionale du Nord-Mexique (*figure 1*), est influencé par la proximité du tropique du Cancer. Il est défini à la fois par la circulation atmosphérique zonale à cette latitude, par les reliefs des *Sierras Madre* occidentale et orientale et par l'arrivée des eaux froides du courant océanique de Californie.

Dans cette région du globe, la circulation atmosphérique (*figure 2*) est caractérisée par l'existence des alizés, de secteur nord-est, et par la position des hautes pressions qui couvrent toute la partie occidentale du Mexique en hiver mais qui remontent en latitude jusqu'en Californie mexicaine en été. Des masses d'air humide en provenance du golfe du Mexique peuvent alors envahir l'*Altiplano* mexicain [1]. Elles rencontrent

d'autres masses d'air humide en provenance du Pacifique au niveau de la *Sierra Madre* occidentale où se crée le front tropical mexicain (FTM, *cf. figure 2*), générateur des phénomènes convectifs les plus fréquents.

Les reliefs de la *Sierra Madre* occidentale (*figure 3*) font obstacle à l'entrée des flux humides en provenance du Pacifique, de telle sorte que les précipitations ont tendance à diminuer d'ouest en est, de la partie haute vers la partie basse de la RH 36. Au cours des mois de septembre et octobre, les cyclones qui se forment sur l'océan Pacifique peuvent passer la barrière naturelle de la *Sierra Madre* occidentale et arroser les zones semi-arides et arides du Nord-Mexique, alors que les cyclones formés sur l'océan Atlantique se dirigent vers la côte nord du golfe du Mexique.

Aridité croissante de la *Sierra* vers l'*Altiplano*

Pour caractériser l'aridité [2], l'Unesco a proposé en 1977 d'utiliser le rapport (R)

Jean-Marie LAMACHÈRE

Mission IRD, BP 434,
1004 Tunis El Menzah, Tunisie.

Juan ESTRADA
José Luis GONZALEZ BARRIOS

Inifap Cenid-Raspa,
AP 225-3 ZI Gomez Palacio DGO,
35071 Mexico.

Luc DESCROIX

LTHE, BP 53,
F-38041 Grenoble Cedex 9,
France.

Références

1. Santibañez E. *Ensayo monográfico de la Laguna Torreón Coah (Mexique)* : publié à compte d'auteur, 1992 ; 240 p.
2. Nouvelot JF, Descroix L. Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. *TRACE (Mexico)* 1996 ; 30 : 9-25.
3. Hiez G, Cochonneau G. *MVR 1,5, la méthode du vecteur régional*. Montpellier : Orstom, Laboratoire d'Hydrologie 1992 ; 200 p.
4. Estrada Avalos J, Bouvier C, Descroix L. Régimen pluviométrico. In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 : 25-61.
5. García Herrera G. Variabilidad de los elementos del clima. In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 : 121-42.
6. Rivera Gonzalez M, Viramontes Pereida D. Sistemas de topofomas y unidades de suelos. Características hidroclimáticas del suelo. Fases físicas y químicas de los suelos. In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 : 175-221.
7. Inifap-Sagarpa. *Productividad de los cultivos forrajeros bajo condiciones restrictivas de salinidad de los suelos y agua de riego en la Comarca Lagunera*. Inifap Celala, 2001 (Reporte Interno).
8. Tarin Torres G. La vegetación natural. In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 : 223-44.
9. Orona Castillo I. Caracterización socio-económica. In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 : 247-72.
10. Barral H, Orona Castillo I, Anaya E. Manejo ganadero en relación con el recurso agua. In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 : 287-304.

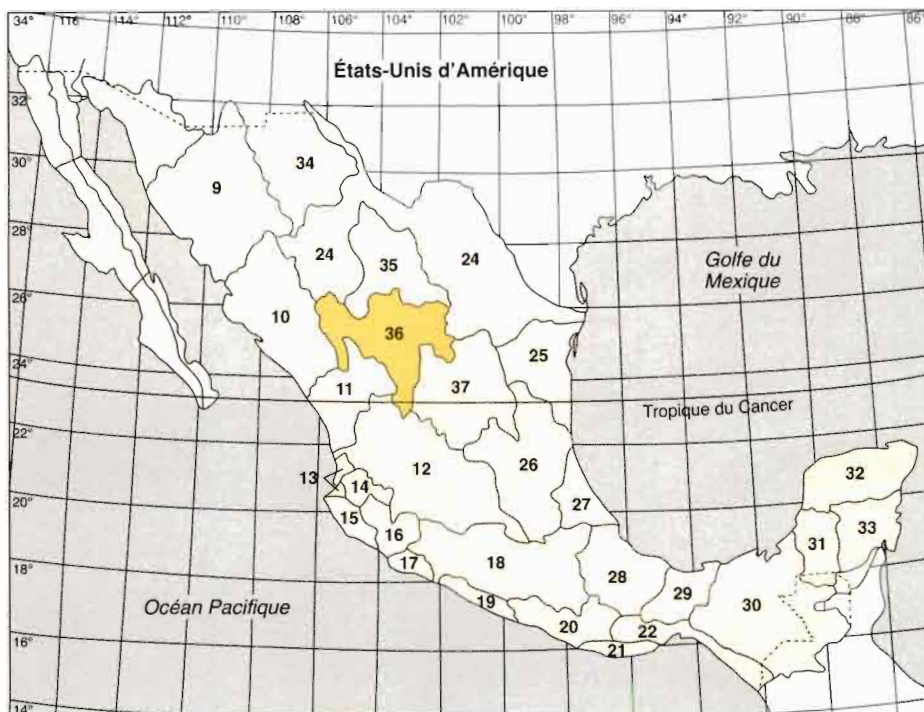


Figure 1. Localisation de la région hydrologique 36 au Mexique.

des moyennes entre la pluviométrie (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

$$R = P/ETP$$

La valeur $R = 0,5$ définit le seuil critique au-dessous duquel la végétation cesse de croître.

