

Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations : application à une région endoréique du Nord-Mexique

Complementarity and convergence of rainfall regionalisation processes: application to an endoreic basin of Northern Mexico

L. DESCROIX^{1,*}, J.F. NOUVELOT², J. ESTRADA³, T. LEBEL¹

Reçu le 17 janvier 2001, accepté le 16 juillet 2001**.

SUMMARY

Knowledge of annual rainfall is of great importance in arid and semi-arid areas, because water management is dominated by scarcity. The Nazas-Aguanaval river basin constitutes one of the main endoreic basins in Mexico (92000 km²). It extends from the crests of the Western Sierra Madre to as far as the Chihuahuan desert, in the states of Durango, Coahuila and Zacatecas. Spatial variability of rainfall is significant with annual rainfall amounts ranging from 900 mm in the higher areas of the Sierra Madre to 180 mm at the centre of the Laguna de Mayran. However, temporal variability of the precipitation amount is also appreciable, and it increases from the sub-humid areas of the mountains to the desert. The coefficient of variation for annual precipitation ranges from 0.2 in the mountains to 0.4 in Chihuahuan desert. Furthermore, in 1992, 1994, 1995, and from 1997 to 2000 severe rainfall deficits forced farmers to reduce strongly irrigated areas, thus leading to socio-economic development problems in this region. It is shown in this paper that an improvement in water availability knowledge is attainable by the determination of homogeneous rainfall regions, based on complementary or convergent methods.

Rainfall distribution is a result of many factors, including the atmospheric circulation, the continental pattern, the coastal design, the location of major mountainous massifs, the distance from the ocean, and other site factors. The regionalisation of precipitation has been the subject of much research for almost all types of climates. The influence of zonal and regional factors is also determined in regional monographs where the role of local variables (relief, vegetation, general roughness of landscape, etc.) is described in relation to the large-scale circulation scheme. In most of the cases, the interpolation of

1. LTHE-IRD, BP 53, 38 041 Grenoble cedex 9, France.

2. IRD.

3. Cenid-Raspa/INIFAP, AP 225-3, 35 071 Gomez Palacio Zl, DGO, Mexique.

* Correspondance. E-mail : descroix@hmg.inpg.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 14 août 2002.

values between two observations is necessary and quite difficult. Kriging is widely used for this purpose, as is co-kriging, which takes into account the topography or some other local factors and frequently gives better reconstitution of rainfall data.

In order to determine the first set of homogeneous regions in northwestern Mexico, the elevation gradient of the rainfall amount was defined by a simple regression. All the stations were located with respect to the regression line and they can form apparent groups. The following relation was obtained :

$$P = 0.31 H - 133 \quad (r^2 = 0.73; n = 84)$$

(where P is annual rainfall in mm and H the altitude in m).

In the same way, various statistical analysis were performed using all data available from the rainfall measurement stations, such as elevation, distance from the Pacific Ocean, exposure, annual rainfall amount, and the type of topography and vegetation cover surrounding the station. An Empirical Orthogonal Function Analysis (EOF) and a Factorial Analysis of Correspondences (FAC) revealed other kinds of regionalisation. The precipitation regime is tropical-like in spite of the latitude (25° N), but the percentage of annual precipitation in winter appeared as a segregating factor and thus was used to define the climatic geography. This was determined by a stepwise discriminant analysis, which allowed the segregation of the north-eastern area of the Nazas-Aguanaval basin. This is the dryer region of the basin because it is less exposed to monsoon fluxes and the proportion of winter rain is higher there than in the remaining basin.

The main variables explaining the spatial distribution of precipitation are altitude and distance from the Pacific Ocean, as determined by both the EOF analysis and the analysis of correspondences. The grouping of stations segregated by the elevation gradient regression led to regions where the homogeneity in relation to the annual rainfall amount was tested and verified by the Regional Vector Method (RVM). This method is based on the principle of pseudo-proportionality between annual rainfall amounts at close stations.

The Nazas-Aguanaval basin is divided into three climatic regions defined by precipitation: the Western Sierra Madre, the Chihuahuan desert, and a semi-arid area that is divided into two sub-regions (Middle Nazas basin and Aguanaval plateau) by the analysis of correspondences. As a result of the regional rainfall analysis, some variograms were performed to determine the length of the validity of the rainfall data. However, it appeared that a multidirectional variogram did not explain these data. The role that relief (mainly the Western Sierra Madre) plays in the spatial distribution of precipitation does not explain the length of rainfall data. Introducing the direction of mountain range into the variogram demonstrated that the relief played a significant role, and in this case the length of the rainfall variogram data was 180 km.

A comparison of results obtained using each method led to the conclusion that the boundaries between homogeneous regions are often the same while the determination processes are different. Finally, all the proposed methods are complementary and the differences between all characterisations give additional information regarding the local and regional processes that explain the annual rainfall spatial distribution.

Simple tools have been used to acquire a better knowledge of rainfall spatial distribution. In the case of Northern Mexico, the low density of a measurement network (rain gauges), particularly in mountainous or arid zones, is partially attenuated by the possibility of evaluating the main climatic characteristics for the different regions defined in terms of rainfall.

Key-words: *regionalisation, annual mean rainfall, regional vector, statistical analysis, elevation gradient, Northern-Mexico.*

RÉSUMÉ

La connaissance des champs pluviométriques annuels est importante dans les zones arides et semi-arides où la gestion de l'eau est un exercice permanent d'aménagement de la pénurie, comme cela est le cas au nord du Mexique.

On se propose de montrer ici qu'une meilleure connaissance des disponibilités en eau peut s'appuyer sur la détermination de régions pluviométriquement homogènes à partir de diverses méthodes complémentaires ou convergentes.

Pour définir des régions homogènes, on part de la répartition des stations par rapport à la régression pluviométrie/altitude. Des analyses factorielles en composantes principales et des correspondances permettent également de proposer des régions homogènes suivant des variables définies et disponibles pour toutes les stations. On s'appuie aussi sur les régimes pluviométriques pour déterminer d'autres régionalisations. Parallèlement on a pu utiliser la répartition des stations par rapport au gradient altitudinal pour créer des régions dont l'homogénéité vis-à-vis des précipitations a pu être vérifiée par la Méthode du Vecteur Régional (MVR), basée sur le principe de la pseudo-proportionnalité des données de postes proches.

La comparaison des résultats obtenus par chacune des méthodes permet de constater que dans la région traitée, les limites entre régions « homogènes » sont souvent les mêmes, bien que les modes de détermination soient différents. Enfin, les différences apportent une information supplémentaire pour la compréhension des mécanismes locaux ou régionaux de la répartition des champs de pluie.

Mots clés : *régionalisation, précipitations annuelles moyennes, vecteur régional, analyses statistiques, gradient altitudinal, Nord-Mexique.*

1 – INTRODUCTION

La géographie des pluies obéit à de multiples contraintes et ce à diverses échelles emboîtées. À partir de la circulation atmosphérique globale (échelle zonale), la répartition des précipitations est influencée par la forme des continents, par la disposition des principales chaînes de montagne, par l'orientation de ces éléments (côtes, reliefs) vis-à-vis des flux dominants et par la continentalité, entre autres. À une échelle plus régionale, le profil des montagnes, l'importance de l'orientation et la profondeur des vallées, l'existence ou non de cols bas sont certains des éléments qui conditionnent la plus ou moins forte pluviosité. À l'échelle locale, l'exposition, la densité de la végétation, la rugosité d'ensemble du relief peuvent également être des éléments modifiant la pluviométrie.

La régionalisation des précipitations a fait l'objet de diverses recherches, en particulier au sujet des précipitations extrêmes dans les zones sahéliennes (LEBEL *et al.*, 1994 ; LE BARBÉ et LEBEL, 1997) aussi bien qu'en Amérique latine (GARCIA et VARGAS, 1996 ; ROSSEL, 1997) ou dans les pays du Nord (KIEFFER, 1998). Il s'agit en général de déterminer certains procédés qui permettent de synthétiser le mieux possible l'information pluviométrique telle qu'elle est connue par la collecte de données au niveau ponctuel. Il faut, pour cela, avoir une bonne connaissance des champs pluviométriques en s'appuyant sur des

méthodes fiables d'interpolation afin de mieux cerner les paramètres explicatifs de la variabilité spatiale, de la spatialisation de la réponse à la variabilité temporelle, etc.

Les facteurs zonaux et azonaux de la pluviométrie ont fait l'objet d'un grand nombre de recherches, incluses le plus souvent dans des monographies régionales dans lesquelles sont prises en compte, en particulier en zone de montagne, les variables altitude, exposition, site, etc. Et ce autant dans les régions tropicales (par exemple sur la Guadeloupe, LASSERRE, 1960) que tempérées (comme sur les Alpes, BLANCHARD, 1945). Elles ont fait l'objet de très nombreuses publications plus spécialement axées sur le sujet, comme celles pour les régions tropicales de l'Orstom-IRD (Monographies hydrologiques ; BRUNET-MORET *et al.*, 1986 ; LAMAGAT *et al.*, 1987 ; MONIOD *et al.*, 1977) mais aussi ORANGE (1990) dans le Fouta Djallon, HAYWARD et CLARKE (1996) en Sierra Leone ou celle de BARCELO et COUDRAY (1996) à la Réunion ; ou celles, pour la zone tempérée, de HUMBERT et PERRIN (1993) dans les Vosges (France) ou de KIEFFER (1998) dans les Alpes. Les principes en ont été résumés par ESCOURROU (1980). On connaît, en plus de ceux déjà cités, les paramètres de la variabilité spatiale de précipitations : éloignement de la mer, forme de versants, pente générale, paramètres qui conditionnent entre autres la position du maximum pluviométrique sur le versant, la décroissance des totaux pluviométriques en amont du maximum et surtout sur le côté opposé au flux pluviogène dominant (sous le vent), localisation de climats d'abri topographique, etc.

