

# Aridité et sécheresses du Nord-Mexique

Jean-François Nouvelot\*  
Luc Descroix\*\*

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. Ce contexte géographique particulier explique le caractère de continentalité que reflètent non seulement les faibles précipitations mais aussi un taux d'évaporation qui représente de 5 à 10 fois les quantités de pluies tombées. Intervient, également et surtout, le rôle des circulations atmosphériques et océaniques 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 la Basse-Californie (courant de Californie), deux facteurs peu favorables à la formation de précipitations abondantes.

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 sont sensiblement plus importantes. 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 (le barrage de El Palmito, situé dans le Durango, a une capacité approchant les 4 milliards de m<sup>3</sup>, soit trois fois la retenue de Serre-Ponçon, le plus grand réservoir français), peuvent s'avérer insuffisantes certaines années. Le recours, d'une manière massive, aux réserves souterraines profondes, dont la réalimentation, encore mal connue, est probablement limitée, serait dangereux et le reflet d'une politique de gestion à court terme hypothéquant l'avenir.

Les différents critères de classification des climats proposés par de nombreux spécialistes, climatologues ou géographes plus particulièrement, Gaussen, Emberger, Mc Ginnies, Meig, Köppen, Thornthwaite, Unesco, permettent, malgré certaines divergences, de caractériser d'une manière assez précise les grands types de milieux. Toutefois, ces classifications à visées biogéographiques, basées sur des caractéristiques moyennes, précipitations, températures, etc., occultent la variabilité spatiale, ce qui est compréhensible étant donné le caractère

\* Directeur de Recherche à l'ORSTOM.

\*\* Chargé de Recherche à l'ORSTOM.

Fonds Documentaire ORSTOM



0100009508

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B4 9598 Ex : 1



Carte 1 - Régions hydrologiques.

universel des régimes ainsi définis, mais aussi et surtout la variabilité temporelle des phénomènes mis en jeu, ce qui représente un plus sérieux handicap. Les indices d'aridité proposés par certains auteurs, De Martonne, Emberger, Stretta et Mosino, par exemple, pâtissent des mêmes insuffisances. En supposant satisfaites les conditions de stationnarité des différents facteurs du climat, il est vérifié que nombre d'entre eux, et plus particulièrement les précipitations, varient d'autant plus dans le temps et l'espace que l'aridité s'accroît. C'est ainsi que sur une période déterminée, un siècle, par exemple, le rapport des hauteurs pluviométriques, de l'année la plus arrosée à l'année la plus sèche, sera sensiblement moins élevé en climat humide qu'en climat sec. En d'autres termes, les années exceptionnellement sèches s'écarteront d'autant plus de la normale que les précipitations moyennes sont faibles. Dans certaines régions de la planète, la notion de valeur moyenne a d'ailleurs peu de sens, tant l'irrégularité est forte. Dans le Sud de la zone côtière de l'Équateur, presque à Santa Elena, soumise alternativement à l'influence du courant chaud, marin de El Niño et du courant froid de Humboldt, il a été observé, au cours de deux années consécutives, des précipitations annuelles de 20 mm puis de 3 000 mm. La moyenne des précipitations étant voisine de 100 mm, la zone est définie comme aride, ce qui est très insuffisant puisque certaines années les conditions climatiques sont celles régnant dans les régions désertiques les plus sèches, alors que parfois les pluies mesurées sont équivalentes à celles observées en climat tropical humide. Bien que les

zones les plus arides du Nord-Mexique ne présentent pas de telles irrégularités, la variabilité climatique y est cependant notable. La région retenue, pour analyser à la fois les phénomènes d'aridité et de sécheresse, se situe dans la partie Sud du désert de Chihuahua (carte 1).

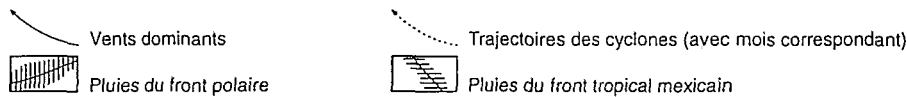
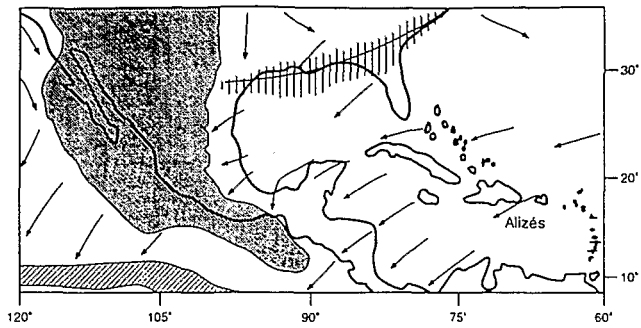
Il s'agit du bassin endoréique du Nazas qui présente l'avantage de regrouper une partie aride de hauts plateaux (altitude toujours supérieure à 1 000 m) avec des précipitations annuelles se situant entre 200 et 300 mm; une partie semi-aride avec des reliefs déjà significatifs, recevant de 300 à 500 mm de pluie à l'année; et une zone subhumide couvrant le haut-bassin (Sierra Madre occidentale), où certains sommets atteignent 3 000 m, caractérisée par des hauteurs pluviométriques variant entre 500 et 800 mm par an. Même si l'altitude de l'ensemble de la zone explique des températures hivernales relativement basses (le nombre de jours de gelées, y compris sur les plateaux, n'est pas négligeable), son appartenance au domaine tropical ne fait aucun doute. À ce titre, les précipitations constituent un élément fondamental du climat, et l'étude de leur variabilité spatio-temporelle a pour finalité de mieux en appréhender les différentes caractéristiques et, si possible, en définir les principaux facteurs causaux.

### Les facteurs du climat

Le climat qui caractérise l'ensemble du Nord-Mexique est régi essentiellement par sa situation en latitude 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; et par les remontées d'eau froide du courant de Californie qui longe les côtes de la Basse-Californie. Le bassin du Nazas qui se situe dans la partie méridionale de cette région (des latitudes 23° à 26°30' nord) reste soumis, sensiblement, aux mêmes influences (cartes 2 et 3).

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. Ce régime est celui des latitudes subtropicales où, en façade Ouest du continent, à hauteur des 25°-30° de latitude, stationnent les grandes zones anticycloniques. À cette

## Aridité et sécheresses du Nord-Mexique



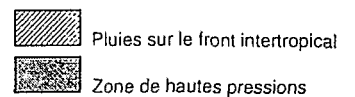
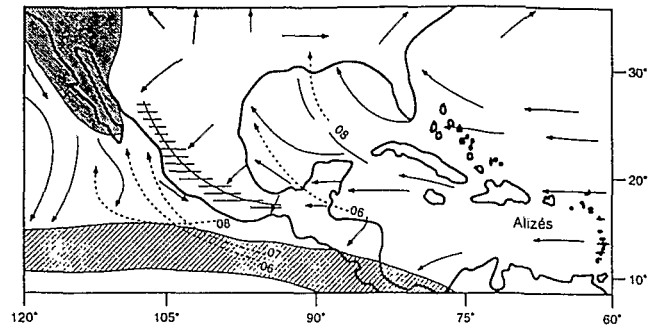
SOURCE: *Climatología de México*.