Les classes d'aridité peuvent donc être définies à partir des valeurs de ce rapport :

- $R < 0,03$: hyper-aride ;
- $0,03 < R < 0,20$: aride ;
- $0,20 < R < 0,50$: semi-aride.

L'analyse de la pluviométrie annuelle (Pan) par la méthode du vecteur régional (MVR) [3], appliquée aux 123 stations pluviométriques de la RH 36 [4], et la prise en considération des valeurs du rapport entre la pluie annuelle et l'évapotranspiration potentielle annuelle (Ran) ont permis de différencier trois sous-régions au sein de la RH 36 (figure 4) [2] :

- 1) la zone sub-humide, qui comprend la Sierra Madre occidentale et les plateaux de l'État de Durango, où $Pan < 500$ mm et $0,40 < Ran < 0,50$ mais avec 3 mois où R_{mois} est voisin de 0,35 ;
- 2) la zone semi-aride, qui couvre le piedmont de la Sierra Madre occidentale et le haut bassin du Río Aguanaval au sud de la RH 36, où $300 < Pan < 500$ mm

et $0,20 < Ran < 0,40$ avec 1 à 2 mois où $R_{mois} > 0,35$.

3) la zone aride, qui comprend du nord vers le sud le Bolsón de Mapimi, la lagune de Máyan et celle de Viesca, où $Pan < 300$ mm et $0,15 < Ran < 0,20$ et aucun mois où $R_{mois} > 0,35$.

Les principaux facteurs explicatifs de la répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes [5] sont l'altitude ($Pan = 0,3$ Altitude - 100 ; $r^2 = 0,67$; 106 stations) et la distance à l'océan Pacifique ($Pan = -1,22$ Distance + 826 ; $r^2 = 0,64$; 106 stations), ces deux variables étant d'ailleurs très étroitement liées.

La répartition mensuelle des précipitations présente une grande homogénéité sur l'ensemble de la région. Nouvelot et Descroix [2] ont défini un profil type (figure 5) de la répartition mensuelle des précipitations. Ce profil est caractérisé, du mois de juin au mois de septembre, par un cumul de 78 % de la pluie totale annuelle, tandis que les mois de décembre à mars ne cumulent que 8 % du total annuel.

Températures et climats

Dans la région hydrologique 36, la température varie essentiellement avec l'altitude. La température moyenne varie de

8 °C à 3 000 mètres d'altitude, sur les sommets de la *Sierra Madre* occidentale, à 24 °C à 1 000 mètres d'altitude dans les lagunes de *Máyran* et de

Viesca. Garcia Herrera [5] a déterminé les gradients thermiques suivants :
 - 0,62 °C pour 100 mètres de dénivelé dans la partie haute ;

- 0,43 °C pour 100 mètres de dénivelé dans la partie basse.
 En utilisant le principe de la classification de Wilhelm Köppen, Garcia Her-

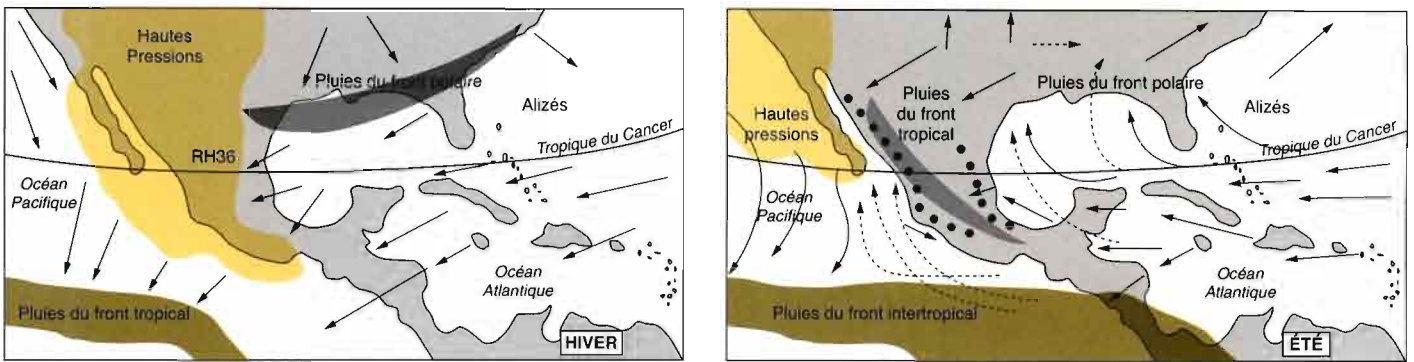


Figure 2. Circulation atmosphérique au nord-Mexique.