Dans tous les cas, l'interpolation des valeurs ponctuelles entre deux capteurs s'avère nécessaire et parfois délicate. Une des méthodes les plus utilisées est le krigeage (LEBEL et LABORDE, 1988) ou le co-krigeage qui tient compte, en plus de la donnée pluviométrique, de la forme du relief, comme permet de le faire, par exemple, la méthode Pluvia (HUMBERT *et al.*, 1998 ; MAHR et HUMBERT, 1999). Les paramètres topographiques sont aussi à la base des composantes principales utilisées par WOTLING *et al.* (2000) pour construire leur régionalisation des précipitations extrêmes sur l'île de Tahiti (Polynésie française). C'est aussi à partir d'une prise en compte du paysage, sous forme de composantes principales des caractéristiques du relief sur une certaine zone autour des postes, qu'a été montée la technique AURELHY (BENICHOUE et LE BRETON, 1987). Dans une région à forte variabilité spatiale de précipitations (les Cévennes, France), CREUTIN et OBLED (1982) ont comparé plusieurs méthodes statistiques et géostatistiques permettant de reconstituer des champs de pluie à différentes échelles temporelles, dont les corrélogrammes et les variogrammes. Le variogramme appliqué aux précipitations annuelles est, en effet, un excellent outil d'interpolation qui décrit la corrélation entre les observations effectuées simultanément dans l'espace, en plusieurs points, en fonction de la distance les séparant (LEBEL et LABORDE, 1988 ; NOUVELOT et DESCROIX, 1996). Cet outil a permis à HOLAWÉ et DUTTER (1999) de proposer une régionalisation des précipitations à l'échelle de l'Autriche.

La Méthode du Vecteur Régional, mise au point par HIEZ et COCHONNEAU (1992) permet la détection de données pluviométriques douteuses et, éventuellement, leur correction suivant le principe de la pseudo-proportionnalité des séries pluviométriques entre postes géographiquement voisins ; elle représente également une aide précieuse à la régionalisation, car les vecteurs ainsi constitués déterminent des régions « pluviométriques » au comportement homogène (ELGUERO *et al.*, 1994). Cette méthode a été utilisée pour critiquer les données

et pour mener à bien une première étude sur la géographie des précipitations dans le bassin du Nazas-Aguanaval dont il est question ici. Le même principe de pseudo-proportionnalité entre postes proches a aussi été adopté par ROSSEL et GARBRECHT (2000) pour l'estimation de valeurs manquantes afin de définir un indice pluviométrique régional dans les plaines de l'ouest des États-Unis.

2 – PROBLÉMATIQUE : MIEUX CONNAÎTRE LA RESSOURCE POUR MIEUX PRÉVOIR ET GÉRER SES UTILISATIONS

On s'est intéressé ici à une région du nord du Mexique sur laquelle des travaux ont déjà été réalisés, ce qui a permis de disposer d'une base de données volumineuse, et surtout de répondre aux interrogations des acteurs locaux quant à la variabilité spatiale des précipitations (DELHOUME, 1995 ; NOUVELOT et DESCROIX, 1996 ; DESCROIX *et al.*, 1997).

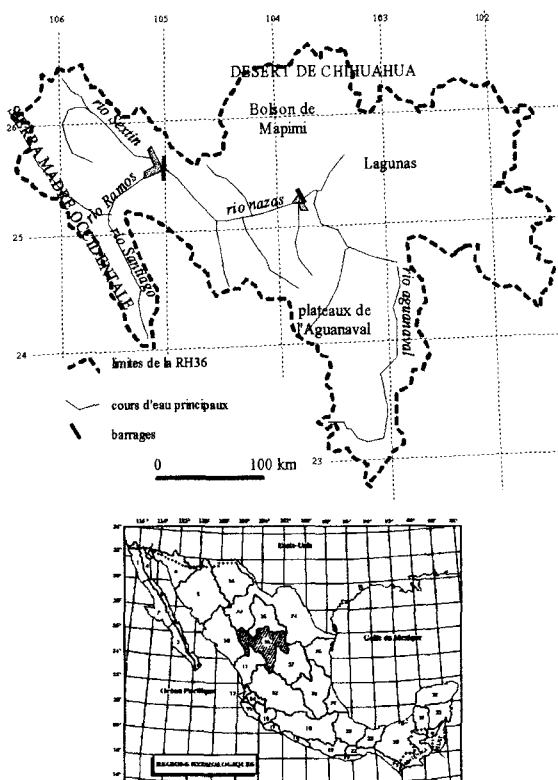


Figure 1 Localisation du bassin Nazas-Aguanaval et des principaux éléments du relief.
Location of the Nazas-Aguanaval basin and of the main relief elements.

Le bassin endoréique du Nazas-Aguanaval constitue la Région Hydrologique n° 36 (RH36), l'une des 37 régions hydrologiques du Mexique (*figure 1*). Elle est une des trois régions endoréiques du nord du pays, et s'étend sur les États de Durango, Zacatecas et Coahuila. Elle s'étire de la Sierra Madre Occidentale, à l'Ouest, aux lagunes de Mayrán et Viesca, à l'Est. Sa superficie est de 92 000 km². Le climat est subhumide dans la Sierra (qui représente un château d'eau pour une grande partie des zones arides du Nord-Mexique) à aride dans les Lagunes, qui constituent l'extrémité sud du désert de Chihuahua. La hauteur pluviométrique interannuelle varie de 900 à 180 mm d'Ouest en Est (DESCROIX *et al.*, 1997).

Au cœur de ce bassin se trouve la Comarca Lagunera, importante région agricole, autrefois cotonnière, aujourd'hui bassin laitier majeur du Mexique. Situé en pleine zone aride, ce périmètre irrigué de 160 000 hectares est tributaire presque entièrement de l'eau venue de la Sierra Madre ($1.10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$) par le Río Nazas ; l'autre cours d'eau important, le Río Aguanaval, ne fournit que 13 % des eaux apportées à la dépression endoréique.

Depuis bien longtemps, la consommation dépasse le volume disponible en eaux superficielles ; la différence est prélevée dans l'aquifère dont le niveau s'abaisse très vite. En effet, les volumes pompés sont bien plus élevés que la recharge de la nappe. Entre la partie haute du bassin versant, qui fournit l'essentiel de l'eau de surface (stockée dans le réservoir de la Presa Lázaro Cárdenas, 4.10^9 m^3), et la partie basse, qui la consomme, s'étend une vaste région semi-aride dont la pluviométrie annuelle est comprise entre 300 et 500 mm.

Une meilleure connaissance des apports pluviométriques est de plus en plus nécessaire au fur et à mesure que l'eau devient un enjeu stratégique et une ressource rare, à préserver impérativement. Ainsi, les responsables de la gestion de l'eau comme les utilisateurs dans la Région Hydrologique n° 36 (nom du bassin Nazas-Aguanaval pour les gestionnaires) n'ont que très récemment pris conscience de l'acuité du problème : ils pensaient jusqu'alors pouvoir combler le déficit global par transfert à partir des autres régions des hauts plateaux mexicains ; celles-ci, excédentaires il y a quelques années, sont également devenues déficitaires après l'installation de périmètres irrigués. On a pensé également détourner de l'eau du versant Pacifique de la Sierra (projet de conduite faisant passer l'eau du versant au vent vers le versant intérieur bien moins arrosé et topographiquement déprimé — il s'agit d'un graben), mais celui-ci, malgré une pluviométrie relativement abondante (plus de 1 000, voire $1\,500 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$) connaît une très forte variabilité interannuelle et des récurrences d'années sèches significatives (BOVIN, 1995), comme les années 1994, 1995, 1997 à 2000 incluses qui ont toutes connu des déficits pluviométriques de 20 à 50 % par rapport à la moyenne des années 1961-1990. La Région Hydrologique n° 36 ne peut donc plus compter sur les autres bassins pour son approvisionnement en eau, mais doit gérer au mieux sa propre ressource, ce qui rend nécessaire une meilleure connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations. Il est vrai qu'il existe aussi un problème politique, dans la mesure où il est évidemment très impopulaire de demander aux agriculteurs de restreindre leur consommation d'eau.

3 – FACTEURS ZONAUX ET RÉGIONAUX DE LA DISTRIBUTION DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES

La circulation atmosphérique à l'échelle zonale (figure 2) et la localisation du Nord-Mexique (figure 1) expliquent l'aridité globale de cette région. Les latitudes subtropicales en façade ouest des continents sont toujours arides et c'est bien le cas ici : les zones les plus sèches du Mexique sont les côtes de la mer de Cortès (golfe de Californie). Les hautes pressions y règnent de novembre à mai. Pendant les mois d'été boréal, elles se rétractent vers le Nord-Ouest, laissant entrer les masses d'air tropicales (alizés, mousson) et les cyclones sur l'essentiel du Nord-Mexique (sauf la Californie) (figure 2, Comision Nacional del Agua, 1975).