Carte 2 - Décembre-février

époque de l'année, le courant froid de Californie atteint alors ses limites les plus méridionales.

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 (Santibáñez 1992; Cornet 1993; Delhoume 1995). Les masses d'air venues du golfe du Mexique, qui ont 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 humide rencontrent celles venues du Pacifique à hauteur de la Sierra Madre occidentale, formant le front tropical mexicain (FTM) (Climatología de México), situé à environ 10° plus au nord que le front intertropical (FIT), avec une orientation générale NO-SE. Il se crée 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.

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 intensi-



SOURCE: *Climatología de México*.

Carte 3 - Juin-août.

tés. 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 a plu 70 mm en 24 heures; puis la ville de Torreón, localisée à 200 km au NO, 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 de 30 à 40 mm sur les villes de Santiago Papasquiaro et Guanacevi (haut bassin du Nazas), soulignant bien la trajectoire SO-NE de ce type de perturbations, avec parfois une certaine propension à s'infléchir progressivement vers l'est.

Il semble difficile de reconnaître, dans ces conditions, une circulation similaire à celle rencontrée en Afrique de l'Ouest, à la même latitude (Sud du Sahara). Les flux d'est, favorables aux lignes de grains, sont retenus par la Sierra Madre orientale, alors qu'à l'opposé, l'entrée des masses d'air humide, en provenance du Pacifique, est fortement ralentie par la Sierra Madre occidentale. Cela laisse dans la partie centrale de la moitié Nord du pays un grand quadrilatère marqué par une forte continentalité: été chaud (effet de foehn des deux courants principaux, Est et Ouest); hiver relativement froid. L'effet d'altitude accentue, par ailleurs, la variabilité déjà prononcée de ce type de climat: sécheresse de l'air, températures très contrastées. Les villes de Durango à 1 850 m, Zacatecas à 2 500 m et Chihuahua à 2 000 m sont plus tempérées que celle de Torreón, située à 1 100 m au fond du bassin endoréique du Nazas.

## L'aridité: homogénéité et variabilité

La méthode la plus simple et la plus classique pour définir l'aridité d'une région est de comparer la disponibilité en eau précipitée à la demande hydrique théorique du milieu végétal. Le premier terme de l'équation est donné par la hauteur pluviométrique,  $P$ , mesurée sur un intervalle de temps donné (le mois ou l'année, par exemple); le second par l'évapotranspiration potentielle, ETP. Cette notion, introduite par Thornthwaite (1944), repose sur le principe que les contraintes exercées sur l'eau par le sol et la plante s'annulent quand celle-ci est suffisamment abondante. Ainsi, le qualificatif "potentielle" rappelle qu'il s'agit de l'évapotranspiration maximale possible, dans des conditions climatiques déterminées. Toutefois, la mesure directe de l'ETP reste une opération délicate et coûteuse, ce qui explique que de nombreux auteurs (Riou 1975; Baldy 1978) recommandent d'utiliser les données fournies par les bacs évaporatoires, corrigées à partir de données climatologiques usuelles. Il est possible également d'utiliser la formule de Penman (1948) qui, basée sur des fondements physiques rigoureux, demande toutefois la connaissance d'un grand nombre de paramètres pas toujours disponibles.

Le stress hydrique apparaît lorsque les besoins en eau de la végétation deviennent supérieurs aux réserves du sol. La valeur de 0,50 ETP a été proposée par les agroclimatologues pour définir le seuil critique à partir duquel la végétation cesse de croître. Cependant, il a été montré expérimentalement (Le Hourou et Popov, cités par Delhoume 1995) que la croissance végétale, surtout la végétation herbacée, est arrêtée ou sensiblement ralentie lorsque l'évapotranspiration réelle (ETR) est inférieure à 0,35 ETP.

L'Unesco (1977) propose ainsi d'utiliser le rapport des moyennes interannuelles  $R = P/ETP$ , pour préciser différentes classes d'aridité:

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

Pour l'ensemble du bassin du Nazas, trois classes se dégagent nettement:

Haut Bassin,	$0,40 < R < 0,50$ , avec plus de 3 mois où $R > 0,35$ , semi-aride (subhumide).
--------------	---

Moyen Bassin,	$0,20 < R < 0,40$ , avec 1-2 mois où $R > 0,35$ , semi-aride.
---------------	---

Zones basses lagunaires,	$0,15 < R < 0,20$ , avec souvent aucun mois où $R > 0,35$ , aride pur.
--------------------------	--

Considéré au niveau régional et à l'échelle pluviométrique, le climat de l'ensemble de la zone apparaît donc comme bien défini.

Une analyse plus approfondie des moyennes pluviométriques confirme ces caractéristiques. 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, aucun apport n'étant par ailleurs généré sur le continent, contrairement à ce qui est observé dans le Sahel africain, où la moitié des pluies n'est pas provoquée par des entrées océaniques. L'accroissement de 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 des masses d'air humide par un abaissement des températures, d'autant plus important que croît l'altitude.

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 60 stations pluviométriques, réparties sur l'ensemble du bassin, en utilisant la méthode dite du classement ascendant 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 12 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 12 dimensions (les valeurs mensuelles), des regroupements ont été effectués par agglomérations successives des classes les plus proches, caractérisées par leur centre de gravité. Le profil moyen obtenu (tableau 1), valable pour les trois zones climatiques définies précédemment, 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

## Aridité et sécheresses du Nord-Mexique

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aôut	Sep	Oct	Nov	Déc
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

Tableau 1 - Distribution mensuelle des précipitations dans le bassin du Nazas (en pourcentages du total annuel).

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 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 (tableau 1).

Cette différenciation latitudinale est confirmée par l'analyse de la structure spatiale des hauteurs pluviométriques annuelles, basée sur la détermination du variogramme climatologique. Mise au point pour la délimitation des filons en prospection et exploitation minière, cette méthode permet de définir une fonction expérimentale (variogramme ou corrélogramme, ces deux fonctions étant liées) qui décrit la corrélation entre des mesures simultanées, réalisées en différents points de l'espace, en relation avec la distance les séparant. Les données restent spatialement structurées tant que la fonction variogramme croît (ou la fonction corrélogramme tend vers 0). Lorsque le variogramme atteint un palier, celui-ci correspond à une distance maximale, appelée "portée", au-delà de laquelle les mesures ne sont plus corrélées, et donc structurées. Sur le bassin du Nazas, la portée dépasse 300 km en ne considérant que l'axe O/E (en pratique un angle de 90°, compris entre deux azimuts NO-SE / SO-NE), et n'est que de 160 km suivant l'axe N/S.