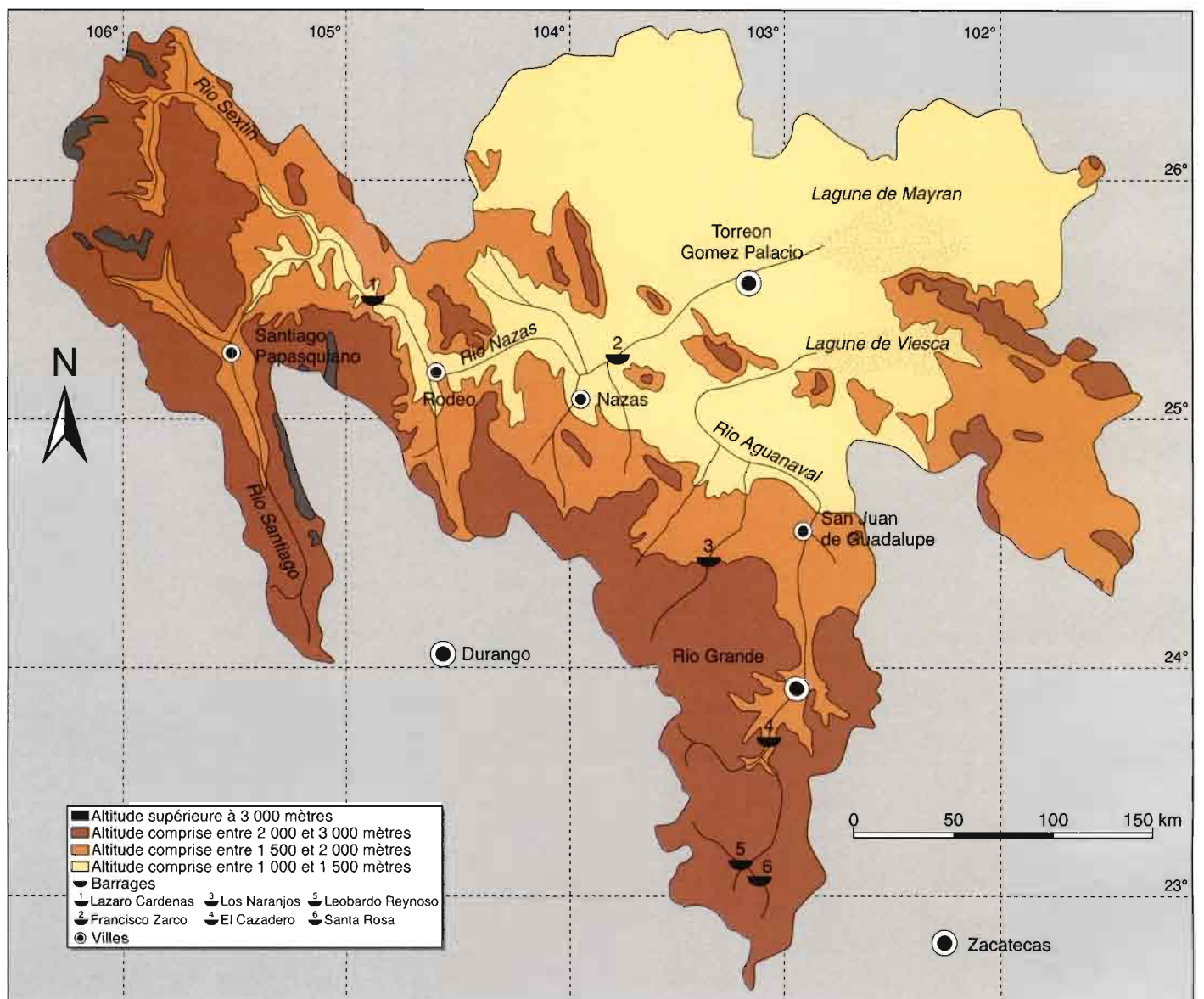


Figure 3. Topographie et hydrographie de la région hydrologique 36.

Références

11. Viramontes Pereida D. *Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre occidentale, Mexique). Causes et conséquences de son évolution.* Thèse de doctorat de l'Université Joseph-Fourier, Grenoble I, 2000 ; 449 p.
12. Orona Castillo I, Voisin O. *Agricultura de temporal.* In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36.* Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 ; 273-85.
13. Gonzalez Barrios JL. *Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine : exemple dans la « Comarca Lagunera ».* Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 1992 ; 316 p.
14. Loyer JY, Moriaud S. *Tipología de las unidades del paisaje en la región hidrológica 36.* Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1996 ; 111 p.
15. Rodriguez MG. *Determinación de la vegetación en la Sierra Madre occidental para la calibración de imágenes satélite.* Durango (Mexico) : ECF-UJED, 1997 ; 60 p.
16. Descroix L, Estrada Avalos J, Bouvier C. *Hidrometría.* In : Loyer JY, Estrada Avalos J, Jasso R, Moreno Diaz L, eds. *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36.* Gómez Palacio : Inifap Cenid-Raspa/Orstom, 1993 ; 63-117.
17. Estrada Avalos J. *Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du nord-Mexique.* Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 1999 ; 462 p.
18. Gonzalez Hita L, Sanchez Diaz F, Mata Y. *Estudio hidrogeoquímico e isotrópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera, México. Estudios de hidrología isotrópica en América Latina sobre recursos hídricos y la contaminación de aguas subterráneas.* Vienna : AIEA, TECDOC 835, 1995 : 237-76.
19. Brouste L. *Hydrochimie et géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique).* Thèse de doctorat, Université Paris-Sud Orsay, 1996 ; 227 p.

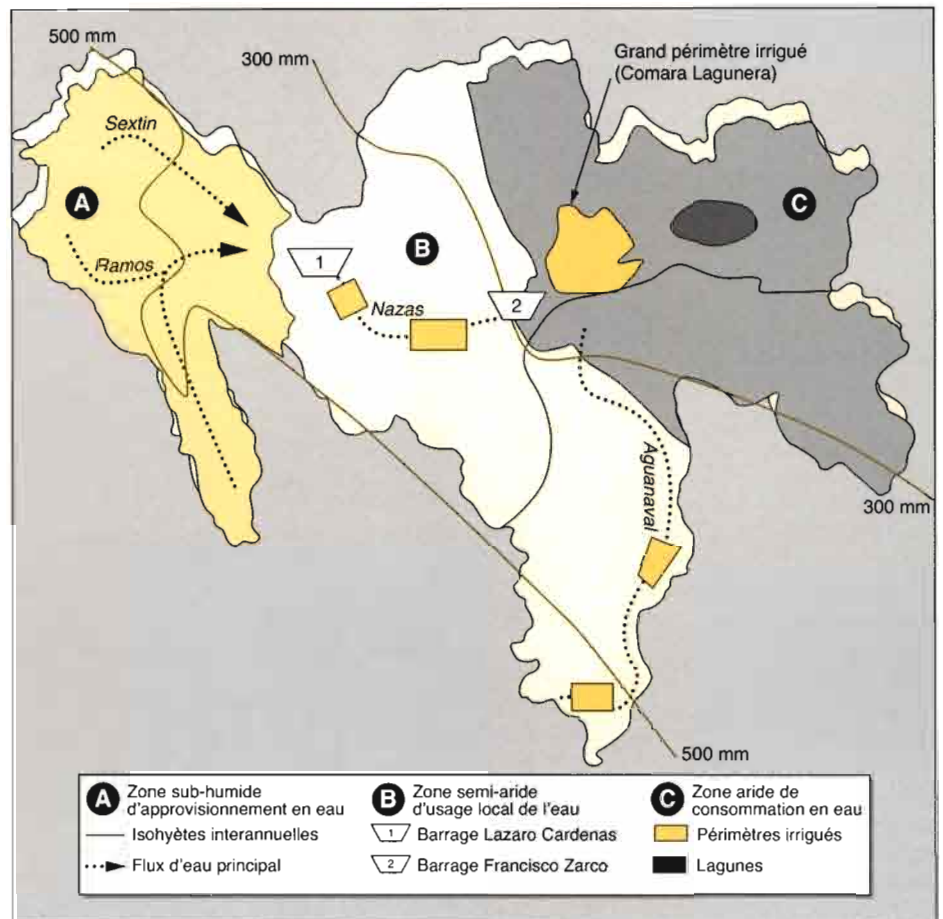


Figure 4. Les zones hydroclimatiques homogènes de la RH 36.