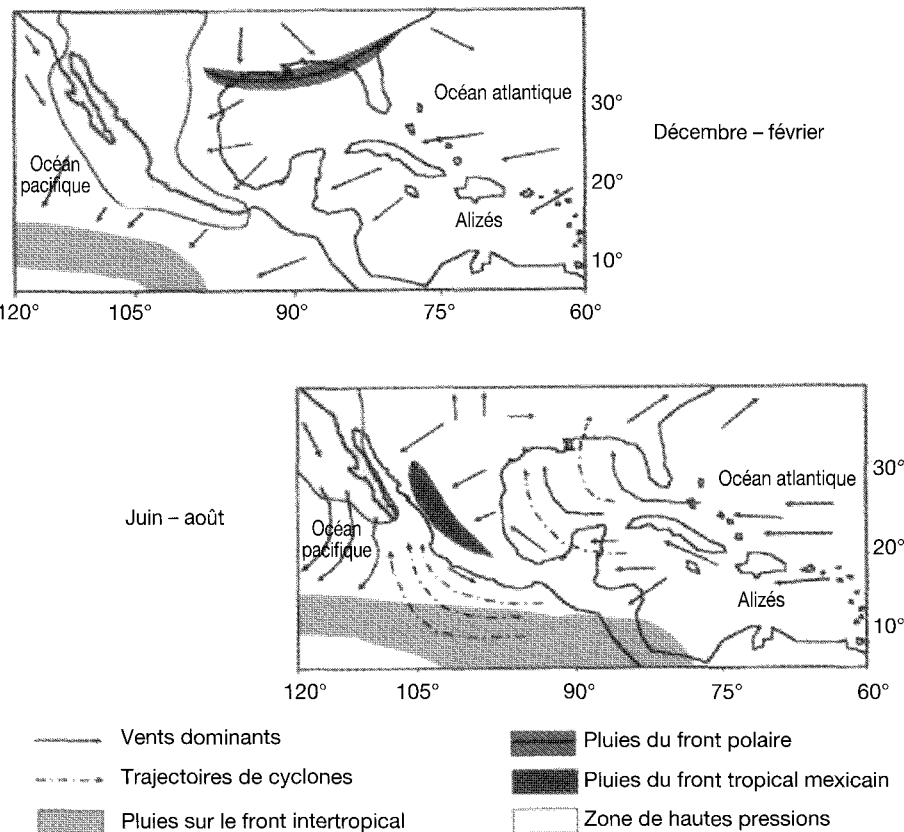


Figure 2 Circulation atmosphérique générale sur le Mexique.
General atmospheric circulation of Mexico.

Des pluies de faible intensité se produisent l'hiver lorsque le front polaire descend jusqu'au golfe du Mexique, ou lors des années « chaudes » en terme d'ENSO. Mais l'essentiel des précipitations tombe de juin à septembre (80 %

en moyenne), lors de la remontée vers le Nord de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), et aussi en début ou en fin de saison des pluies, lors de l'arrivée des cyclones du Pacifique. La ZCIT est doublée, sur la Sierra Madre, par le « Front Tropical Mexicain », lié à la rencontre des masses d'air de la mousson Pacifique et des masses d'air alimentées par les alizés de l'hémisphère Nord.

Ces derniers arrivent sur l'Altiplano nord-mexicain asséchés par la traversée de la Sierra Madre Orientale (*figure 3*). La mousson (côté Pacifique) est elle aussi freinée par l'obstacle (bien plus compact que le précédent au demeurant) de la Sierra Madre Occidentale, mais elle parvient chaque année à déverser d'assez importantes précipitations sur le côté interne de la Sierra ; il y tombe de 500 à 900 mm de pluie par an contre 800 à 1 500 sur le versant Pacifique, à latitude égale. Le relief exagère la continentalité du bassin Nazas-Aguanaval, expliquant une aridité croissante au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la Sierra Madre Occidentale.

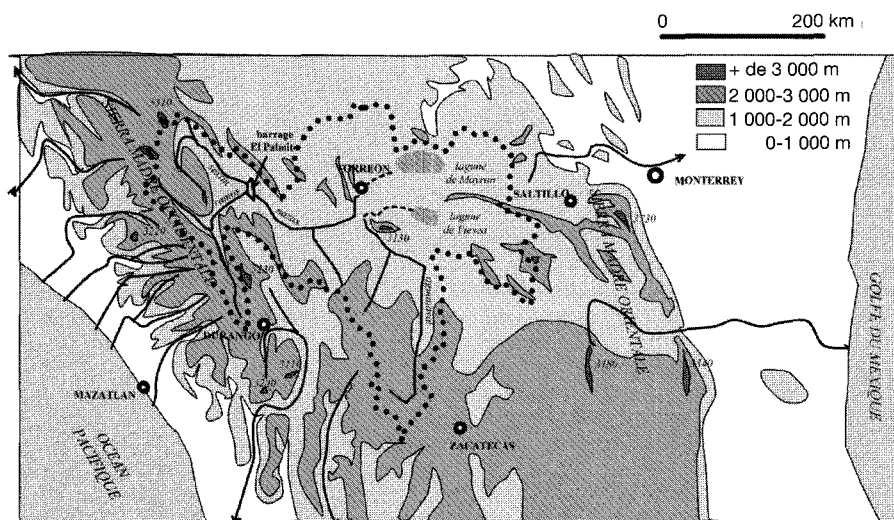


Figure 3 Orographie et hydrographie du bassin Nazas-Aguanaval et ses environs.

Topography and hydrography of the Nazas-Aguanaval basin and surrounding areas.

La variabilité temporelle (DESCROIX *et al.*, 1997) augmente inversement avec la diminution de la moyenne annuelle des précipitations (*figures 4 et 5*), ce qui est assez classique et a été observé en Afrique de l'Ouest (BRUNET MORET *et al.*, 1986) comme en Amérique du Sud ; ces deux paramètres sont corrélés ici à la continentalité du site. Les zones les plus arrosées de la Sierra Madre Occidentale sont logiquement situées sur le versant Pacifique, à mi-pente en général (quelques stations reçoivent plus de 1 500 mm/an). Dans le bassin du Nazas-Aguanaval, on passe de précipitations annuelles moyennes proches de 900 mm sur la ligne de partage des eaux occidentale (dont l'altitude est comprise entre 2 500 et 3 100 m), avec un coefficient de variation (CV) inférieur à 0,2, à moins

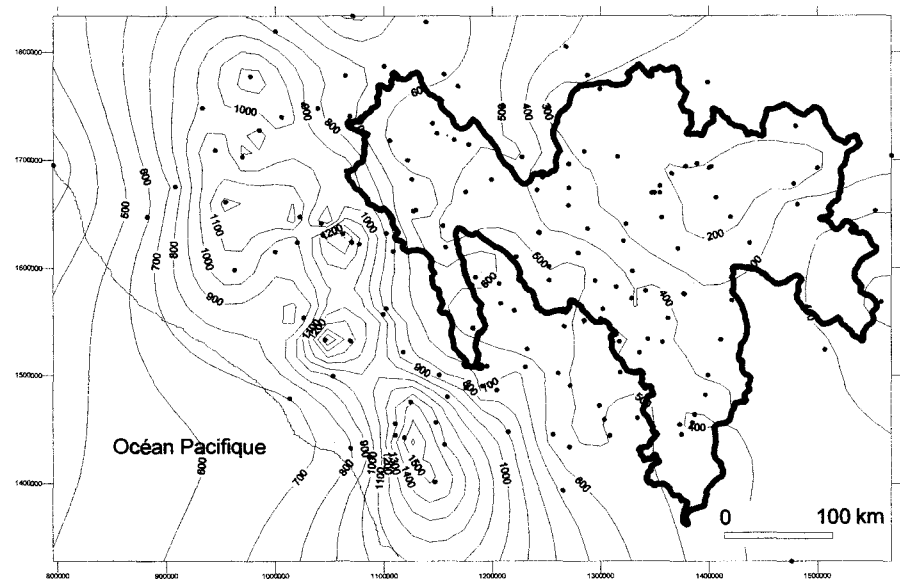


Figure 4 Isohyètes interannuelles et localisation des postes pluviométriques dans le bassin Nazas-Aguanaval et ses environs.
Interannual isohyets and location of rain gauges in the Nazas-Aguanaval basin and surrounding areas.

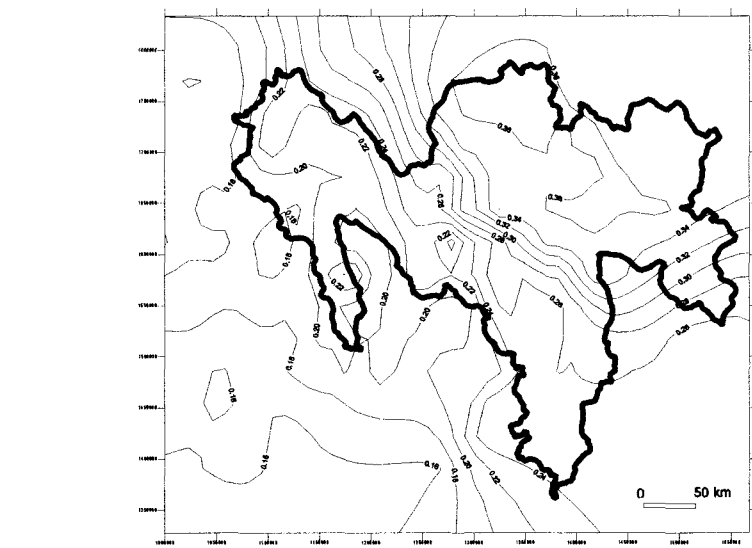


Figure 5 Coefficient de variation interannuelle des précipitations.
Coefficient of variation of annual rainfall.

de 200 mm (certains postes reçoivent à peine 150 mm/an) dans le fond de la dépression endoréique (altitude 1 100 m), pour des CV proches de 0,4.

On a montré antérieurement (NOUVELOT et DESCROIX, 1996) qu'il existait une forte homogénéité pluviométrique, tant en terme de régime que de type de précipitations : ainsi la croissance des totaux pluviométriques dans le bassin s'explique essentiellement par l'augmentation du nombre de jours de pluie, l'importance relative de chaque classe de hauteurs pluviométriques variant très peu.

Cela souligne le rôle des facteurs locaux, en particulier le relief, son orientation, les climats d'abri orographique. On remarque particulièrement (*figure 3*) que l'axe de la Sierra Madre Occidentale et des vallées affluentes du Haut Nazas est parallèle au littoral et au « Front Tropical Mexicain ». Même si les climats d'abri existent dans le fond des vallées, on comprend comment le versant interne, le moins arrosé, de la Sierra Madre, constitue pourtant un « château d'eau » pour l'altiplano, en alimentant les cours d'eau qui vont s'y perdre dans les dépressions endoréiques.