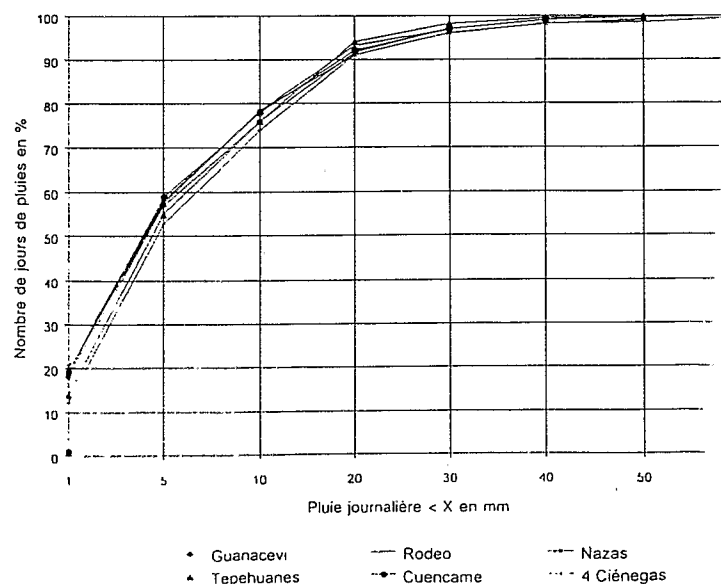
Les précipitations journalières présentent, elles mêmes, certaines caractéristiques très cohérentes. Si le nombre de jours de pluie (supérieure à 0,1 mm) augmente avec la hauteur de précipitation annuelle (augmentation sensiblement linéaire entre 200 et 600 mm: de 14 à 15 jours de pluie supplémentaires par 100 mm de précipitation), la distribution de ces pluies, qui correspondent souvent à une seule averse car il est fréquent de n'observer qu'une seule précipitation par jour, reste homogène (graphique 1). Par exemple, les pluies inférieures à 5 mm représentent

de 54 à 59% du total des jours de précipitation, celles inférieures à 20 mm représentent 91%, que l'on se situe dans la Sierra Madre occidentale à 2 000 m d'altitude, en zone subhumide ou dans le désert de Viesca à un peu plus de 1 000 m, en zone quasi désertique.

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".

Une manière commode de définir quantitativement la variabilité d'un facteur mesuré est de calculer son coefficient de variation,  $C_v$ , qui est le rapport de l'écart-type, à la moyenne,  $m$ :

$$C_v = \sigma / m.$$



Graphique 1 - Répartitions du nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur précipitée.

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		0,45-0,65	0,15-0,30
500	0,20-0,30	0,20-0,30	0,35-0,45	0,40-0,60	
600	0,15-0,30	0,20-0,30	0,30-0,40	0,40-0,55	

Tableau 2 - Coefficient de variation des précipitations annuelles de différentes régions arides.

L'écart-type ou la variance ( $\sigma^2$ ), qui mesure la dispersion des observations autour de la moyenne par, comme son nom l'indique, un simple calcul d'écart, 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.

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 0,4-0,5 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 (tableau 2).

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 interandin, 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,  $C_v$  est sensiblement comparable à celui observé dans le Nord-Mexique.

Il faut savoir que pour un coefficient de variation supérieur à 0,20, la distribution statistique des obser-

vations n'est plus gaussienne (appelée parfois "distribution en cloche") et présente donc une certaine asymétrie (généralement positive pour les précipitations), d'autant plus marquée que  $C_v$  et par conséquent la variabilité sont forts.

La hauteur pluviométrique annuelle, observée en un lieu déterminé, ne représente pas un phénomène continu mais simplement la somme d'averses, séparées par des intervalles de temps secs, plus ou moins longs. La connaissance de la structure spatio-temporelle des champs pluviométriques devrait donc permettre de mieux saisir les causes de cette variabilité.

À partir des observations pluviométriques réalisées, de 1988 à 1992, par Delhoume *et al.*, sur un réseau comprenant plus de 40 pluviomètres ou pluviographes, répartis sur 35 km<sup>2</sup>, nous avons déterminé le variogramme climatologique correspondant sensiblement à des averses de durée moyenne égale à une heure. La "portée", c'est-à-dire la distance au-delà de laquelle les précipitations observées ne sont plus corrélées, est voisine de 5 km. En moyenne, une averse de ce type couvre donc environ 20 km<sup>2</sup>. Pour des précipitations de plus courte durée, la superficie concernée est évidemment moindre. Certains auteurs (Lebel 1984) ont montré que la portée variait en fonction de la durée de l'averse, élevée à une certaine puissance (0,30 pour la région méditerranéenne des Cévennes en France, connue pour la puissance de ses orages). Dans le Nord-Mexique, la plupart des averses orageuses (de loin les plus fréquentes) ont une durée qui se situe entre quelques minutes et une heure; il est exceptionnel qu'elle atteigne deux heures. Leur forme est assez classique, avec un corps d'averse de 5 à 20 minutes, durant lequel les intensités dépassent 40 mm/h. Ce corps peut être précédé de quelques millimètres de pluie, tombés avec une faible intensité ou, au con-

## Aridité et sécheresses du Nord-Mexique

traire, être suivi d'une traîne (pluie préliminaire et traîne peuvent également coexister). Elle peut présenter un seul pic d'intensité ou parfois deux; dans le premier cas elle est qualifiée d'unimodale; dans le second, de bimodale. Cette dernière distribution favorise le ruissellement, surtout lorsque le second pic d'intensité est supérieur au premier. Ces différences s'expliquent par l'évolution spatio-temporelle des cellules convectives et des amas pluviogènes dont la dynamique reste complexe et encore mal connue. La faible extension de ces

précipitations explique les fortes hétérogénéités spatiales des milieux récepteurs. Sachant que dans les zones arides étudiées, il est fréquent de n'observer ponctuellement, tout au long d'une année, qu'une seule averse supérieure à 30 mm et que, par ailleurs, les coefficients de ruissellement (c'est-à-dire la proportion de pluie qui s'écoule sur le sol), mesurés sur des bassins versants de quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup>, n'excèdent jamais quelques pour-cent (souvent beaucoup moins), on saisit mieux pourquoi le remplissage des retenues, appelées ici *presones*, dont les capacités atteignent fréquemment plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> alors que leur bassin versant dépasse rarement 20 km<sup>2</sup>, n'est pas assuré, tant s'en faut, chaque saison des pluies. Si la variabilité spatio-temporelle est une caractéristique de tous les milieux arides, le Nord-Mexique se singularise tout de même par des averses particulièrement peu abondantes.

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", experi-

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

Tableau 3 - Pluies journalières de fréquence décennale de différentes régions arides.

P. annuelle (mm)	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

Tableau 4 - Intensités des pluies de fréquence décennale de différentes régions arides pour environ 400 mm de précipitations annuelles (en mm/h).

mé en années, est observé, en moyenne, une année sur 10, sans que cela signifie, bien évidemment qu'il se répète tous les 10 ans. Ainsi, la probabilité d'observer une pluie de fréquence décennale dans une chronique de 10 ans n'est que de 39%; par contre, il existe 19 chances sur 100 d'en observer deux et même 1,5 chances sur 1 000 d'en observer cinq.

Sous l'isohyète annuelle 400 mm, la pluie journalière de fréquence décennale est de 45 à 70 mm dans le Nord-Mexique; de 80 à 100 mm dans le Sahel africain; de 90 à 115 mm dans le Nordeste brésilien; et de 75 à 100 mm dans la zone côtière équatorienne; seule la zone interandine se caractérise par des valeurs plus faibles: de 20 à 40 mm (tableau 3).