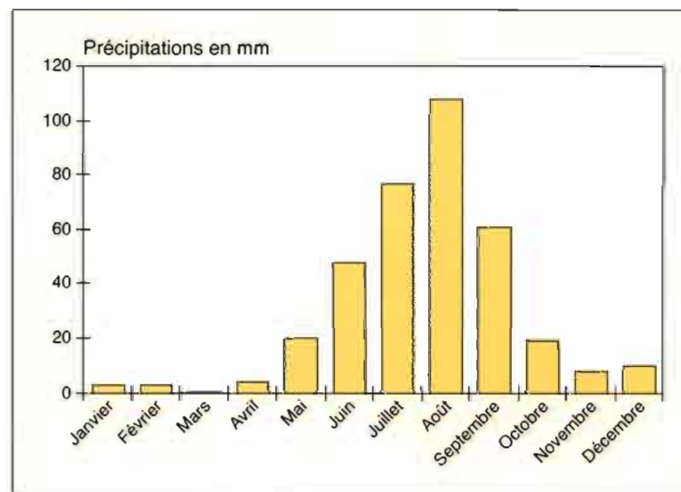


Figure 5. Répartition mensuelle des précipitations dans la RH 36.

ra [5] a identifié 24 types de climats avec, comme premier critère, la pluie annuelle (types sub-humide, semi-aride et aride), comme deuxième critère, la température (types assez froid, tempéré, assez chaud et très chaud) et, comme troisième critère, l'importance des pluies hivernales en pourcentage

de la pluie annuelle (supérieur à 18 % ; de 10,2 à 18 % ; de 5 à 10,2 % ; inférieur à 5 %). Le climat semi-aride tempéré (46 % de la superficie) domine la partie haute de la RH 36 tandis que le climat aride et assez chaud (72 % de la superficie) caractérise la partie basse.

Sols et leur couverture végétale

Sols bien différenciés

Treize unités de la classification des sols FAO/Unesco (1970) sont représentées dans la RH 36 [6]. Le *tableau I* présente les principales caractéristiques de ces sols ainsi que leurs pourcentages de recouvrement sur les parties haute et basse de la région. Trois types de sols occupent près de 70 % de la superficie totale de la RH 36 :

– les *lithosols*, sols peu profonds à texture grossière associés aux affleurements rocheux, sont répartis en forte proportion dans les parties haute et basse ;

– les *xérosols*, sols profonds à texture moyenne associés aux matériaux sédimentaires alluviaux, caractérisent plutôt la partie basse ;

– les *phaeozems*, sols de profondeur moyenne à texture moyenne et forte pierrosité, sont associés aux roches éruptives de la partie haute.

Les autres sols profonds couvrent 10 % de la partie haute (*castañozems* – brunizems en français), essentiellement sur le bassin versant du *Río Aguanaval*, et 11 % de la partie basse (*yeremosols*), principalement sur le bassin du *Río Nazas*.

La caractérisation de la phase lithique des sols a permis de distinguer les sols :

– sans phase lithique, les plus nombreux (55 %) ;

– à phase lithique rocheuse d'origine volcanique (rhyolite, 21 %) ;

– à phase lithique calcaire (17 %).

Les sols à phase lithique calcaire, ou les sols situés en aval de formations rocheuses calcaires, sont caractérisés par des phénomènes d'encroûtement (*caliche*). Les problèmes de salinité affectent 32 % des sols de la partie basse et aride. Ils sont liés à leur origine alluviale, sous des conditions climatiques de forte aridité et d'endoréisme favorisant l'accumulation des sels.

Ils sont liés également à l'usage d'eaux souterraines salées pour l'irrigation. Environ 20 000 hectares de cultures irriguées ont des problèmes de salinité primaire ou secondaire [7].

Végétation adaptée à l'aridité

Quatre formations végétales occupent près de 90 % de la superficie de la RH 36 (*tableau II*) [8].

Tableau I. Les principales unités de sols dans la RH 36

Unité	Profondeurs en cm	Texture	Capacité au champ (mm)	Superficie en %		RH 36
				Partie haute	Partie basse	
Lithosol	0 à 10	Grossière	25	33	40	36
Rendzina	20	Grossière à moyenne	50	9,2	1,3	6,1
Regosol	20 à 50	Grossière à moyenne	48-120	9,3	5	7,5
Cambisol	50 à 100	Grossière à fine	135-270	3	0	1,8
Phaeozem	50 à 100	Moyenne à fine	155-310	22	0	13
Fluvisol	+ 100	Grossière	160	0,3	0,9	0,5
Brunizem	+ 100	Grossière à fine	260	10	0,1	6,0
Xérosol	+ 100	Moyenne	260	12	33	20
Chernozem	+ 100	Moyenne	330	0,4	0,3	0,4
Yermosol	+ 100	Moyenne à fine	270	0,1	11	5,0
Solonchak	+ 100	Moyenne à fine	270	0,1	8	3,2
Vertisol	+ 100	Fine	300	0,3	0,4	0,3
Solonetz	+ 100	Fine	190	0,3	0	0,2

Phaeozem est l'expression française de *Faeozem* ; *Brunizem* est l'expression française de *Castañozem*.