On se propose de montrer qu'une meilleure connaissance des disponibilités en eau peut s'appuyer sur la détermination de régions pluviométriquement homogènes à partir de diverses méthodes complémentaires ou convergentes.

4 – MÉTHODOLOGIE

On est parti du constat simple que la valeur de la pluviométrie annuelle moyenne d'un poste est fortement fonction de son altitude ; cela est vrai sur le versant interne de la Sierra Madre Occidentale. On obtient la relation linéaire classique, suivante :

$$P = 0,31 H - 133 \quad \text{avec } r^2 = 0,73 \quad \text{pour } 84 \text{ postes} \quad (1)$$

où P est la valeur de la normale pluviométrique (1961-1990), en mm et H l'altitude du poste, en mètres.

La bordure ouest du bassin, constituée par l'axe de la Sierra Madre, est parallèle au littoral du Pacifique. De ce fait, en s'éloignant de celui-ci, on s'éloigne du point d'arrivée des masses d'air humides en saison des pluies. Il y a donc une relation entre la pluviométrie annuelle moyenne et l'éloignement au Pacifique ; elle est de la forme :

$$P = -1,22 DP + 826 \quad \text{avec } r^2 = 0,64 \quad \text{pour } 84 \text{ postes} \quad (2)$$

où DP est la distance au Pacifique, en km (*figure 6*).

Partant de ces constats, on a cherché à expliquer la variance résiduelle de ces deux relations, du reste intimement liées, dans la mesure où la Sierra Madre est parallèle au littoral.

En se référant à la droite qui permet de définir le gradient altitudinal, on a analysé la distribution du nuage des points en tenant compte de la localisation géographique de ces derniers (*figure 7*). Cela a permis une première ébauche de régionalisation.

On a rassemblé ensuite le plus grand nombre d'informations, quantitatives ou qualitatives possibles, concernant les différentes stations, ce qui a demandé

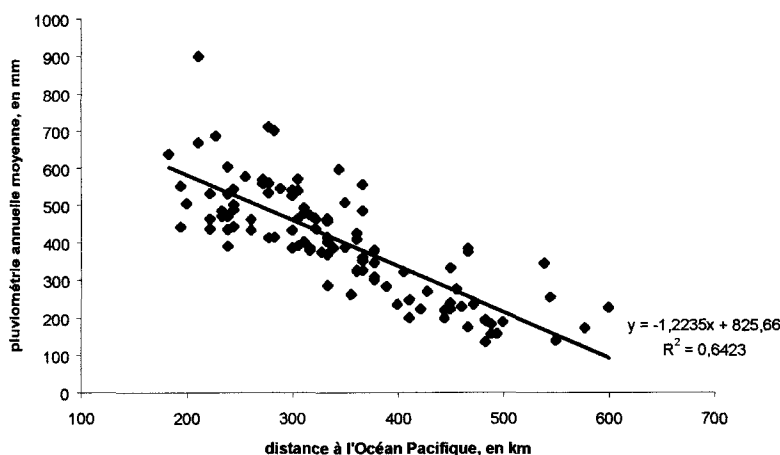


Figure 6 Relation entre la pluviométrie et la distance du poste à l'océan Pacifique (RH36).

Mean annual rainfall vs. distance from the Pacific Ocean.

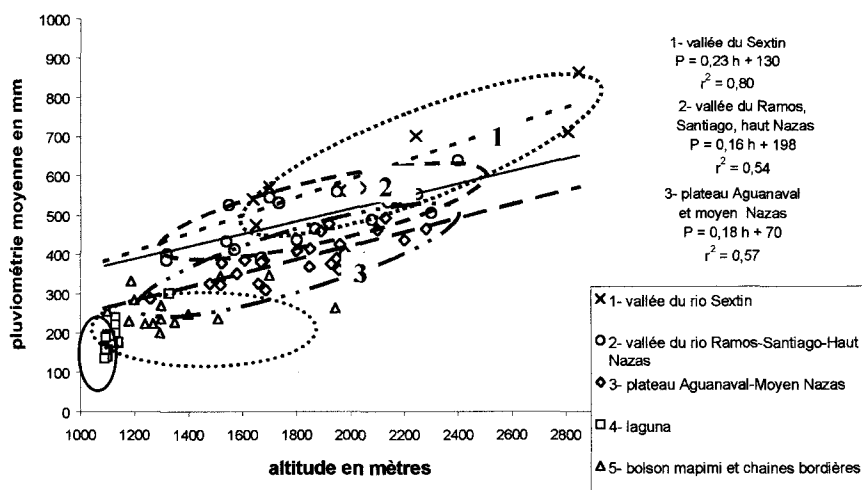


Figure 7 Les différents gradients altitudinaux des précipitations interannuelles.

Altitude vs. mean annual rainfall in different areas of the Nazas-Aguanaval basin.

un important travail de terrain et de traitement d'images satellitaires (Landsat). Puis on a procédé à des analyses statistiques à partir des matrices ainsi constituées : une Analyse en Composantes Principales (ACP), une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) pour pouvoir tenir compte de données non-quantitatives (DESCROIX *et al.*, 1997). Ces analyses ont été faites avec un jeu des 52 stations pour lesquelles toute l'information requise était disponible.

Les variables prises en compte dans l'ACP sont la hauteur pluviométrique annuelle (normale 1961-1990, PLU), l'altitude du poste (ALT), sa distance au Pacifique (MER), la longitude (LON), la latitude (LAT), et la densité de végétation autour du poste, à l'échelle de la centaine de mètres (VG1), du kilomètre (VG2), de la dizaine de kilomètres (VG3).

Les variables prises en compte dans l'AFC sont mentionnées dans le *tableau 1* qui regroupe les différentes classes constituées pour cette analyse avec, pour chacune d'entre elles, les valeurs de la variable correspondante.

Tableau 1 Les variables de l'Analyse Factorielle des Correspondances

Table 1 Variables of the Factorial Analysis of Correspondences.

Précipitations	Classe	Distance au Pacifique	Classe	Altitude	Classe
TFP	P < 300 mm	TFM	D < 250 km	TBA	A < 1 200 m
FAP	300-400 mm	FAM	250-300 km	BAA	1 200-1 600 m
MOP	400-500 mm	MOM	300-350 km	MOA	1 600-2 000 m
ELP	500-600 mm	MDM	350-400 km	HAA	A > 2 000 m
TEP	P > 600 mm	ELM	400-450 km		
		TEM	D > 450 km		
Vég. locale (30 ha)	Vég. éch. rég. 16 km ²	Vég. éch. rég. 94 km ²	Valeur NDVI	Type de site	
LTF	RTF	GTF	120-128	FON	fond de vallée
LFA	RFA	GFA	128-135	VER	versant
LMO	RMO	GMO	135-141	PLA	plaine
LEL	REL	GEL	141-146	FVE	vallée encaissée
LTE	RTE	GTE	146-154	COL	col
				PIE	piedmont
Exposition du site (XXL)	Exposition de la région (XXR)				
NNL	NNR	Nord			
NWL	NWR	Nord-Ouest			
WWL	WWR	Ouest			
EEL	EER	Est			
NEL	NER	Nord-Est			
SEL	SER	Sud-Est			
SWL	SWR	Sud-Ouest			
SSL	SSR	Sud			

L'analyse a été complétée en comparant ces résultats avec ceux obtenus à partir d'une Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir du régime mensuel des précipitations de chaque poste.

Puis on a effectué une régionalisation en s'appuyant sur le principe de pseudo-proportionnalité des hauteurs pluviométriques annuelles grâce à la Méthode du Vecteur Régional (MVR) telle que suggérée par HIEZ et COCHON-

NEAU (1992). Cette méthode et le logiciel élaboré pour l'utiliser ne constituent pas à proprement parler une méthode de régionalisation. Il faut, en effet, réaliser un prédécoupage en régions supposées homogènes, compte tenu de leur pluviométrie ou leur position par rapport au gradient altitudinal, ou par leur localisation géographique. Mais ensuite, la MVR permet de donner précisément les limites entre deux régions au comportement « pseudo-proportionnel » différent, chaque station étant acceptée ou rejetée par une région suivant ce principe.

Enfin, on a montré l'intérêt et la complémentarité de ces méthodes avec celle du variogramme pluviométrique.

5 – RÉSULTATS

L'analyse graphique du gradient pluviométrique sur le versant interne de la Sierra Madre permet de distinguer des ensembles différents malgré un régime pluviométrique sensiblement homogène. En dehors des deux secteurs très continentaux et secs ($P < 300$ mm), la « zone des Lagunes endoréiques » d'une part, le Bolsón de Mapimí et ses chaînes bordières de l'autre, on peut déterminer trois unités géographiques constituées par les différentes et principales vallées (*figure 7*) :

- la vallée du Sextín, branche nord du Nazas (*figures 1 et 3*) ;
- la vallée du Ramos-Santiago et le Haut Nazas ;
- l'Aguañaval et ses plateaux ainsi que le Moyen Nazas.

On constate que les droites de gradient altitudinal ont des pentes légèrement différentes, mais surtout que le gradient est sensiblement plus faible, quand on ne s'intéresse qu'aux zones de montagne, à celui qu'il est en englobant tout le bassin (ici les précipitations n'augmentent plus que de 20 mm par 100 m, au lieu de 31 mm). Cela est lié au fait que lorsque l'on prend en compte toutes les stations, on mélange des zones climatiquement et orographiquement différentes ; c'est précisément cela qui permet de les distinguer par rapport au gradient global.

La *figure 8* montre le plan principal des variables de l'ACP : les deux premières composantes expliquent plus de 80 % de la variance (59 % pour la première et 22 % pour la seconde). On remarque que la principale composante est définie majoritairement par la pluie qui est corrélée positivement avec l'altitude, alors que la distance à l'océan est en nette opposition avec les deux précédentes. Il est trivial de souligner que la hauteur pluviométrique est également corrélée positivement à la végétation.