Il semble donc incontestable que, dans ce domaine, l'altitude joue un rôle fondamental. La tendance reste sensiblement la même si l'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 (tableau 4) 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, de 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 (tableau 4). 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.

La capacité de ruissellement ou d'absorption, puis de rétention, du milieu receveur, joue un rôle de première importance. Ainsi, lorsque les sols présentent des caractéristiques qui tendent à réduire leur capacité potentielle d'emmagasinement d'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. Par contre, la partie qui ruisselle, et finit par se concentrer, peut être arrêtée sur son parcours par des zones de végétation plus dense, à faible pente, avec éventuellement un micro-relief plus ou moins développé, où les conditions d'infiltration sont sensiblement meilleures. De cette façon, la végétation reçoit des quantités d'eau très supérieures à celles apportées par les seules précipitations. Ce phénomène de compensation de l'aridité climatique explique la présence, parfois très locale, d'une couverture végétale sensiblement plus fournie que celle observée sur les milieux environnants. Le processus tend souvent à s'accroître, les zones dénudées à fort ruissellement devenant stériles de manière irréversible, alors que les zones végétalisées bénéficient, au contraire, de quantités croissantes d'eau qui favorisent leur essor ainsi que le développement d'une activité mésofaunique à la partie supérieure du sol (Delhoume 1995), améliorant de la sorte les conditions d'infiltration. Ce phénomène de rétroaction explique que croûtes superficielles et couverture végétale soient des formations exclusives qui ne peuvent coexister; les

premières correspondant à une dynamique horizontale de l'eau, le ruissellement; la seconde à une dynamique verticale, l'infiltration. Lorsque l'alternance sol nu-plages végétalisées est relativement ordonnée, le type de paysage ainsi formé, caractéristique de certaines régions de l'Afrique sahélienne, porte le nom de "brousse-tigrée". Localement, dans le Nord-Mexique, ces formations sont appelées *mogotes*. On les rencontre dans d'autres milieux arides, en Afrique du Sud ou en Australie, par exemple. Quoi qu'il en soit, excepté dans la sierra où les précipitations et l'humidité sont généralement suffisantes pour entretenir une végétation arborée, composée principalement de pins et de chênes, la végétation des zones plus arides montre une adaptation aux contraintes du milieu qui permet au couvert herbacé, comme au couvert arbustif, de garder un caractère pérenne malgré des épisodes secs de plusieurs mois (plus de huit mois consécutifs, certaines années). En plein cœur de la saison des pluies, lorsque l'activité végétale est la plus forte, les sols peuvent retrouver un état hydrique proche de la dessiccation maximale observée en saison sèche. Il suffit, pour cela, d'une période de 10 à 20 jours sans précipitation, phénomène relevé en moyenne deux fois par an au cours de l'été sous l'isohyète annuelle 250 mm. En passant des zones semi-arides aux zones arides, il n'est pas rare de rencontrer les mêmes espèces végétales avec, néanmoins, une évolution de certains caractères qui leur permet de supporter des conditions plus rigoureuses: feuilles et port de plus faibles dimensions, durée de croissance inférieure. Cette pérennité ne peut être cependant garantie que si les apports minimaux en eau nécessaires sont assurés sur le long terme; au-delà de trois ou quatre années anormalement sèches, ces formations végétales tendent à disparaître de manière définitive. Il s'agit là d'un phénomène dit "de sécheresse" qui n'atteint d'ailleurs pas seulement les régions pâtissant d'un manque d'eau chronique, même si, évidemment, il y est ressenti avec plus d'acuité qu'ailleurs.

### Les sécheresses

Définir sur des critères objectifs les caractéristiques d'une période de sécheresse, intensité, durée, extension spatiale, etc., représente un exercice peu aisé. Le recours à l'arsenal statistique est possible



mais probablement pas assez souple pour rendre compte de situations ou de conditions très contrastées. Peut-on caractériser de la même manière un épisode de sécheresse en milieu humide, où les années déficitaires restent relativement abondantes, et en milieu aride, où le manque d'eau est quasi permanent? 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. Les cultures pluviales ont, certes, dans ce cas, de mauvais rendements et la végétation naturelle, annuelle davantage de difficultés à croître, sans que néanmoins la situation paraisse irréversible. C'est le cumul d'années sèches qui rend perceptible les modifications intervenues sur les écosystèmes et agrosystèmes, preuve pour certains d'un véritable changement climatique à plus ou moins long terme.

Le manque d'eau a toujours fait partie des grandes calamités contre lesquelles l'homme cherche à se protéger, soit en implorant une intervention divine (Tlaloc, dieu de la pluie des Aztèques, par exemple), soit en créant, plus pragmatiquement, des infrastructures ou des réseaux d'observation qui permettent une meilleure maîtrise des ressources hydriques disponibles, principalement lorsque celles-ci sont, d'une manière endémique, peu abondantes et aléatoires. Faut-il rappeler que les "nilomètres" égyptiens et les pluviomètres chinois, comme les barrages en terre mésopotamiens, datent de plusieurs millénaires. Les premiers constituaient un véritable réseau de stations limnimétriques qui permettaient de suivre, voire d'anticiper, les variations des crues du Nil, véritable aubaine pour le fellah; les seconds avaient pour but d'évaluer les apports pluviométriques et ainsi de planifier les calendriers culturels. Force est, tout de même, de reconnaître que la raison première de la mise en place de tels dispositifs avait été la volonté d'asseoir l'assiette de l'impôt sur des données objectives: les années à bonne hydraulicité devant se traduire par d'abondantes récoltes et par conséquent une meilleure solvabilité du paysan égyptien ou chinois. Si les Aztèques ne disposaient pas de postes pluviométriques ou limnimétriques, ils n'en étaient pas

moins de grands hydrauliciens montrant une très grande maîtrise de l'eau, particulièrement dans les milieux lacustres, et d'excellents agriculteurs sachant pratiquer l'agriculture intensive.

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 300 ans de la période coloniale (1521-1821), il y aurait eu, toujours d'après le même auteur, 88 sécheresses, dont, on peut penser, 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<sup>e</sup> siècle n'est pas épargné avec un épisode remarquable entre 1850 et 1852; de 1875 à 1910, Bovin dénombre 29 épisodes secs dont 15 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 proposée en tête de ce chapitre, sans que toutefois, semble-t-il, et différence importante, ne soit considérée 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 10 ou 13 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 l'événement.

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 20, 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. Cette technique, proposée par Hiez (1975), 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 de 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 prise individuellement. Ceci suppose qu'un nombre suffisant de stations (trois au minimum) ait 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.