Tableau II. Les principales espèces végétales de la RH 36 [8]

Le matorral xérophile à petites feuilles

Larrea tridentata, *Flourensia cernua*, *Parthenium incanum*, *Acacia* spp., *Prosopis glandulosa*, *Prosopis juliflora*, *Fouquieria splendens*

Le matorral xérophile à feuilles en rosettes

Agave lecheguilla, *Agave asperrima*, *Yucca filifera*, *Yucca carnerosana*, *Dasyliroton* spp.

Le matorral xérophile à plantes grasses

Opuntia rastrera, *Opuntia microdasys*, *Opuntia leucotricha*, *Opuntia streptacantha*, *Opuntia imbricata*

La formation halophile de playa

Suaeda suffrutescens, *Suaeda* spp., *Sesuvium portulacastrum*, *Sesuvium verrucosum*, *Atriplex* spp., *Salsola kali*, *Allenrofea occidentalis*

La forêt de conifères

Pinus cembroides, *Pinus engelmanni*, *Pinus leiophylla*
Genres : *Abies* ; *Pseudotsuga* ; *Juniperu* ; *Cupressus*

La forêt de chênes

Quercus macrophylla, *Quercus rugosa*, *Quercus grisea*,
Genres : *Arbutus* ; *Arctostaphylos*

Les pâturages

Bouteloua gracilis, *Bouteloua curtipendula*, *Bouteloua hirsuta*, *Mulhenbergia rigida*, *Mulhenbergia arizonica*, *Mulhenbergia pulcherrima*, *Tridens pulchellus*, *Lycurus phleoides*, *Aristida* spp., *Andropogon* spp.
Espèces halophiles : *Sporobolus airoides*, *Sporobolus spiciformis*, *Hilaria mutica*, *Distichlis spicata*

Le chaparral

Quercus emoreyi, *Acacia* spp., *Arctostaphylos pungens*, et plusieurs autres espèces du genre *Quercus*

• Le *matorral xérophile* (60 % de la superficie) est une formation végétale arbustive assez dense, bien adaptée à l'aridité. Elle est composée de trois sous-types caractérisés par des feuilles en rosettes (*rosetófilo*), des petites feuilles (*micrófilo*) et des plantes grasses (*crasicaule*). Le taux de recouvrement végétal de cette formation est

extrêmement variable, de très faible à moyen.

• Les *forêts de pins et de chênes* (15 % de la superficie) couvrent exclusivement la partie haute, montagneuse et sub-humide. Leurs taux de recouvrement végétal varient de 10 à 80 % en fonction de nombreux facteurs tels que la pente, l'épaisseur des sols, l'exposition et la pluviosité.

- Les *pâturages* (11 % de la superficie), formation végétale constituée principalement de graminées, couvrent surtout la partie haute mais également, en moindres proportions, les parties médiane et basse. Leurs taux de recouvrement végétal varient de 1 à 9 % dans la zone basse et dépassent 30 % dans la Sierra.

- Le *chaparral* (3 % de la superficie), formation arbustive dense à feuilles dures, résistantes au feu, est une formation secondaire des forêts de chênes en conditions plus arides. Son taux de recouvrement végétal varie de 20 à 40 %.

Usage des sols et des ressources végétales

La population de la RH 36 était estimée en 1990 à 1,6 million d'habitants [9] avec une densité moyenne de 23 habitants par km² et une répartition deux fois plus forte en zone urbaine qu'en zone rurale. La majorité de la population vit donc en milieu urbain, principalement dans les agglomérations de la partie basse et aride (figure 3) : Torreón, Gómez Palacio et Ciudad Lerdo. En milieu rural, sur le bassin du Río Aguanaval la population s'est accrue de 70 % sur la période 1970-1990, alors que celle du bassin du Río Nazas n'a augmenté que de 7,4 %. Cette différence est attribuée aux conditions topographiques et pédologiques plus favorables sur le premier bassin versant et à son équipement hydraulique constitué de plusieurs barrages de moyenne importance qui servent au développement local de l'agriculture, alors que sur le second la mobilisation des eaux superficielles sert principalement à l'irrigation de la partie basse et aride. À l'échelle de la région hydrologique 36, l'usage des sols est avant tout pastoral (61 % de la superficie), l'agriculture n'occupant que 12 % de la superficie totale de la région et l'exploitation forestière 4 %. Une superficie importante de la RH 36 (23 %) n'est affectée à aucun usage particulier.

Élevage extensif

L'élevage extensif est pratiqué dans toute la RH 36 mais avec une répartition du cheptel différente dans la partie haute et dans la partie basse [9].

En 1970 (tableau III), dans la partie haute sub-humide ou semi-aride, l'élevage bovin (49 % des effectifs) dominait nettement les autres formes d'élevage

alors que dans la partie basse et aride c'était l'élevage des ovins et des caprins qui dominait (43 % des effectifs). L'élevage des mulets et des ânes, des chevaux ou des porcs conservait sensiblement la même importance sur l'ensemble de la RH 36. Cependant, à effectif égal, la charge animale sur les pâturages [10] est à peu près trois fois plus faible dans le cas d'un élevage ovin et caprin que dans le cas d'un élevage bovin (tableau III). Elle est sensiblement plus forte pour un élevage équin.

À partir d'enquêtes effectuées sur 11 unités de production, Barral, Orona Castillo et Anaya [10] ont estimé que la charge moyenne supportée par les pâturages non dégradés était d'un bovin ou d'un équivalent bovin :

- pour 85 hectares entre 200 et 300 mm de pluie annuelle ;
- pour 15 hectares entre 300 et 500 mm de pluie annuelle ;
- pour 4 hectares entre 500 et 700 mm de pluie annuelle.

Cependant, la charge animale réellement supportée par les pâturages doit tenir compte de leur productivité en plantes consommées par le bétail, productivité qui varie d'une année à l'autre en relation avec l'abondance et la précocité des pluies. Elle varie également en fonction de la nature des sols et de l'exposition des versants.