La *figure 9*, qui donne le plan principal des postes pluviométriques, permet de cerner 4 régions « homogènes » au titre des composantes déterminées par les variables choisies (voir méthodologie).

Les *figures 10 et 11* permettent de visualiser les espaces des variables (*figure 10*) et des stations (*figure 11*) utilisées dans l'AFC. Ces espaces sont

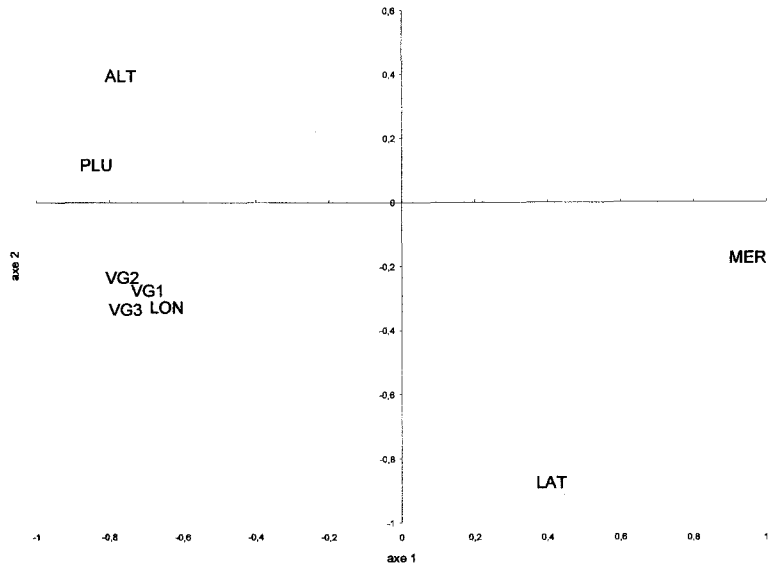


Figure 8 Plan principal des variables de l'ACP (axes 1 et 2 ; 52 stations).
Main variables of the EOF analysis (axes 1 and 2; 52 rain gauges).

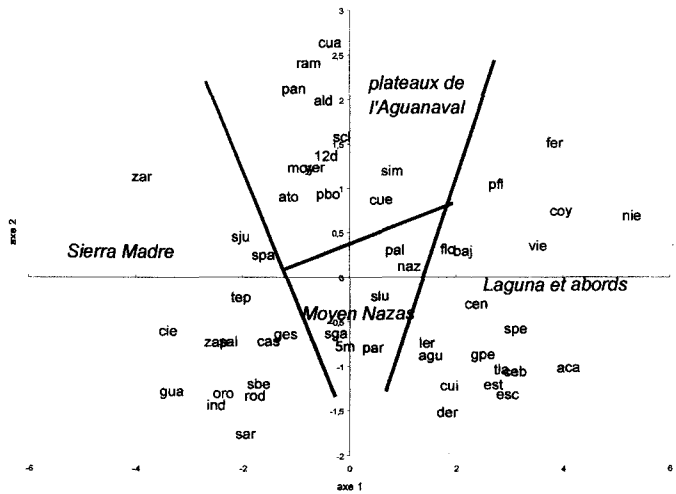


Figure 9 Plan principal des postes pluviométriques de l'ACP (axes 1 et 2 ; 52 stations).
Main rain gauges space of the EOF analysis (axes 1 and 2; 52 rain gauges).

représentés suivant les axes 1 et 2, qui représentent respectivement 29 et 12 % de la variance (les axes 3 et 4 qui « pèsent » 9 et 8 %, sont très peu discriminants et n'apportent pas d'information supplémentaire). On a séparé à dessein les deux plans, du fait du grand nombre de variables et de stations ;

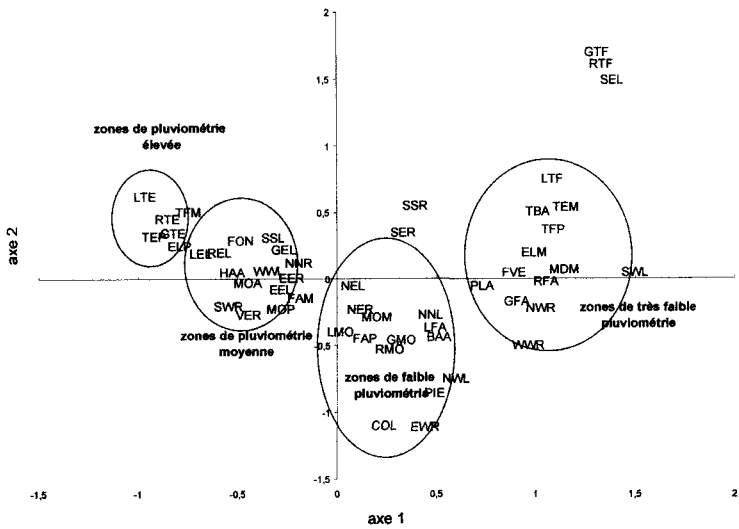


Figure 10 Plan principal des variables de l'AFC (axes 1 et 2 ; 52 stations).
Main variables for the Factorial Analysis of Correspondences (axes 1 and 2; 52 rain gauges).

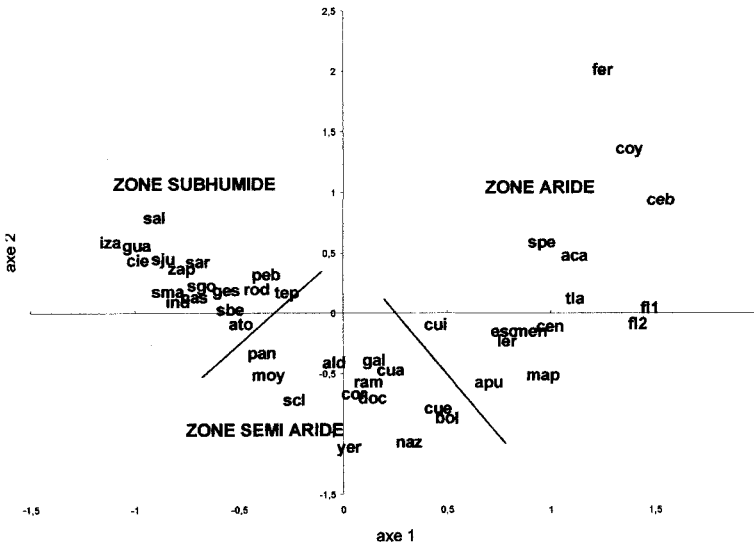


Figure 11 Plan principal des postes pluviométriques de l'AFC (axes 1 et 2 ; 52 stations).
Main rain gauges for the Factorial Analysis of Correspondences (axes 1 and 2; 52 rain gauges).

mais les deux plans sont superposables. Ces deux projections aboutissent à une régionalisation relativement simple ; les regroupements ont été faits visuellement d'après les nuages les mieux individualisés. Cela explique que la régionalisation en stations (unités statistiques) comprend trois régions, alors que

celle des variables en a quatre. En effet, sur l'espace des variables, une sous région plus humide apparaît dans la région subhumide ; or elle n'est pas individualisable sur l'espace des stations. Cette division en trois ensembles correspond, à peu de choses près, aux trois régions que sépareraient les isohyètes 300 et 500 mm. La zone semi-aride (300-500 mm) englobe exactement les régions « Moyen Nazas » et « plateaux de l'Aguanaval » déterminées par l'ACP. La zone subhumide du plan des stations (*figure 11*) englobe les zones de pluviométrie moyenne et élevée du plan principal des variables (*figure 10*).

Le régime des précipitations dans le bassin du Nazas est unimodal avec une seule saison sèche et une saison des pluies. Il s'agit d'un régime tropical pur. Cependant, la classification ascendante hiérarchique des stations, réalisée à partir de la répartition moyenne mensuelle des précipitations durant l'année, a été contrainte malgré tout pour diviser la région en deux et permet dans ces conditions-là de distinguer un groupe de stations, en localisation continentale (zone N-NE dans le *tableau 2*). La répartition des pluies dans l'année y est la même mais en moins extrême ; la saison des pluies (juin à septembre) ne reçoit que 68 % des pluies totales, alors que cette proportion est de 78 % dans le reste du bassin du Nazas. Ceci peut s'expliquer de la manière suivante : les précipitations de saison sèche (qui se produisent en général entre novembre et février) sont liées essentiellement à des perturbations d'origine polaire « descendues » sur le talweg représenté par les hautes plaines à l'est des Rocheuses. La hauteur pluviométrique enregistrée est alors à peu près la même partout ; elle représente donc une proportion plus grande du total annuel dans les zones arides que dans la zone subhumide.

Tableau 2 Distribution mensuelle des précipitations dans le bassin du Nazas (en pourcentage du total annuel).

Table 2 *Monthly distribution of rainfall in the Nazas-Aguanaval basin.*

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<i>Zone : N-NE</i>	3,9	2,2	1,1	2,6	6,0	13,5	17,2	19,7	18,1	8,0	3,3	4,4
<i>Reste Nazas</i>	3,0	1,1	0,7	1,6	3,5	12,9	22,3	24,1	18,4	6,9	2,4	3,2

La Méthode du Vecteur Régional (MVR) a permis, quant à elle, de diviser le bassin du Nazas en 4 régions dont le comportement est homogène en terme de pseudo-proportionnalité des totaux annuels sur une période de 40 ans. Cela signifie que les données pluviométriques annuelles des 162 stations considérées (dont 104 dans le bassin du Nazas, les autres aux alentours) permettent de constituer des vecteurs qui reflètent le comportement pluviométrique moyen de chacune de ces régions. On a pu ainsi différencier (*figure 12*) :

- le Haut Nazas et les plateaux de Durango (ces derniers sont à l'extérieur du bassin Nazas-Aguanaval) ;
- la Moyenne vallée du Nazas ;
- les plateaux et la vallée de l'Aguanaval ;
- la Laguna et le Bolsón de Mapimí.