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. Un exemple de cet effet est donné par l'augmentation de la température de la terre provoquée par l'effet de serre, augmentation vérifiée par le satellite franco-américain *Poseidon* qui a pu mesurer une élévation significative du niveau des océans en seulement trois ans, ce qui pourrait correspondre à une accélération récente du phénomène. Il se peut également que la moyenne soit fonction de la chronologie, mais qu'elle reste stationnaire lorsqu'elle est

calculée sur une durée suffisamment longue; il s'agit alors d'effets cycliques ou pseudo-cycliques. Par ailleurs, chaque valeur de la chronique peut ne pas être indépendante de la ou des valeurs précédentes, la suite restant tout de même stationnaire, l'effet constaté est alors un effet de persistance. Enfin, suivant l'intervalle de temps séparant deux observations, pourront être détectées ou non les variations saisonnières du phénomène étudié: c'est généralement le cas des relevés mensuels de précipitations. Ainsi, la valeur d'une variable mesurée à un instant  $t$  peut se décomposer de la manière suivante:

$$P(t) = T(t) + C(t) + S(t) + E(t)$$

Où T représente la tendance générale;  
 C, la composante cyclique;  
 S, la composante saisonnière;  
 E, un terme qui tient compte à la fois de l'effet de persistance et des variations résiduelles aléatoires.

Le graphique 2 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 73 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.

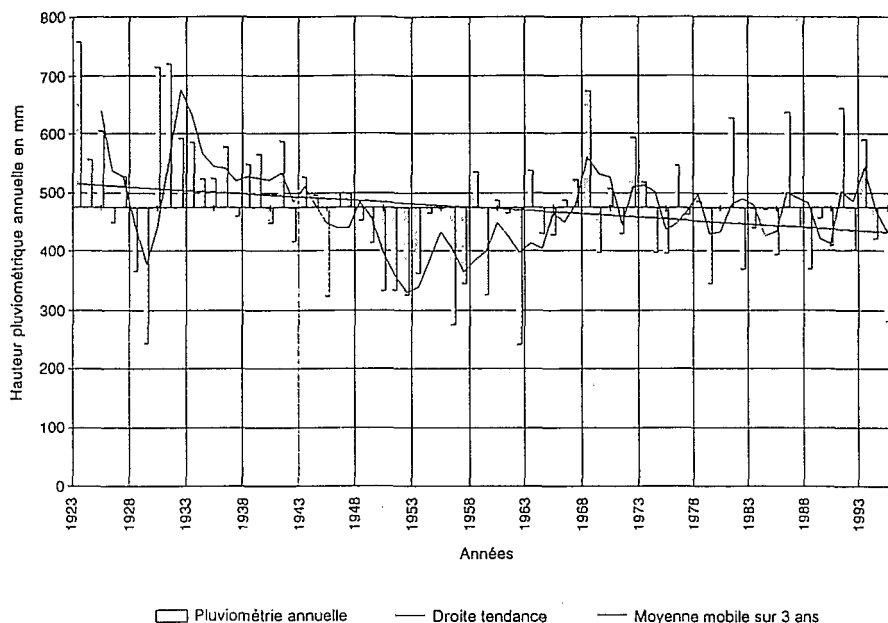
À l'examen de la série, quelques grandes variations pluriannuelles peuvent être décrites. Le début de la chronique se caractérise par une succession d'années excédentaires de 1923 à 1927, avec cependant une nette tendance à la baisse qui se poursuit au cours des années 28 et 29, marquées par un très fort déficit. À partir de 1930, commence une période pluvieuse qui s'étend jusqu'au début des années 40: les deux premières années (1930 et 1931) sont, après 1923, les deux plus fortes observées en 73 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.

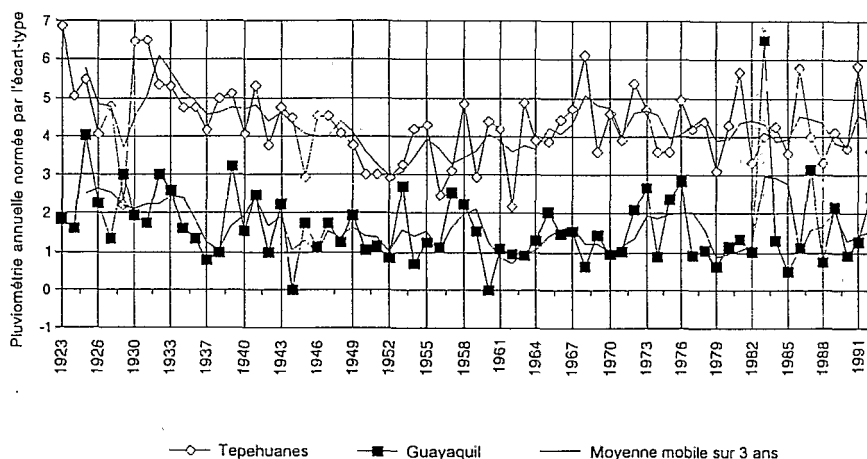
Il faut souligner que des distributions chronologiques assez proches ont été observées sur le pourtour du Pacifique oriental, entre autres en Amérique du Sud dans la région côtière méridionale de l'Équateur, pourtant exposée directement à l'influence de l'ENSO qui tend à accuser l'amplitude des variations (graphique 3).

Contrairement à ce qui est souvent affirmé, la sécheresse actuelle n'a pas commencé en 1992 après les fortes précipitations de 1991, mais en 1994, l'année 1993 ayant partout été supérieure à la normale. La hauteur pluviométrique de 1995 est comparable à celles de 1929, 1956 et 1962; son temps de retour serait voisin de 40 ans. Par ailleurs, si l'on s'intéresse aux successions d'années les plus faibles, on constate que 1928-1929 n'ont totalisé que 608 mm et 1956-1957, 617 mm; en prenant de trois à 10 années consécutives, ce sont toujours le début des années 50 et la fin des années 40 qui donnent les totaux les plus faibles.

Les séries humides des années 30, comme les séries sèches des années 50, 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 des années précédentes. Dans ce cas, la répartition des précipitations ne serait pas purement aléatoire. L'analyse des effets de dépendance dans une série chronologique s'effectue en



Graphique 2 - Précipitations annuelles observées à Tepehuanes.



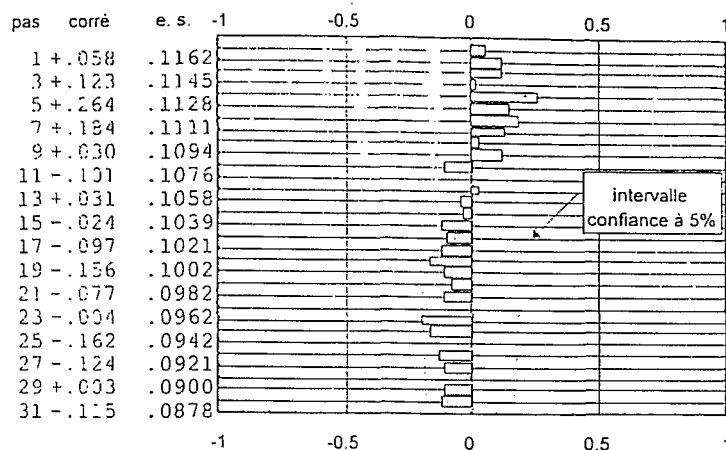
Graphique 3 - Variations des hauteurs pluviométriques annuelles à Tepehuanes (Nord-Mexique) et Guayaquil (Équateur).

