

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.

* Directeur de Recherche à l'ORSTOM.

** Chargé de Recherche à l'ORSTOM.

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 m³, 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



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 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

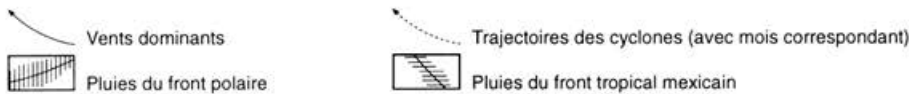
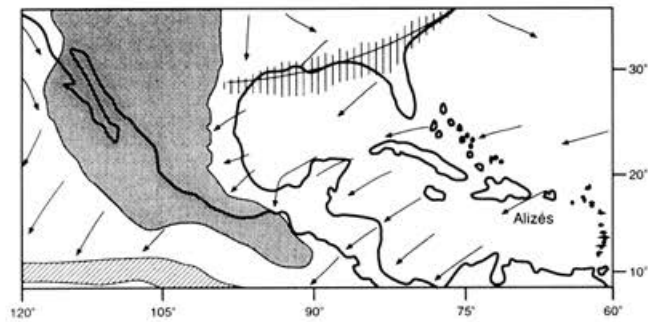
zones les plus arides du Nord-Mexique ne présentent pas de telles irrégularités, la variabilité climatique y est cependant notable. La région retenue, pour analyser à la fois les phénomènes d'aridité et de sécheresse, se situe dans la partie Sud du désert de Chihuahua (carte 1).

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

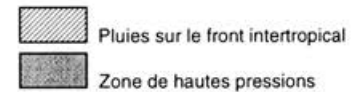
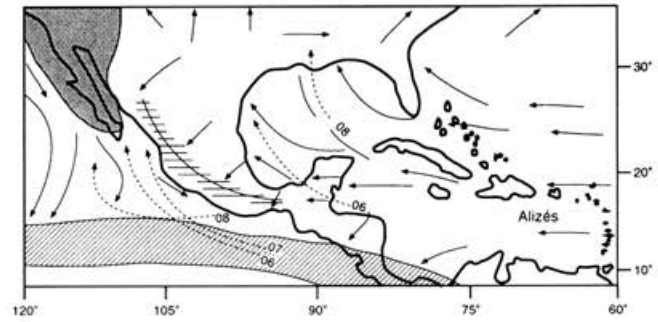
Le climat qui caractérise l'ensemble du Nord-Mexique est régi essentiellement par sa situation en latitude nord du tropique du Cancer, où la circulation zonale est sous la dominance des hautes pressions subtropicales; par son relief qui fait obstacle à l'entrée des flux humides; et par les remontées 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



SOURCE: *Climatología de México*.

Carte 2 - Décembre-février



SOURCE: *Climatología de México*.

Carte 3 - Juin-août.

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-

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 Papasquiario 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 | Juil | 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.

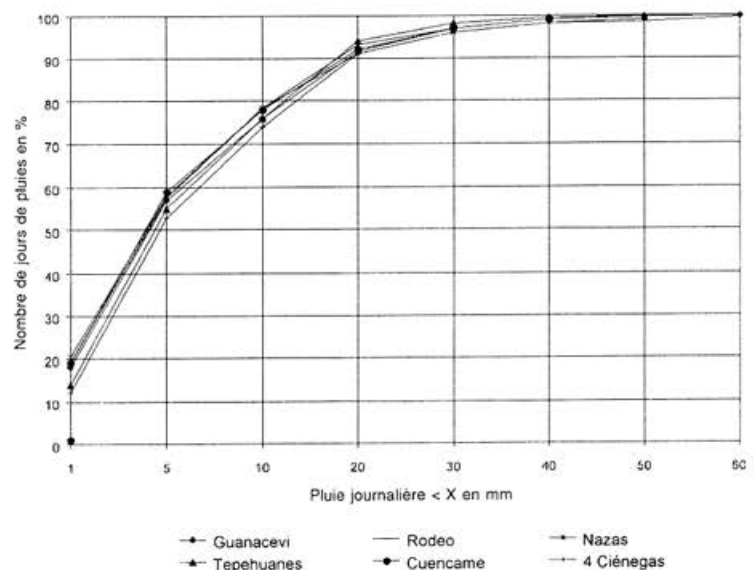
Les précipitations journalières présentent, elles mêmes, certaines caractéristiques très cohérentes. Si le nombre de jours de pluie (supérieure à 0,1 mm) augmente avec la hauteur de précipitation annuelle (augmentation sensiblement linéaire entre 200 et 600 mm: de 14 à 15 jours de pluie supplémentaires 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 | |
| 500 | 0,20-0,30 | 0,20-0,30 | 0,35-0,45 | 0,40-0,60 | 0,15-0,30 |
| 600 | 0,15-0,30 | 0,20-0,30 | 0,30-0,40 | 0,40-0,55 | |

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

L'écart-type ou la variance (σ^2), qui mesure la dispersion des observations autour de la moyenne par, comme son nom l'indique, un simple calcul d'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 km², 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 km². 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-

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 pluvigènes 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 km² à quelques dizaines de km², 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 m³ alors que leur bassin versant dépasse rarement 20 km², 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", expri-

| 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