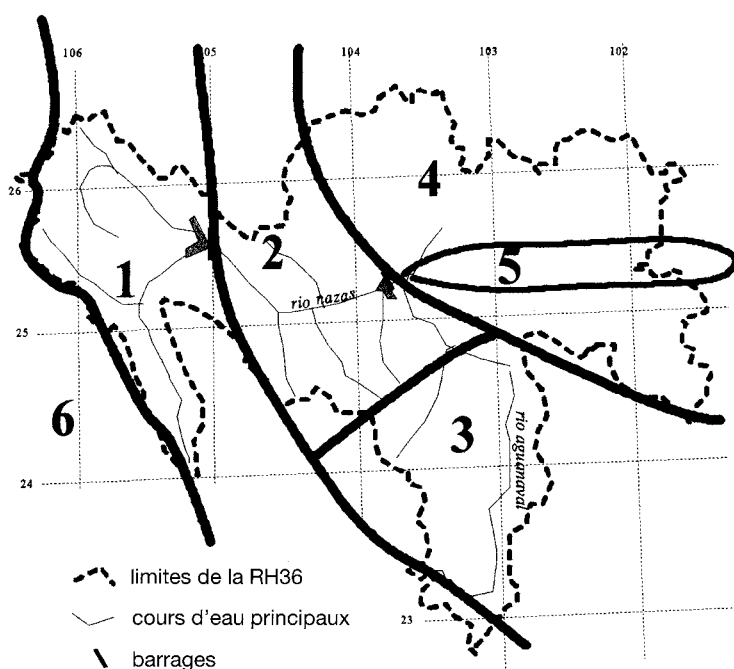


Figure 12 Régionalisation déterminée par la Méthode du Vecteur Régional.
Regionalisation determined by the Regional Vector Method.

Cette dernière région, aride, ne remplissait pas complètement les critères de pseudo-proportionnalité requis par la méthode et le logiciel MVR (HIEZ et COCHONNEAU, 1992) ; ceci est dû à la très forte variabilité spatiale des précipitations en zone aride, où les champs de pluie convectifs ne représentent que quelques dizaines de km² au maximum. La région 4 est donc une région par défaut, justement caractérisée par son absence d'homogénéité. Cependant, il a été constaté qu'une douzaine de stations de cet ensemble répondaient à ces critères et pouvaient être regroupés en une cinquième région (nommée « Sierras de Parras et Jimulco »), homogène celle-là ; leur point commun est de faire partie d'une chaîne de montagnes plissées, orientées Est-Ouest, qui semble être déterminante dans la localisation des précipitations.

Chacun des vecteurs ainsi déterminés est le reflet du comportement d'une région homogène, et intègre l'historique des précipitations sur l'ensemble de la dite région. L'information ainsi générée est d'autant plus robuste qu'elle s'appuie sur toutes les stations de la zone étudiée et que le critère d'homogénéité adopté est simple.

Il est intéressant de noter que sur le flanc occidental de la Sierra Madre, à l'extérieur du bassin du Nazas, une sixième région homogène a pu être délimitée. Elle comprend tout le versant sur plus de 400 km du Nord au Sud, avec des pluviométries annuelles moyennes comprises entre 250 et 1 750 mm. Cela signifie que malgré la grande diversité des climats observés sur le versant Pacifique, où l'on passe d'un climat aride de désert côtier des littoraux occidentaux de continents aux latitudes tropicales, bordés de courants froids, à un climat

de montagne touché par la mousson, la pseudo-proportionnalité des données existe et que les années relativement sèches le sont d'un bout à l'autre du versant, tout comme les années plus humides.

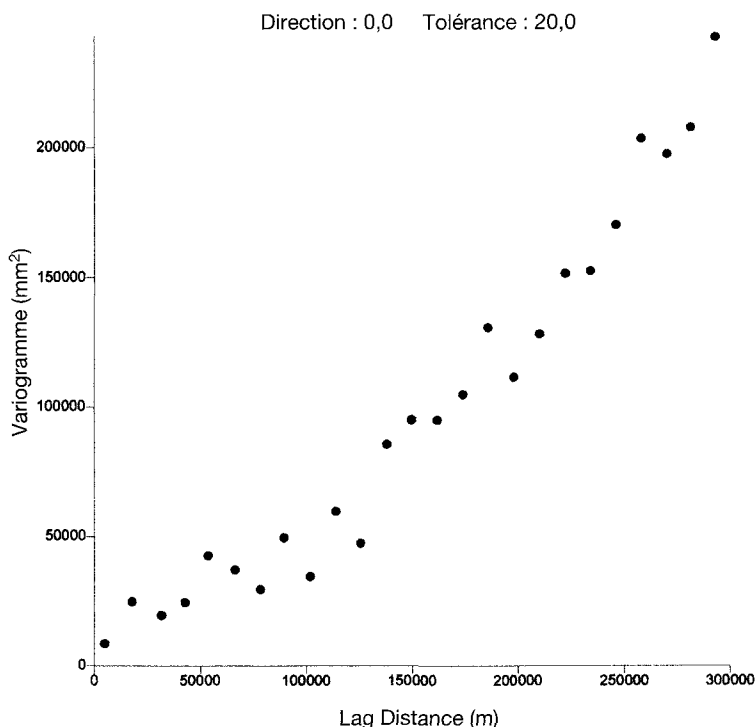


Figure 13 Variogramme multidirectionnel des précipitations interannuelles moyennes pour la RH36 et le versant Pacifique de la Sierra Madre.

Multidirectional variogram for the mean annual rainfall in the Nazas-AguanaVal basin and the Pacific side of the Western Sierra Madre.

Pour calculer le variogramme des pluies annuelles du bassin du Nazas, on s'est appuyé sur un réseau de 162 stations, afin de déborder largement du bassin. Le variogramme des précipitations annuelles ne donne aucune information sur la portée des données pluviométriques annuelles (*figure 13*), du fait de la forte hétérogénéité des postes, la région étant étendue et comportant un relief marqué. En revanche, si l'on tient compte de l'importance du relief que représente la Sierra Madre Occidentale à l'échelle sous-continentale, et que l'on exécute un variogramme directionnel orienté dans l'axe tectonique NNO-SSE que déterminent les traits du relief dans ce secteur de l'Amérique, on s'affranchit de l'effet orographique dominant (déjà démontré plus haut) et l'on s'aperçoit (*figure 14*) que la « portée », mise en évidence par un modèle sphérique, du champ pluviométrique des valeurs annuelles dans cette direction est de 180 km environ. Le « palier » est situé à 32 000 (mm^2) (soit 179 mm).

Enfin, si l'on s'affranchit de la dérive due au gradient altitudinal, en calculant une valeur pluviométrique « ramenée » à une altitude égale pour toutes les sta-

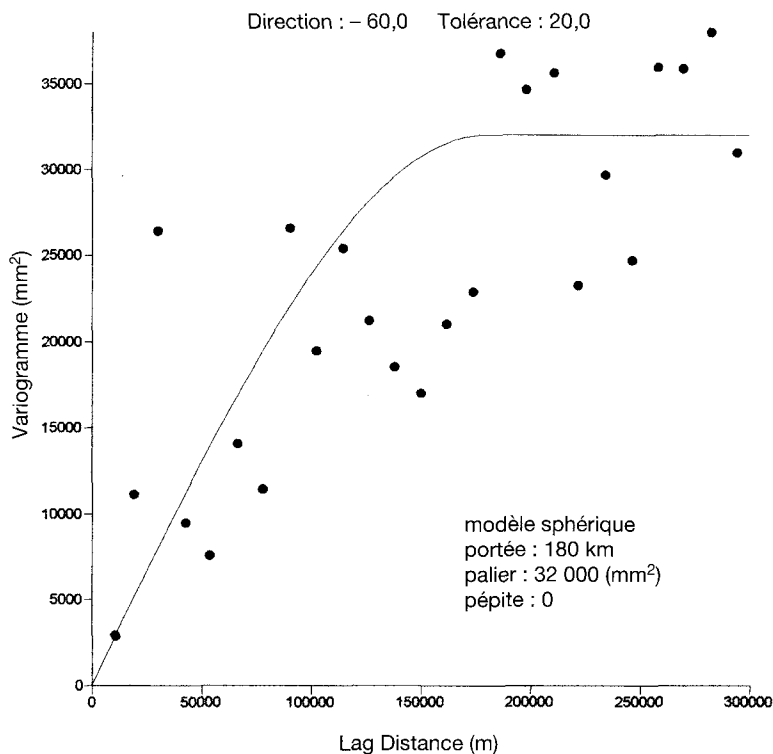


Figure 14 Variogramme directionnel orienté NNO-SSE des précipitations inter-annuelles moyennes pour la RH36 et le versant Pacifique de la Sierra Madre.

Variogram, directed according to a NNW-SSE axis, from the mean annual rainfall in the Nazas-Aguanaval basin and the Pacific side of the Western Sierra Madre.

tions, on obtient un troisième variogramme dit structural (*figure 15*). On constate alors que, comme dans le premier cas, aucun palier n'est perceptible du fait que l'on a gommé le rôle du relief ; c'est donc bien celui-ci qui permet d'introduire une portée aux données pluviométriques. Il faut noter toutefois que ce dernier variogramme n'est pas comparable aux précédents ; en effet, il a été obtenu à partir des données de 104 stations englobant le bassin Nazas-Aguanaval et ses alentours, mais pas le versant Pacifique de la Sierra Madre. De fait, si l'on prend en compte les deux versants de cette chaîne de montagnes, ni le gradient altitudinal ni le gradient dû à l'éloignement de l'océan ne sont univoques. Dans ce cas, on ne peut calculer de dérive due à l'un et à l'autre, ni *a fortiori* à leur combinaison.