calculant simplement le coefficient de corrélation de deux valeurs successives de la variable étudiée (en l'occurrence, les précipitations annuelles observées à une station), séparées par  $k$  intervalles de temps:  $P_t$  et  $P_{t+k}$ ,  $k$  étant exprimé en années. Ce coefficient s'appelle coefficient d'autocorrélation  $\rho$ ; pour  $k = 1$ , il est dit coefficient d'ordre 1 (d'ordre  $n$  pour  $k = n$ ). L'autocorrélogramme est une représentation graphique qui montre les variations de  $\rho$  en fonction de  $k$ . Il faut préciser que cette méthode, proposée par Box et Jenkins, s'applique à des séries stationnaires pour lesquelles la valeur de  $\rho$  ne dépend que de  $k$  et

pas du temps  $t$ . L'autocorrélogramme du graphique 4, où sont donnés les 31 premiers coefficients de corrélation estimés à partir des précipitations annuelles de Tepehuanes, indique qu'un seul de ces coefficients est significatif au seuil 5% ( $p = 0,26$  au maximum pour 66 observations) et que, surtout, leur valeur ne décroît pas en fonction de l'ordre  $k$ , preuve que n'intervient aucun effet de persistance. En effet, la dépendance qui peut exister entre valeurs successives décroît logiquement lorsque augmente l'intervalle de temps séparant les observations considérées.

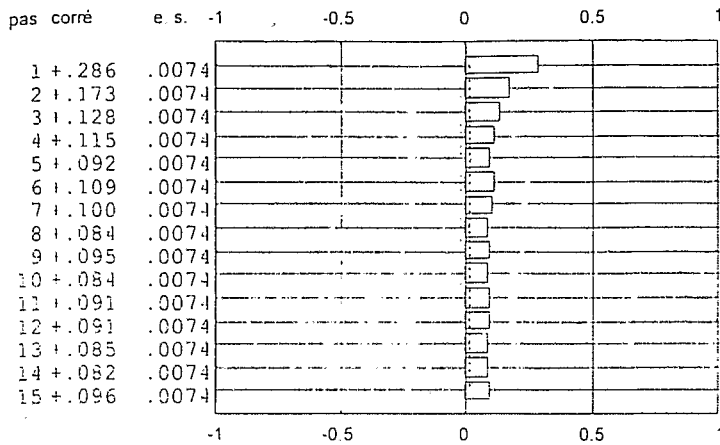
Néanmoins, il est intéressant de noter que les 10 premiers pas de temps correspondent à des corrélations positives, alors que les 21 suivants indiquent une corrélation négative. Ces liaisons ne sont, cependant, pas suffisamment étroites pour signaler la présence d'éléments cycliques. Le tracé du périodogramme, technique qui permet de détecter les variations périodiques d'une série chronologique, à condition, toutefois, que celles-ci correspondent plus ou moins à la superposition de cycles approximativement sinusoïdaux (série de Fourier), ne permet pas davantage de mettre en évidence une certaine périodicité des pluies annuelles. Les cycles principaux qui apparaissent ont des périodes dont la durée peut être qualifiée de triviale: 73 ans, qui se rapportent à la durée complète des observations; deux à trois ans, qui correspondent à l'alternance normale de précipitations plus ou moins fortes, ou plus ou moins faibles. La méthode de la moyenne mobile, qui consiste à remplacer la précipitation d'une année déterminée par la moyenne des précipitations d'une période choisie, centrée sur cette même année, permet d'éliminer les cycles de durée égale à cette période. Toutefois, le processus amplifie les cycles longs et fait apparaître des pseudo-cycles qui peuvent mener à des conclusions erronées (effet Sulsky).

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 20 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



Graphique 4 - Autocorrélation Tepehuanes - précipitations annuelles.

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 (sans date) 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 flan 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-



Graphique 5 - Autocorrélation Tepehuanes - précipitations journalières.

Mexique semble montrer que les grandes causalités des phénomènes climatiques, et plus particulièrement pluviogènes, restent encore à préciser même si certaines grandes tendances commencent à être mises en évidence. Admettre que la variabilité observée n'est que temporelle, les structures spatiales restant relativement homogènes, est une attitude probablement réductrice, certes compréhensible lorsque l'analyse est faite à l'échelle de la planète. 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 40 à la moitié des années 60 à la classe, qualifiée par Moron, 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.

L'absence d'effet de persistance à l'échelle annuelle est confirmée au niveau saisonnier, c'est-à-dire qu'un été pluvieux ne suit pas nécessairement un hiver et un printemps (ou ne précède pas un automne et un hiver), anormalement humides. Néanmoins, nous avons pu observer qu'en 73 ans de relevés, effectués à la station de Tepehuanes, les sept plus fortes hauteurs pluviométriques, corres-

pondant à la saison estivale qui s'étend de juin à septembre (précipitations supérieures à 470 mm, alors que la moyenne saisonnière n'est que de 364 mm), ont toutes été précédées d'une saison hivernale (janvier-avril) inférieure à la normale qui est de 38 mm.

Si à l'échelle annuelle et saisonnière, aucun effet de persistance caractéristique n'a été mis en évidence, il en va différemment lorsque l'analyse est faite au niveau de l'événement pluviométrique, c'est-à-dire, d'une manière pratique, au niveau des totaux pluviométriques journaliers. Le fait que l'autocorrélogramme des relevés quotidiens de la station de Tepehuanes (1923-1995) montre une décroissance des coefficients d'autocorrélation en fonction de leur ordre est la preuve que la persistance est le facteur dominant de l'organisation de la série (graphique 5). L'exemple de Tepehuanes n'est donné qu'à titre illustratif, mais le phénomène concerne l'ensemble des stations pluviométriques de la zone étudiée. La répartition des jours de pluie au cours d'une période déterminée n'est donc pas absolument aléatoire. En d'autres termes, le phénomène de persistance se manifeste par le fait que la probabilité d'observer un jour avec pluie dépend des états des jours précédents.

Plusieurs modèles permettent de prendre en compte un tel phénomène: les chaînes de Markov et le schéma de Polya en sont deux exemples. Ce dernier modèle, qui a été émis au point pour reproduire le phénomène de contagion lors d'épidémies, semble particulièrement bien adapté aux séries étudiées: on considère qu'entre les tirages au sort successifs, effectués dans un certain ordre dans un nombre déterminé d'urnes, contenant toutes des boules blanches et des boules noires en proportion différente, il y a interdépendance. Ceci se traduit par le fait qu'après chaque tirage, non seulement la boule extraite est remise dans l'urne mais est également ajouté un certain nombre de boules de la même couleur. Le facteur de contagion ou, dans le cas qui nous intéresse de persistance, est représenté par la relation:  $p = \sigma^2/m - 1$ ,  $m$  et  $\sigma^2$  étant la moyenne et la variance des occurrences de l'événement considéré. Ce dernier est défini ici par "un jour de pluie suit un autre jour de pluie", c'est-à-dire que l'occurrence 0 correspond à un jour de pluie isolé. Le tableau 5 permet de comparer les nombres de séquences observés de  $k$  jours de pluie, à la station de Guanacevi (Sierra Madre occidentale), pour un seuil inférieur de 0,1 mm, aux nombres théoriques, calculés en appliquant le schéma de Polya.