En zone semi-aride, la gestion des pâturages dans le ranch *Atotonilco*, fondée sur un système d'enclos et une répartition du bétail dans ces enclos en fonction de la qualité et de la productivité des pâtures, constitue un bon exemple de gestion rationnelle des ressources végétales. En revanche, Viramontes Pereida [11] a montré que sur le haut bassin versant du Río Nazas, pour deux années à faible pluviosité, les années 1994 et 1997, la charge réelle supportée par les pâturages pouvait être 2,5 à 5 fois supérieure à leur capacité de charge. Dans ces condi-

tions, on observe une forte dégradation des pâturages et des sols autour des points d'eau, des villages et des axes de communication.

Élevage intensif

En 1986, une superficie de 166 000 hectares était consacrée dans la zone aride au développement des cultures fourragères contre seulement 60 000 hectares pour la culture du coton. En 1991, avec une production de 1,62 million de litres de lait par jour, la *Comarca Lagunera* est devenue la première région productrice de lait du Mexique. Cependant, la production d'un litre de lait nécessite 1 000 litres d'eau d'irrigation. Or la majeure partie des eaux d'irrigation destinées à la production fourragère sont extraites par pompage dans les nappes d'eaux souterraines (1 120 millions de m³/an) et elles sont nettement plus salées que les eaux superficielles du Río Nazas stockées dans le barrage *Lazaro Cardenas*. Les eaux souterraines les plus concentrées en sels [13] ont en effet un faciès sulfaté sodique avec des conductivités électriques qui dépassent 5 dS.m⁻¹ (deci-Siemens par mètre) alors que la conductivité électrique des eaux superficielles du Río Nazas ne dépasse pas 0,6 dS.m⁻¹. Il en résulte, dans l'ensemble de la zone irriguée de *Comarca Lagunera*, des apports en sels estimés en moyenne à 9,5 tonnes par hectare et par an, 78 % de ces apports résultant d'un approvisionnement par extraction des eaux souterraines.

La sur-salure des sols irrigués constitue donc un problème majeur pour la pérennité du système d'élevage intensif dans la partie basse et aride de la RH 36.

Une agriculture très localisée

Les surfaces cultivées [12] se répartissent équitablement entre les parties haute, médiane et basse de la RH 36. Elles couvrent 12 % de sa superficie totale. Les cultures pluviales vivrières, essentielle-

Tableau III. Les effectifs en animaux quadrupèdes élevés en 1970 dans la RH 36 [9, 10]

Type d'élevage	Effectif RH 36	RH 36 (%)	Partie haute (%)	Partie basse (%)	Équivalence en bovin (UB)
Ovins et caprins	1 008 000	39	31	63	0,3
Bovins	821 000	32	37	15	1
Mulets et ânes	275 000	10	12	8	0,4
Chevaux	253 000	10	11	6	1,2
Porcins	235 000	9	9	8	–
Effectif total	2 592 000	–	1 969 000	623 000	–

ment le maïs et le haricot, sont cultivées dans les vallées de la partie haute sub-humide. Dans la zone médiane semi-aride, une irrigation de complément permet la mise en valeur agricole des terres localisées dans les vallées par captage des ruissellements, par stockage et dérivation des eaux de crue ou par pompage des eaux souterraines dans les nappes phréatiques alluviales.

Dans la zone basse aride, seule l'irrigation, par la mobilisation des eaux superficielles de la partie amont (barrage *Lazaro Cardenas*) et des eaux souterraines de la partie aval, a permis le développement d'une agriculture intensive orientée vers la culture du coton dès 1920. Cependant, en raison de l'apparition des fibres synthétiques sur le marché mondial, la valeur du coton est devenue, pour la première fois en 1955, inférieure au coût de production [13]. Les agriculteurs ont donc abandonné la culture du coton au profit de la culture fourragère pour l'élevage bovin industriel voué à la production laitière. Les cultures irriguées vivrières (maïs, haricot, blé), maraîchères (choux, pastèques, melons, tomates, piments) et fruitières (vignes, noyers) occupent aussi d'importantes superficies dans la zone basse et aride [13].

Dans toute la RH 36, les superficies irriguées ont été estimées [9] à environ 2 900 km² dans la partie basse et aride, contre 600 km² dans la partie médiane et quelques dizaines de km² dans la partie haute.

Déforestation de la *Sierra Madre* occidentale

L'exploitation forestière est la seconde activité économique de la *Sierra Madre* occidentale, l'État de *Durango* étant le premier producteur de bois du Mexique [11]. À partir de 1991, le ministère de l'Environnement (SEMARNAP) a mis en place un programme de gestion intégrale forestière (MIF) qui prend en compte l'ensemble des ressources forestières et la préservation du milieu. Cependant, la capacité de production de bois des organismes étatiques a été estimée à 2,4 millions de m³ alors que la demande des entreprises a été chiffrée à 3,9 millions de m³. Cette demande, nettement supérieure à l'offre, conduit à de nombreuses violations de la loi forestière. Les travaux de Rodriguez [15] et de Viramontes [11] ont ainsi montré,

par analyse diachronique d'images satellitaires Landsat (1972-1992) et SPOT (1986-1998), une réduction de 20 à 60 % des superficies couvertes de forêts et une augmentation de 20 à 30 % des superficies correspondant aux savanes d'altitude et aux sols nus sans végétation.

Le paysage de la *Sierra Madre* occidentale évolue donc vers une dégradation et une diminution de ses capacités de production en bois et en fourrages. Cette dégradation se traduit par une réduction de l'écoulement de base des principales rivières qui drainent cette zone montagneuse et par un renforcement des crues [11].

Usage des ressources en eau

Eaux superficielles

Le réseau hydrographique de la RH 36 (figure 3) comprend trois bassins endoréiques : le bassin du *Río Nazas* (50 500 km²), le bassin du *Río Aguanaval* (33 500 km²) et le bassin du *Bolsón de Mapimi* (7 500 km²). Ces trois bassins ont un régime d'écoulement intermittent : une période de crues qui s'étend de juin à septembre et une période d'étiage très marqué d'octobre à mai. La zone montagneuse sub-humide produit 87 % des écoulements [16]. La zone semi-aride est une zone intermédiaire de transfert et de faible production. La zone basse et aride est une zone de stockage naturel dans de vastes réservoirs superficiels (lagunes) et souterrains (nappes alluviales).