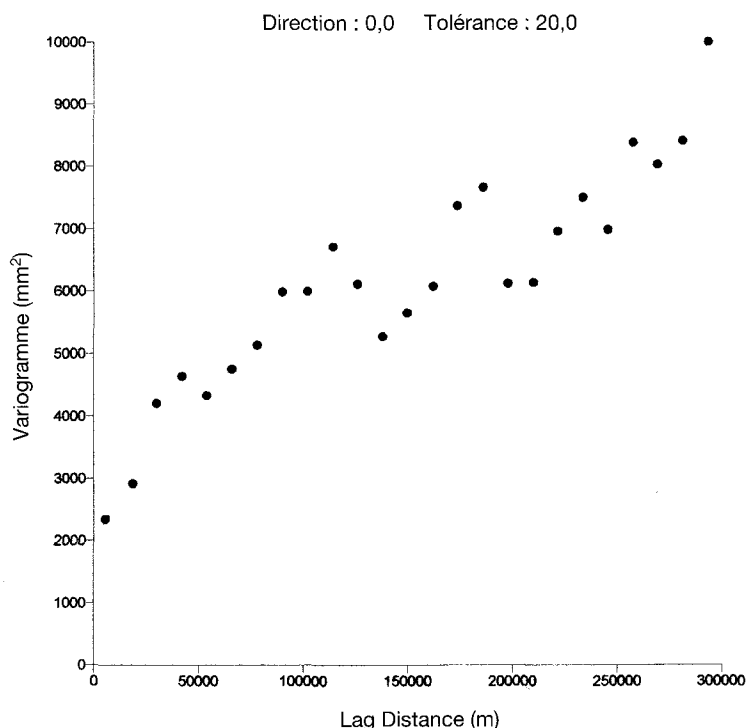


Figure 15 Variogramme multidirectionnel des précipitations interannuelles moyennes ramenées à une altitude de 1 000 m, pour la RH36 seulement.

Multidirectional variogram of the mean annual rainfall calculated for a uniform altitude of 1000 m, for the Nazas-Aguanaval basin.

6 – DISCUSSION

Le rôle du relief apparaît dans la disposition des régions pluviométriques, dans toutes les démarches utilisées : les limites principales sont de direction NNO-SSE ou NO-SE comme les grands ensembles tectoniques de cette région de l'Amérique du Nord (littoral, Sierra Madre, principaux grabens) ; la zone semi-aride (Moyen Nazas, Aguanaval) est constituée de zones parfois élevées mais bien moins escarpées (plateaux, hautes vallées) que celles rencontrées dans la région occidentale subhumide ; l'ensemble de la zone aride recouvre une dépression endoréique à peu près plane, entourée de reliefs vigoureux et assez hauts, qui la séparent nettement de la zone précédente. Enfin, la méthode MVR, pour laquelle ont été intégrés les postes du versant Pacifique de la Sierra, fait passer la limite entre les deux régions pluviométriques (n° 1 et 6, *figure 12*) exactement sur la ligne de partage des eaux, alors que le maximum pluviométrique se situe à mi-chemin et à mi-pente entre le littoral et la crête de la Sierra Madre.

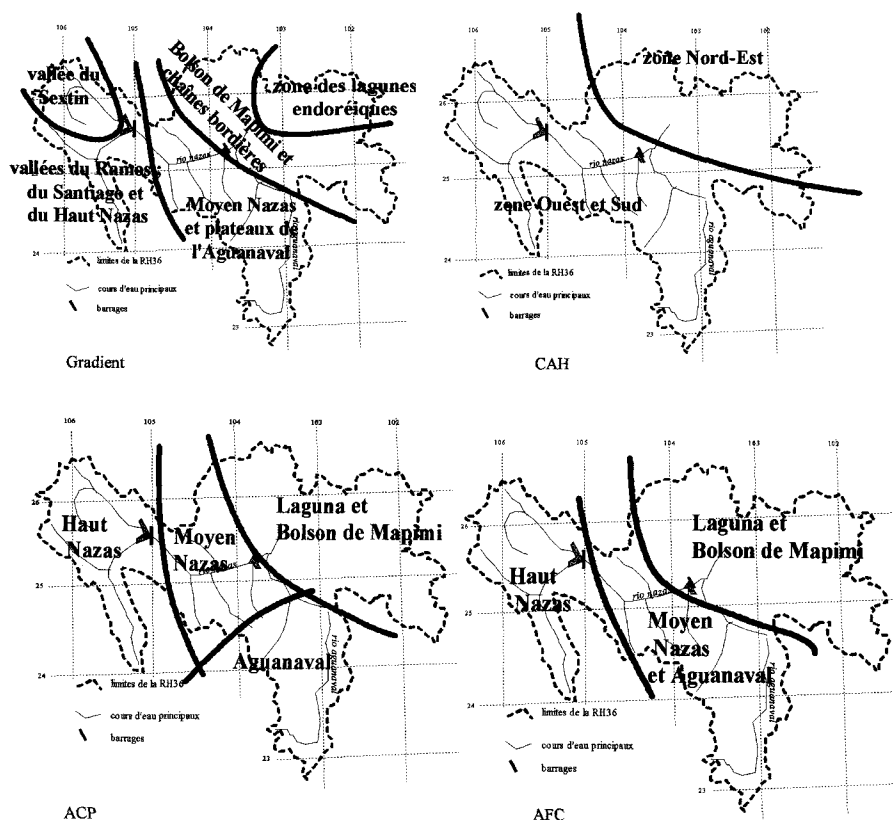


Figure 16 Cartes représentant les diverses régionalisations proposées : Gradient pluviométrique, Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) basée sur les régimes ; Analyse en Composantes Principales (ACP, données numériques) et Analyse Factorielle des Correspondances (AFC, variables non numériques).

Representation of different proposed regionalisations: elevation gradient; Hierarchical Ascending Classification based on rainfall regimes; Empirical Orthogonal Function analysis ; Factorial Analysis of Correspondences.

La figure 16 permet de comparer les géographies des précipitations annuelles moyennes telles que définies par les différentes méthodes utilisées. On remarque une constante dans l'individualisation du secteur Nord-Est comprenant la Laguna et le Bolsón de Mapimí, ainsi que leurs chaînes bordières. La méthode MVR aussi singularise les postes de cette région. C'est le secteur où la méthode atteint ses limites et peut difficilement être appliquée, faute de proportionnalité entre les données de postes proches.

Par ailleurs, l'autre limite importante est celle qui sépare le Haut Nazas (vallées du Sextín et du Ramos) d'une part, la vallée de l'Aguanaval et le Moyen Nazas de l'autre. À part la classification ascendante hiérarchique basée sur les régimes, dont on a vu qu'ils étaient peu discriminants dans le contexte étudié,

toutes les autres méthodes la font ressortir. Il est intéressant de noter que les deux limites ainsi déterminées correspondent sensiblement aux isohyètes 300 et 500 mm qui sont souvent utilisées comme limites supérieures des zones de climat aride et semi-aride, respectivement.

Le cloisonnement en deux parties de la zone de climat semi-aride (zones 2 et 3 de la MVR, et respectivement Moyen Nazas et Aguanaval de l'ACP) se fait à peu près sur la ligne de partage des eaux entre les deux bassins du Nazas et de l'Aguanaval. Cependant, on a utilisé la latitude et la longitude comme variables dans l'ACP, ce qui de fait peut expliquer la distinction des deux groupes sans faire intervenir le relief. Il semble donc préférable de se référer aux différences de comportement interannuel, analysé par la MVR, pour expliquer l'individualisation de ces deux régions, qui n'apparaît pas dans les autres procédés.

Enfin, l'analyse graphique de la répartition des postes en fonction de leur gradient permet de distinguer, dans la zone amont (Haut Nazas dans la Sierra Madre Occidentale) et dans la zone aval (sud du désert de Chihuahua), deux zones « extrêmes ». Dans le premier cas, la vallée du Sextín se détache du fait de précipitations annuelles et d'un gradient altitudinal supérieurs à ceux des autres stations du haut bassin. Dans le deuxième cas, les postes situés au centre des dépressions endoréiques sont les moins arrosés et ne profitent pas des quelques précipitations « orographiques » que reçoivent les chaînes bordières de la Laguna (qui atteignent localement des altitudes de 2 500 à 3 000 m). La *figure 17* représente une carte d'isohyètes libérées de la « dérive » due au gradient altitudinal ; on a utilisé l'équation (1) pour simuler une région plate située à 1 000 mètres d'altitude. On constate que la vallée du Santiago et la vallée du Sextín, ainsi que le sud du bassin du Moyen Nazas, ont une pluviosité excédentaire par rapport à la moyenne (300 mm). En revanche, la zone immédiatement en abri, à l'est de la Sierra Madre, est très déficitaire (jusqu'à 160 mm de déficit annuel moyen), de même que l'ensemble de la zone aride et semi-aride. Il faut ici faire intervenir la rugosité d'ensemble du relief : les crêtes et les vallées assez profondes de la Sierra Madre sont relayées, à l'est, par un immense glacis descendant en pente douce vers le centre de l'Altiplano. Même s'il comporte quelques chaînons calcaires de direction NNO-SSE (*figure 3*), ce glacis et les plateaux de l'Aguanaval sont beaucoup plus « lisses » que la Sierra elle-même, expliquant leur pluviosité relativement faible.