Longueur séquence (jours)	Nombre séquences observées	Nombre séquences Polya
1	833	815
2	397	372
3	197	212
4	116	121
5	73	83
6	43	53
7	34	35
8	28	23
9	18	16
10	7	11
11	9	8

Tableau 5 - Séquences des jours de pluie à Guanacevi.

On peut remarquer que les deux distributions sont très proches. Il faut, cependant, noter que le facteur de persistance est très lié à l'abondance pluviométrique; il est égal à 2,26 pour une précipitation annuelle de 600 mm; 1,25 pour 400 mm; et 0,22 seulement pour 200 mm. Un coefficient de persistance nul signifie que les séquences sont indépendantes.

### La sécheresse des années 90

L'année hydrologique 1991-1992 a été exceptionnelle au niveau des précipitations: une saison des pluies 1991 sensiblement normale, suivie de fortes pluies en septembre-octobre puis de nombreuses précipitations d'hiver, en décembre puis janvier et février 1992. Cette répartition des événements pluvieux, très favorables aux écoulements superficiels —sols saturés, pertes minimales par évaporation et évapotranspiration—, explique que le Nazas ait abondamment alimenté la grande retenue de El Palmito. Ces conditions exceptionnelles, jointes à des lâchers un peu précipités du barrage, ont fait que l'agglomération de Torreón-Gómez Palacio a été inondée à plusieurs reprises, phénomène observé

qu'une seule fois, en 1968, depuis la construction du réservoir. L'année 1992, malgré des premiers mois excédentaires, a été marquée par un déficit pluviométrique oscillant entre 15 et 25%, suivant les régions, la Sierra Madre occidentale étant la plus touchée. Après une année 1993 passablement abondante (+25%), les deux années suivantes se caractérisent par un déficit sensible qui peut atteindre 50% dans certaines régions. Les états de Chihuahua, Coahuila et Durango ont perdu de 10 à 25% de leur bétail bovin. Une fois encore, la Sierra Madre occidentale, château d'eau de tout le Nord-Ouest mexicain, a été affectée; ce qui a été dramatiquement souligné par le décès de 33 enfants tarahumaras, probablement morts de faim (Bovin 1995). En plus du drame local —perte du cheptel; haricots puis maïs en stress hydrique, dévorés par les criquets— c'est l'approvisionnement des secteurs irrigués environnants qui devient problématique: états de Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Durango et Zacatecas. Le niveau de El Palmito était, au mois de juin de 1996, au plus bas (sur le graphique 6, cette année ne comprend que la période sèche: janvier-mai). Déjà légèrement réduite en 1995, l'irrigation du vaste périmètre de la Laguna (60 000 ha, alimentés en eaux superficielles) a été réduite de moitié en 1996. Si les apports de cette année restent sensiblement les mêmes que ceux des deux années précédentes, moins de 350 millions de m<sup>3</sup> par an, pour des apports moyens de 1,2 milliards de m<sup>3</sup>, auxquels il faut retirer 20% environ, correspondant aux pertes par infiltration et évaporation; la situation deviendra vraiment dramatique puisque, dans le meilleur des cas, moins de 25% de la superficie du périmètre approvisionnée en eau superficielle pourront être irrigués. Évidemment l'irrégularité des écoulements superficiels est bien supérieure à l'irrégularité des précipitations puisque d'autres facteurs, à effet souvent cumulatif, interviennent: répartitions spatiales et temporelles des pluies, humidité du sol, par exemple. Estrada (1995) a montré que pour des bassins de plusieurs milliers de km<sup>2</sup>, situés dans la Sierra Madre occidentale, aucun écoulement n'est observé tant que le total des précipitations n'atteint pas 100 mm, ce qui représente souvent près du tiers des pluies reçues durant la saison estivale. Ceci explique que pour un coefficient de variation moyen  $C_v$  égal à 0,23, représentatif de l'ensemble des précipitations annuelles de la Sierra, correspond un  $C_v$  de 0,67 pour les apports au barrage de El Palmito qui pourtant comprennent les pluies tombant directement sur la retenue. On conçoit aisément que

dans ces conditions la capacité maximale de stockage (3 milliards et demi environ) n'a été atteinte qu'à deux reprises (1968 et 1991) depuis l'entrée en opération de l'ouvrage en 1946 (graphique 6).

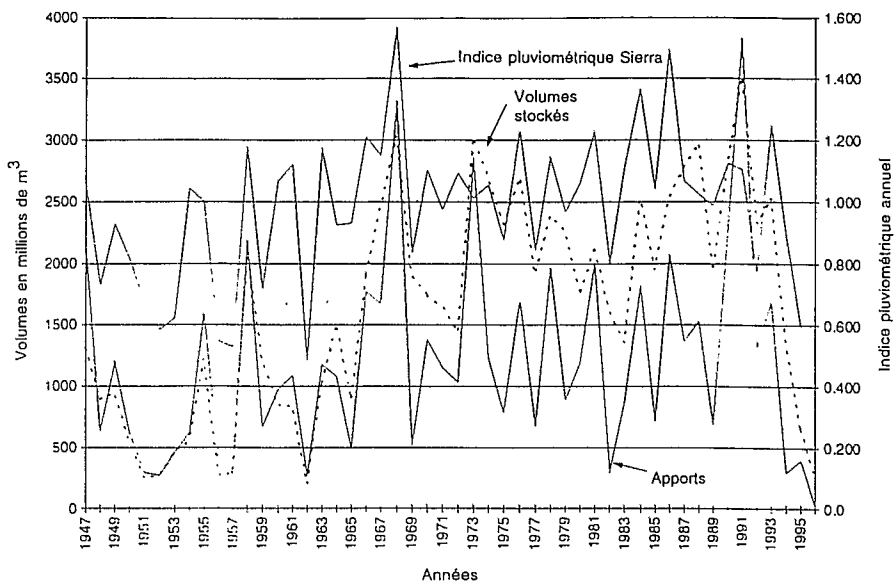
Cependant, des situations beaucoup plus précaires ont été observées dans les années 50 quand à des apports exceptionnellement faibles se surajoutait une demande en eau supérieure à la demande actuelle (1,70 milliards de m<sup>3</sup> en 1950 pour 1,1 milliards aujourd'hui). Cette différence s'explique, au moins partiellement, par le fait que si le réseau d'irrigation a aujourd'hui une efficacité totale de conduction de 77%, celle-ci était beaucoup plus faible dans les années 50 lorsque les canaux du réseau n'étaient pas revêtus. De 1950 à 1954, soit durant cinq années consécutives, la moyenne des apports n'a été que de 450 millions de m<sup>3</sup> par an. De 1948 à 1965, ces mêmes apports n'ont dépassé que deux fois la valeur moyenne, en 1955 et 1958. L'analyse statistique montre que les apports de l'année 1995 correspondent sensiblement à une fréquence de 0,10; soit un temps de retour de 10 ans, alors que l'année 1994, sensiblement plus déficitaire, se caractérise par une période de retour de 21 ans. Les apports cumulés de ces deux mêmes années ont, par contre, une fréquence sensiblement plus rare qui correspond à un temps de retour de 45 ans.

En mai 1996, c'est-à-dire avant que ne commence la saison des pluies, le niveau de la retenue était comparable à celui de la fin des années 1951, 1952, 1956, 1957 et 1962, cette dernière année ayant terminé avec un stock de seulement 194 millions de m<sup>3</sup>.

