

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 hydraulité 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.

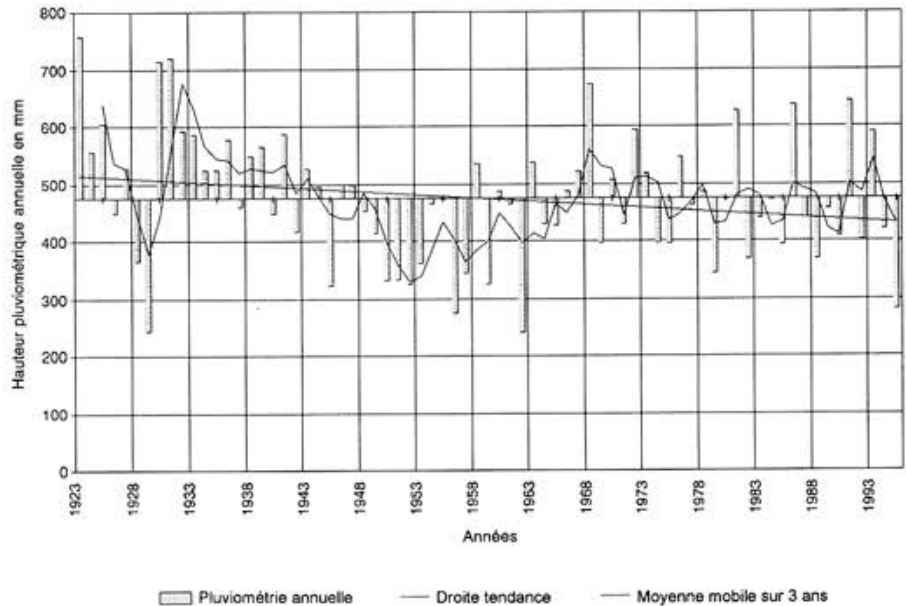
À l'examen de la série, quelques grandes variations pluriannuelles peuvent être décrites. Le début de la chronique se caractérise par une succession d'années excédentaires de 1923 à 1927, avec cependant une nette tendance à la baisse qui se poursuit au cours des années 28 et 29, marquées par un très 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.

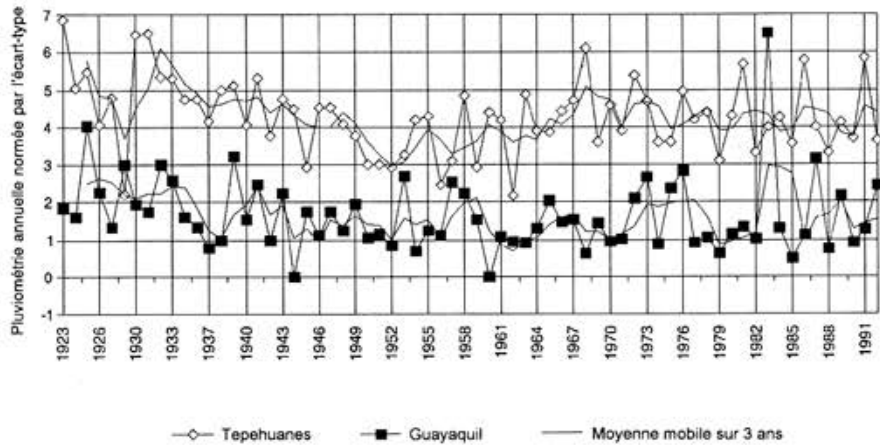
Il faut souligner que des distributions chronologiques assez proches ont été observées sur le pourtour du Pacifique oriental, entre autres en Amérique du Sud dans la région côtière méridionale de l'Équateur, pourtant exposée directement à l'influence de l'ENSO qui tend à accuser l'amplitude des variations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



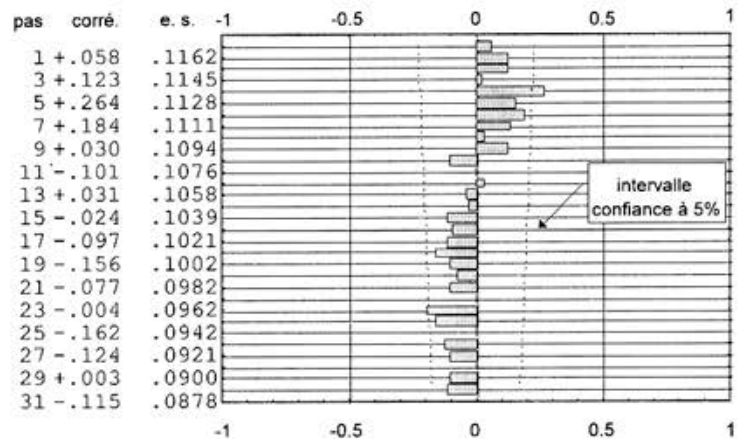
Graphique 3 - Variations des hauteurs pluviométriques annuelles à Tepehuanes (Nord-Mexique) et Guayaquil (Équateur).

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% ( $\rho = 0,26$  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.