Par ailleurs, étant donné que la répartition relative des événements par classe de hauteur précipitée varie peu, c'est la variation du nombre de jours de pluie qui explique les différences régionales de pluviosité. L'arrivée des masses d'air humides est due essentiellement au flux de mousson (de Sud-Ouest) ; c'est l'affaiblissement de ce flux, à mesure qu'il s'éloigne de l'océan, qui explique qu'il y ait moins d'épisodes pluvieux au cœur de l'Altiplano que dans la haute vallée du Nazas. En outre, la relative vigueur du massif montagneux (qui domine de 1 500 à 2 000 mètres le Bolsón de Mapimí et la zone des Lagunas) explique l'existence de secteurs très excédentaires sur les plus hauts massifs et la faiblesse de la pluviosité dans le piedmont de la Sierra, situé en position d'abri par rapport aux flux de Sud-Ouest. Les facteurs régionaux et locaux se combinent donc pour expliquer la régionalisation des pluies.

Le rôle déterminant du relief est une constante dans la répartition de la pluviosité (ESCOURROU, 1980). Il a été mis en évidence également par HOLAWÉ et

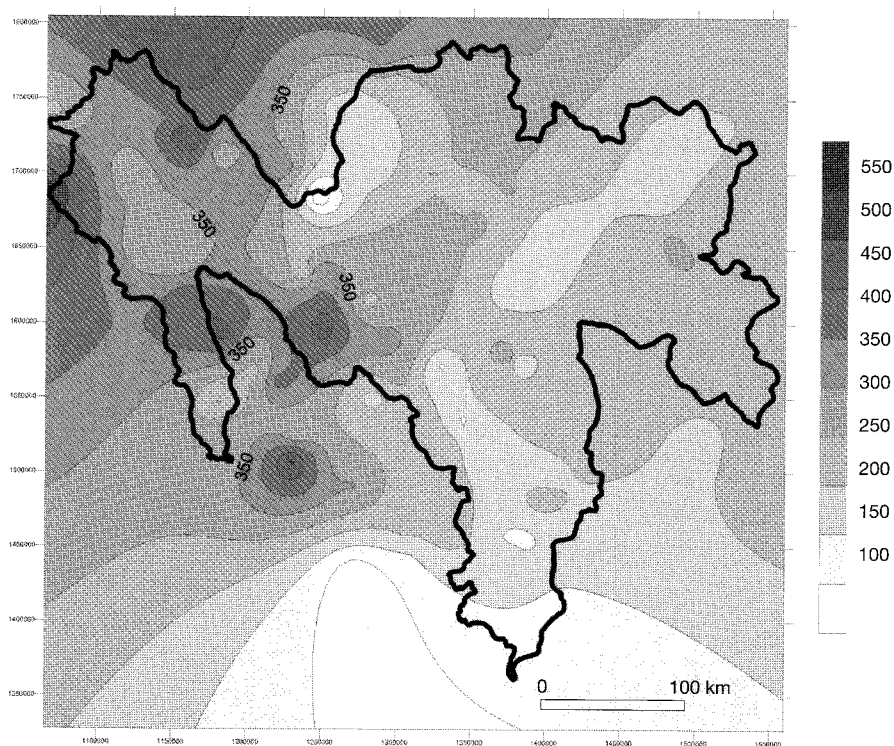


Figure 17 Pluviométrie sans la dérive due au gradient altitudinal ; le relief simulé est un plateau situé à une altitude de 1 000 m.

Mean annual rainfall detrended for the elevation gradient; simulated topography is at a plateau with an altitude of 1000 m.

DUTTER qui concluent que la bordure des Alpes est une ligne très distincte, et que ce massif est le principal facteur de ségrégation en Autriche. Dans le cas du bassin du Nazas et de ses environs, le variogramme général, non orienté, des hauteurs pluviométriques annuelles, présente une croissance continue, sans palier, la variabilité due à l'orographie (gradient altitudinal) se superposant aux fluctuations naturelles des phénomènes pluviométriques. En revanche, dès qu'on l'oriente dans l'axe du relief pour s'affranchir de l'effet de ce dernier, il permet de déterminer une « portée » de la donnée.

7 – CONCLUSION

Le bassin endoréique du Nazas-Aguanaval, au nord du Mexique, se caractérise par un climat très contrasté. La situation de pénurie d'eau, qui est une constante dans la grande région aride nord-mexicaine, conduit à surexploiter les aquifères. Une bonne connaissance des ressources hydriques renouve-

lables est importante afin de suggérer des scénarios de gestion de l'eau à l'échelle régionale, celle des grands bassins.

Les outils simples utilisés, permettent à la fois la détermination de régions pluviométriques homogènes, aux caractéristiques connues, et une meilleure évaluation de la ressource grâce, entre autres, aux possibilités d'interpolation et de reconstitution des valeurs manquantes avec un risque raisonnable. Aucune des méthodes proposées n'est exclusive, chacune représente une source d'informations souvent complémentaires car elle permet de déterminer différentes caractéristiques basées sur la pseudo-proportionnalité des données interannuelles (MVR), sur les régimes (la classification ascendante hiérarchique), sur le rôle du relief (gradient altitudinal) et des autres éléments de site pouvant influencer sur le total pluviométrique (ACP et AFC) : exposition, localisation, type de relief, altitude, distance à l'océan, etc.

Le handicap lié à la faible densité du réseau de mesure (en particulier dans les zones arides et les zones montagneuses les plus pluvieuses) est de ce fait, dans une certaine mesure, atténué par la possibilité d'évaluer, avec une certaine précision, les principales caractéristiques des différentes zones pluviométriques ainsi définies.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARCELO A., COUDRAY J., 1996. Nouvelle carte de isohyètes annuelles et de maxima pluviométriques sur le massif su Piton de la Fournaise (île de la Réunion). *Rev. Sci. Eau*, 4, 457-484.
- BENICHO P, LE BRETON O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7^e série, 19, 23-34.
- BLANCHARD R., 1945. Les Alpes Occidentales. Thèse de géographie, Université de Grenoble, 1320 pp.
- BOVIN Ph., 1995. Les sécheresses au Mexique. In : *Sécheresse*, 6 (1), 53-58.
- BRUNET MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M., 1986. Monographie Hydrologique du fleuve Niger, tome I, Niger Supérieur, Orstom, 389 p.
- COMISION NACIONAL DEL AGUA, 1975. Atlas del Agua, Mexico.
- CREUTIN D., OBLED C., 1982. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resources Research*, 18 (2) : 413-431.
- DELHOUME J.P., 1995. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (réserve de la Biosphère de Mapimí, Nord-Mexique). Thèse, Université de Poitiers, 300 pp.
- DESCROIX L., NOUVELOT J., ESTRADA J., 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del Norte de México : regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. *Foll. Cient. n° 8*, Orstom/Cenid-Raspa, Gomez Palacio.
- ELGUERO E., LE BARBE L., TAPSOBA D., 1994. Une approche probabiliste du Vecteur Régional. VIII^e journées hydrologiques Orstom, Montpellier.
- ESCOURROU G., 1980. Climat et environnement : les facteurs locaux du climat. *Manuel de Géographie*, Masson, Paris, 230 pp.
- GARCIA N.O., VARGAS W.M., 1996. The spatial variability of runoff and precipitation in the Rio de la Plata basin. *Hydr. Sc. Journal*, 41 (3), 279-298.
- HAYWARD D., CLARKE R.T., 1996. Relationship between rainfall, altitude and distance from the sea in the Freeetown

- Peninsula, Sierra Leone. *Hydr. Sc. Journal*, 41 (3), 377-384.
- HIEZ, COCHONNEAU, 1992. MVR 1.5 : la méthode du Vecteur Régional. *Logiciel de régionalisation pluviométrique*, ORSTOM-laboratoire d'Hydrologie, Montpellier.
- HOLAWÉ F., DUTTER R., 1999. Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space. *J. of Hydrol.*, 219, 70-82.
- HUMBERT J., PERRIN J.L., 1993. Précipitations et relief : le cas du versant oriental des Hautes Vosges. In : L'Eau, la Terre et les Hommes, ouvrage en hommage à Frécaut R., Presses Universitaires de Nancy, 147-154.
- HUMBERT J., DROGUE G., MAHR N., 1998. Cartographie des précipitations par paramétrisation omnidirectionnelle du relief : la méthode Pluvia. In : Actes du 11^e Colloque International de Climatologie (AIC), Lille, 11, 259-266.
- KIEFFER WEISSE A., 1998. Étude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes Françaises), Méthodes de cartographie des précipitations extrêmes. *Thèse INPG*, Grenoble.
- LAMAGAT J.P., ALBERGEL J., BOUCHEZ J.M., DESCROIX L., 1987. Monographie hydrologique du fleuve Gambie. Orstom-OMVG, 243 p.
- LASSERRE G., 1960. La Guadeloupe. Thèse de géographie, Université de Bordeaux, 1 200 p.
- LE BARBE L., LEBEL T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *J. of Hydrol.*, 188-189, 43-73.
- LEBEL T., AMANI A., TAUPIN J.D., 1994. La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation. X^{es} journées hydrologiques Orstom.
- LEBEL T., LABORDE J.P., 1988. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 2, 245-261.
- MAHR N., HUMBERT J., 1999. Cartographie automatique des précipitations par la méthode Pluvia. Poster et présentation, Festival International de Géographie, Saint-Dié.
- MONIOD F., POUYAUD B., SECHET P., 1977. Le bassin du fleuve Volta. Monographie hydrologique Orstom, 511 p.
- NOUVELOT J.F., DESCROIX L., 1996. Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. *TRACE, revue du Centre français d'études mexicaines et centroaméricaines*, 30, 9-24.
- ORANGE D., 1990. Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Thèse de doctorat*, ULP, Strasbourg, 220 p.
- ROSSEL F., 1997. Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Équateur. *Th. Doct. Univ.*, Montpellier II, 122, 280.
- ROSSEL F., GARBRECHT J., 2000. Analyse et amélioration d'un indice pluviométrique mensuel régional pour les grandes plaines du sud des États-Unis. *Rev. Sci. Eau*, 13/1, 39-46.
- WOTLING G., BOUVIER C., DANLOUX J., FRITSCH J.-M., 2000. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment. *J. of Hydrol.*, 233, 86-101.