### Conclusion

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.

Les caractéristiques physiques de ces milieux, et en premier lieu les conditions édaphiques, inter-



Graphique 6 - Retenue de El Palmito. Apports et volume stockés. Indice pluviométrique annuel de la Sierra Madre occidentale.

viennent 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 et surtout irréversibles.

- 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'auto-conservation qui se manifeste par une réduction du couvert végétal, l'espace laissé libre devenant alors définitivement stérile. Le développement extrême de cette évolution aboutirait à la formation d'un véritable désert minéral.
- La deuxième, 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*: forme de tenure collective de la terre instaurée avec la réforme agraire qui a suivi la Révolution mexicaine), 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 des agglomérations 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'accroître. Le surpâturage sur de très grands espaces, depuis de nombreuses décennies (grandes haciendas de la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> 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.

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 soit rompu, ne peut donc venir que d'un changement du comportement de l'homme dans l'exploitation des ressources naturelles dites renou-

velables, qu'il s'agisse de l'eau, du sol ou de la végétation. Une attitude résolument conservationniste semble actuellement la seule planche de salut pour que le point de non-retour, déjà atteint dans certaines régions, ne se généralise pas.\*

## Bibliographie

- Bouvier, C. 1983 - Étude des effets de dépendance dans une série chronologique. Application à l'étude des séquences de jours de pluies. *Cahiers ORSTOM*, sér. hydrol. (XX) 2: 79-116. Paris.
- Bovin, Ph. 1995 - Les sécheresses au Mexique. *Sécheresse* (VI) 1: 53-58, mars 1996.
- Cadier, E. 1991 - Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien semi-aride. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, 1 vol. 396 p.
- Comisión Nacional del Agua 1975 - *Atlas del agua*. Mexico.
- Cornet, A. 1988 - Principales caractéristiques climatiques. Dans *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo y agua en la reserva de Mapimí*: 45-76. Instituto de Ecología, Mexico.
- Delhoume, J.-P. 1995 - Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la biosphère de Mapimí, Nord-Mexique). Thèse de doctorat. Université de Poitiers, 300 p.
- Descroix, L., J. Estrada et C. Bouvier 1994 - Hidrometría. Dans *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica* 36. Publications INIFAP/CENID-RASPA et ORSTOM-DEC. Gómez-Palacio (Mexique), 367 p.
- Estrada, J. 1995 - Modélisation conceptuelle appliquée aux bassins versants du Nord-Mexique (RH36). Mémoire DEA d'Hydrologie. Université de Montpellier II. 74 p.
- Estrada J., C. Bouvier et L. Descroix 1995 - Pluviometría. Dans *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica* 36. Publications INIFAP/CENID-RASPA et ORSTOM-DEC. Gómez-Palacio (Mexique).
- Hiez, G. 1977 - L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM*, sér. hydrol. (XIV) 2: 129-172. Paris.
- 1986 - Bases théoriques du Vecteur Régionale. (Les premières applications et leur mise en œuvre informatique), Collection ORSTOM *Colloques et Séminaires, Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier*: 1-36, 16-17 sept. 1986.
- Lebel, T. 1984 - Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant: estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Thèse de docteur-ingénieur. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Meylan, P. 1986 - Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage. Application à la pluviométrie. *Hydrologie continentale* (1) 1: 25-34. ORSTOM, Paris.
- Moron, V. 1996 - Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992). *Sécheresse* (7) 1: 25-32, mars 1996.
- Nouvelot, J.-F. et P. Pourrut 1994 - Anomalies et phénomènes climatiques extrêmes. Dans *L'eau en Équateur*: 87-98. ORSTOM, Paris.
- Nouvelot, J.-F., P. Le Goulven et P. Pourrut 1994 - Analyse statistique et régionalisation des précipitations en Équateur. Dans *L'eau en Équateur*: 43-86. ORSTOM, Paris.

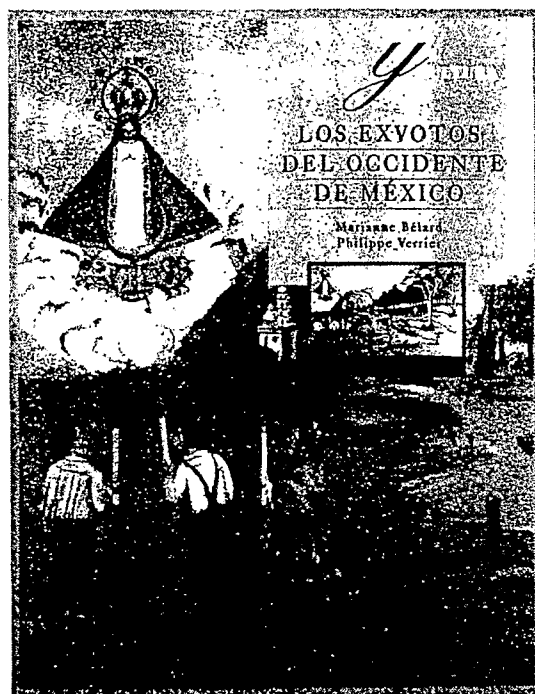


Palm, R. 1992 - Série chronologiques (Comment interpréter les résultats). *Collection STAT - ITCF*. Paris, 80 p.  
Rossel, F., H. Semiond et S. Clairet s.d. - Regionalización de la pluviometría anual del Ecuador para el estudio del impacto del ENSO en los regímenes pluviométricos: 56. ORSTOM-INAMHI.  
Riou, C. 1975 - La détermination pratique de l'évaporation. *Mémoires-ORSTOM*. Paris, 235 p.

Thauvin, V. et F. Delclaux 1992 - *Spatial, module vario (Traitement de données spatialisées, calcul de variogrammes)*. Note technique. Laboratoire d'hydrologie ORSTOM, Montpellier, 80 p.  
Santibáñez 1992 - *La Laguna*. Monographie publiée à compte d'auteur. Torreón, Mexique, 240 p.

## RELIGIÓN Y CULTURA LOS EXVOTOS DEL OCCIDENTE DE MÉXICO

Marianne BÉLARD y Philippe VERRIER



*Milagros, milagrosos y retablos: introducción al estudio de los exvotos del Occidente de México.*  
Thomas CALVO



*En busca de los retablos del Occidente de México.*  
Philippe VERRIER



*Modelo de ficha utilizada en la catalogación de los exvotos*



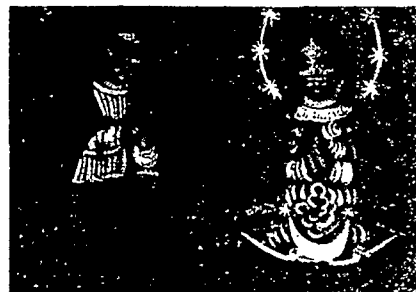
*Un acercamiento a los exvotos del santuario de San Juan de los Lagos.*  
Marianne BÉLARD



*Series de exvotos ejecutados por el mismo milagrero*



*Temas y cronología en los exvotos de San Juan de los Lagos*



*47 fotografías a color*