En année moyenne [16], le volume écoulé est de 1 100 millions de m³ sur le bassin du *Río Nazas*, et de 280 millions de m³ sur celui de l'*Aguanaval*. Ces écoulements sont en grande partie stockés dans des barrages. En relation avec la décroissance de la pluviométrie et l'accroissement de la température et de l'évapotranspiration, les débits moyens annuels spécifiques décroissent de l'amont vers l'aval. Ainsi, pour le bassin du *Río Nazas*, le débit spécifique moyen annuel sur la période 1971-1977 passe de 2,45 L/s/km² pour le sous-bassin du *Río Sardinias* à 0,98 L/s/km² pour le sous-bassin du *Cañon Fernandez*, le plus en aval.

L'utilisation des écoulements superficiels a commencé en 1840 dans la RH 36

avec la construction de canaux de dérivation des crues estivales vers de petites zones de cultures dans la partie basse et aride, le long des cours du *Nazas* et de l'*Aguanaval*. En 1891 fut créée la commission d'inspection du *Nazas* (CIN) chargée de réglementer la distribution de l'eau. En 1936, la réforme agraire subdivisa cinq très grandes propriétés (*latifundia*) des zones aride et semi-aride en 3 000 propriétés communautaires (*ejidos*). Cette même année fut entreprise la construction du barrage *Lazaro Cardenas* (*El Palmito*) sur le cours du haut *Nazas* à la confluence des *Ríos Ramos* et *Sextin* (figure 4). D'une capacité initiale de stockage de 3,8 milliards de m³, ce barrage fut mis en service en 1946, permettant la protection des villes et le développement des cultures irriguées dans la partie basse et aride appelée *Comarca Lagunera*. Un ouvrage de régulation, le barrage de *Francisco Zarco*, d'une capacité de 420 millions de m³ est venu compléter en 1966 l'équipement hydraulique du *Río Nazas*. De 1962 à 1972, une série de travaux sur les périmètres irrigués, par nivellement des parcelles et construction de canaux cimentés, ont progressivement amélioré l'efficacité de l'irrigation gravitaire.

Les écoulements du *Río Aguanaval*, beaucoup plus faibles que ceux du *Río Nazas*, ont commencé à être gérés dès 1905 avec la construction de plusieurs barrages de moyenne importance (14 à 74 millions de m³) à vocation agricole : les barrages *Santa Rosa*, *Leobardo Reynoso*, *los Naranjos* et *El Cazadero*. Plusieurs autres retenues de 1 à 2 millions de m³ ont été construites sur des affluents. Ce réseau de barrages a favorisé une utilisation locale de l'eau et permis le développement de nombreux villages agricoles sur l'ensemble du bassin versant, ce qui n'est pas le cas du bassin du *Río Nazas* où les écoulements sont presque exclusivement réservés à la mise en valeur agricole de la *Comarca Lagunera*.

Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont utilisées principalement dans la partie basse et aride de la RH 36 pour l'irrigation mais elles sont également utilisées dans les zones sub-humide et semi-aride pour l'alimentation en eau des populations et du bétail. En zone semi-aride, le ranch

Atotonilco constitue à cet égard un bon exemple d'utilisation des ressources en eaux souterraines pour l'abreuvement du bétail [17]. Si ce type d'utilisation n'engendre pas de baisse importante des niveaux piézométriques en raison des faibles quantités extraites annuellement, il n'en va pas de même lorsque les forages sont destinés à un usage agricole.

Dans la zone basse et aride de la RH 36, les premiers forages furent implantés à partir de 1920 [18]. Dès 1940, on y dénombrait plus de 1 000 forages et plus de 2 500 en 1960. Parmi les 3 000 forages implantés actuellement dans cette zone, 80 % sont utilisés pour l'agriculture. Le volume d'eau souterraine extrait annuellement est de 1 120 millions de m³. Il a connu un maximum historique de 1 500 millions de m³ en 1958.

La recharge naturelle des nappes phréatiques par les crues des *Ríos Nazas* et *Aguanaval* a été estimée de l'ordre de 100 millions de m³/an, mais l'extension des surfaces irriguées a fait croître ce volume jusqu'à 400 millions de m³ en 1962, avant que ne soient entrepris les travaux d'aménagement des périmètres irrigués. La recharge est actuellement estimée de l'ordre de 200 à 300 millions de m³. En conséquence, le niveau de la nappe phréatique de la *Comarca Lagunera* s'abaisse en moyenne de 1,5 m/an depuis 25 ans [19].

Une estimation du temps de séjour des eaux souterraines de la *Comarca Lagunera* réalisée par Brouste [19], à partir

d'analyses de l'activité du carbone 14, a permis de mettre en évidence trois familles d'eaux souterraines :

- des eaux récentes, bicarbonatées calciques, localisées géographiquement près du *Río Nazas* ;

- des eaux 2 à 3 fois plus anciennes, sulfatées calciques, de part et d'autre de l'axe formé par le *Río Nazas* ;

- des eaux 4 à 10 fois plus anciennes, sulfatées sodiques, à l'extrême-nord et au sud-ouest de la *Comarca Lagunera*.

Sous l'action de la surexploitation des nappes phréatiques, le sens de la circulation des eaux souterraines s'est inversé et la circulation s'effectue actuellement des eaux les plus anciennes et les plus minéralisées vers les eaux les plus récentes, de telle sorte que les eaux souterraines d'irrigation sont de plus en plus chargées en sels minéraux, ce qui conduit à une aggravation des problèmes de salinisation des parcelles irriguées exclusivement par prélèvement dans les nappes.