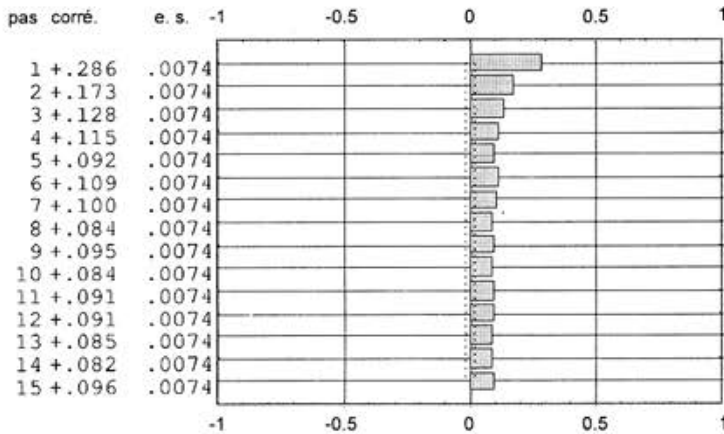
Néanmoins, il est intéressant de noter que les 10 premiers pas de temps correspondent à des corrélations positives, alors que les 21 suivants indiquent une corrélation négative. Ces liaisons ne sont, cependant, pas suffisamment étroites pour signaler la présence d'éléments cycliques. Le tracé du périodogramme, 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 sinusoidaux (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'ait été atteinte qu'à deux reprises (1968 et 1991) depuis l'entrée en opération de l'ouvrage en 1946 (graphique 6).

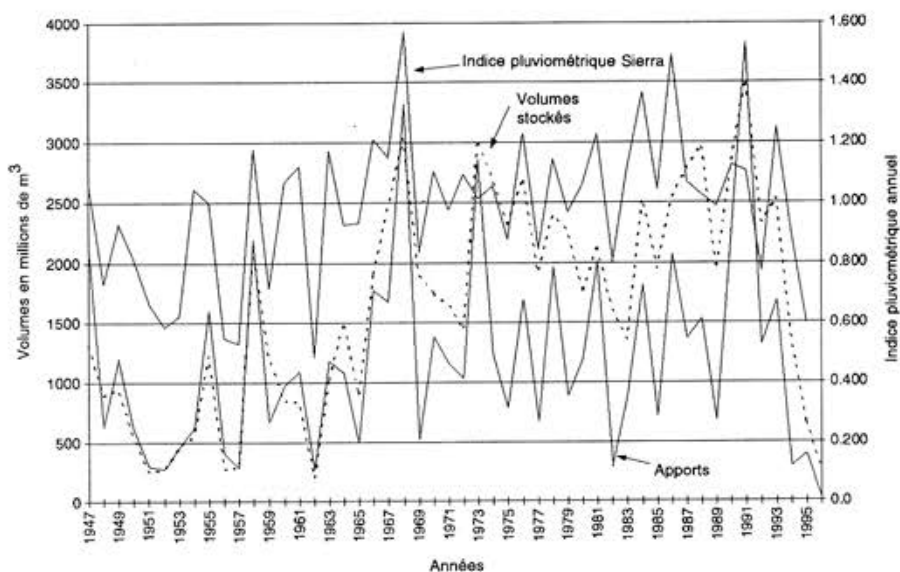
Cependant, des situations beaucoup plus précaires ont été observées dans les années 50 quand à des apports exceptionnellement faibles se surajoutait une demande en eau supérieure à la demande actuelle (1,70 milliards de m<sup>3</sup> en 1950 pour 1,1 milliards aujourd'hui). Cette différence s'explique, 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'autoconservation 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 conservatrice semble actuellement la seule planche de salut pour que le point de non-retour, déjà atteint dans certaines régions, ne se généralise pas.\*

## Bibliographie

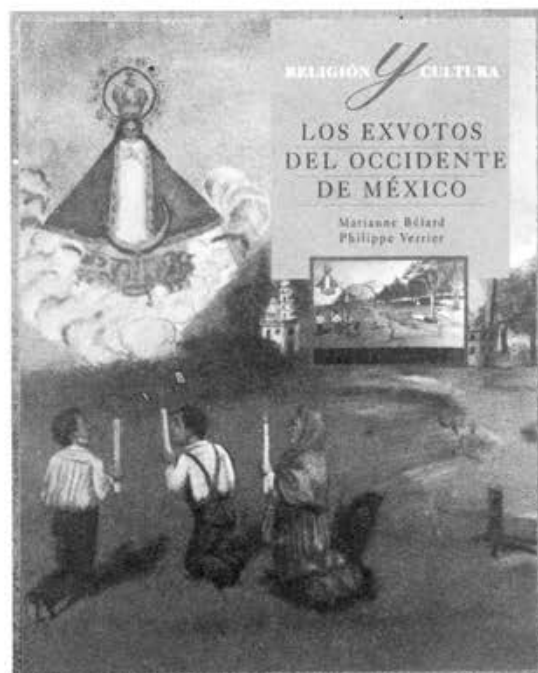
- Bouvier, C. 1983 - Étude des effets de dépendance dans une série chronologique. Application à l'étude des séquences de jours de pluies. *Cahiers ORSTOM, sér. hydrol.* (XX) 2: 79-116. Paris.
- Bovin, Ph. 1995 - Les sécheresses au Mexique. *Sécheresse* (VI) 1: 53-58, mars 1996.
- Cadier, E. 1991 - Hydrologie 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 (Mexico), 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 - Pluviométrie. 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 (Mexico).
- 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 grades 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*