Conclusion

Le projet Cenid Raspa/Orstom (devenu IRD) sur l'usage et la gestion de l'eau et des sols dans la région hydrologique 36 au Nord-Mexique a permis de mettre en exergue trois problèmes graves dans cette région semi-aride. Un premier problème lié à la déforestation de la *Sierra Madre* occidentale qui tend à réduire le couvert végétal de

cette région montagneuse en accroissant les surfaces mises en pâtures. Un deuxième problème lié au surpâturage des zones sub-humide et semi-aride qui conduit à la dégradation du couvert végétal et des sols. Un troisième problème de salure des sols liée à la mise en valeur agricole de la zone basse et aride par pompage dans les nappes d'eaux souterraines. De plus, les études géochimiques ont montré que la surexploitation des nappes de la *Comarca Lagunera* augmentait encore les risques de salure des parcelles irriguées exclusivement par des eaux souterraines.

Pour éviter une amplification de la dégradation des ressources naturelles de cette région, il semble maintenant nécessaire de mettre en place un observatoire de l'évolution du milieu naturel et de développer une politique active de défense des zones les plus menacées. Pour les éleveurs, une diversification des points d'abreuvement peut contribuer significativement à l'amélioration de la productivité de l'élevage et à l'accroissement du niveau de vie des familles qui dépendent de cette activité. Elle doit cependant être couplée avec une gestion plus rationnelle des pâtures et une régulation de la charge animale. Pour les agriculteurs de la zone aride, la sur-salure des sols et l'épuisement des nappes d'eaux souterraines ne sont pas inéluctables mais nécessitent la mise en œuvre d'une nouvelle politique d'usage des eaux superficielles et souterraines dans la zone basse et aride de la RH 36 ■

Résumé

La région hydrologique 36 (RH 36), d'une superficie de 92 000 km², est l'une des trois régions hydrologiques endoréiques mexicaines. Au nord du tropique du Cancer, de 23° à 27° de latitude N, elle s'étend de la *Sierra Madre* occidentale, qui culmine à 3 130 m d'altitude, jusqu'aux lagunes de *Mayrán* et de *Viesca*, qui servent d'exutoires aux écoulements des *Ríos Nazas* et *Aguanaval* sur les hauts plateaux du Nord-Mexique (*Altiplano*), à 1 100 m d'altitude.

L'analyse de la pluviométrie annuelle d'un échantillon de 123 stations pluviométriques a permis de différencier dans la RH 36 une zone sub-humide sur la *Sierra Madre* occidentale, une zone semi-aride sur le piedmont de la *Sierra* et une zone aride sur l'*Altiplano*. Treize unités de la classification FAO/Unesco des sols y sont représentées mais trois unités couvrent à elles seules plus de 70 % de la superficie de la région : les lithosols, les xérosols et les phaeozems. La végétation peut être regroupée en quatre formations principales mais le matorral xérophile, formation arbustive assez dense, bien adaptée à l'aridité, est la plus largement répandue (60 % de la superficie). Les cultures pluviales, essentiellement le maïs et le haricot, sont cultivées dans les vallées de la partie haute sub-humide. Dans la zone semi-aride, une irrigation de complément permet la mise en valeur agricole des terres. Dans la zone aride, seule l'irrigation par la mobilisation des eaux superficielles et souterraines a permis le développement d'une agriculture intensive, orientée tout d'abord vers la production de coton et plus récemment vers la production de foin pour l'élevage bovin destiné à la production de lait. L'élevage extensif s'est développé dans toute la RH 36 mais la charge animale moyenne supportée par les pâturages est très inégalement répartie.

Elle est en moyenne d'un bovin pour 4 hectares dans la zone sub-humide, 15 hectares dans la zone semi-aride, 85 hectares dans la zone aride.

La surexploitation de la forêt dans la partie montagneuse sub-humide et celle des pâturages dans la partie semi-aride constituent des menaces pour la viabilité de ces systèmes d'exploitation. Dans la partie basse et aride, la surexploitation des nappes d'eaux souterraines se traduit par une baisse régulière de 1,5 m/an des niveaux piézométriques et par une salinisation de plus en plus importante des eaux d'irrigation qui posent à terme un grave problème à ce système de mise en valeur agricole.

Sujets : Gestion de l'eau ; Déforestation ; Gestion des sols.

Summary

The Hydrological Region 36 (HR 36), with a surface area of 92,000 km², is one of the three Mexican hydrological endorheic regions. North of the tropic of Cancer, at a latitude of 23° to 27° north, the HR 36 stretches from the Western part of the *Sierra Madre*, which is more than 3,130 meter high, to the lagoons of *Mayrán* and *Viesca*. These lagoons are the outlets of the *Ríos Nazas* and *Aguanaval* on the high plateau of North-Mexico (*Altiplano*) at an altitude of 1,100 m.

The analysis of the annual rainfall with a sample of 123 pluviometric stations made it possible to distinguish three areas in the HR 36: a sub-humid area on the western part of the *Sierra Madre*, a semiarid area on the piedmont of the *Sierra* and an arid area on the high plateau. Thirteen units of the FAO/Unesco soil classification are present in the HR 36, but only three units occupy 70% of this region: the litosols, the xerosols and the feozems. The vegetation counts four main groups but the xerophile matorral, a dense enough shrubby formation, which is drought-resistant, is predominant (60% of the surface area). Pluvial farming (mainly maize and bean) is practised in the valleys of the higher part. In the semi-arid area, an additional irrigation makes farming exploitation possible. In the arid area, only irrigation through the mobilisation of surface and ground waters has allowed intensive farming to be developed first around cotton farming and more recently around fodder farming for cattle-rearing geared towards milk production. Ranching is developed all over the HR 36 but the mean density on the pastures is very unequally distributed.

On average, the livestock should be a head of cattle per: 4 hectares in the sub-humid area, 15 hectares in the semiarid area, 85 hectares in the arid area.

The overexploitation of the forest in the sub-humid area and the overexploitation of the pastures threaten the viability of these production systems. In the lower and arid part, the overexploitation of the water table underground has involved a steady drop in the water level equal to 1.5 meter per year and a rising salinity of irrigation waters. This salinity has now become a serious problem for this intensive production system.