



PROYECTO VALLE DE CHALCO

UAM-X

ORSTOM

(Financiado por la Comunidad Económica Europea)

RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN DE CHALCO

Etude hydrologique du bassin de Chalco

C. BOUVIER, E. DIDON



Casa Abierta al Tiempo

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA-XOCHIMILCO



INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE POUR LE
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

MARS 1991

Etude financée par la Communauté Economique Européenne

RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN DE CHALCO

Etude hydrologique du bassin de Chalco

C. BOUVIER, E. DIDON

*** Université Autonome de Mexico
Unité Xochimilco
Calzada del Hueso
1100, Colonia Villaquietud
04960 Mexico D.F.**

*** ORSTOM
Calle Homero, 1804-1002
Colonia Los Morales
11510 Mexico D.F.**

MARS 1991

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes qui ont facilité la réalisation de cette étude :

Ingenieros Elias Sahab Haddad, Alonso Lorenzo Hernandez, Xavier Haro Solórzano, Daniel Arcos Hernandez, Jesus Landeros Ortiz, de la Gerancia de Aguas del valle de México de la Comisión Nacional del Agua, qui ont mis à notre disposition les données climatologiques du bassin de Chalco,

Ingenieros Antonio Acosta Godínez, Carlos Ruiz et De Vesa, de la Gerancia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Rios de la Comisión Nacional del Agua, qui nous ont remis les fichiers informatisés des données hydrométriques du bassin de Chalco,

Ingenieros Daniel Delaunay et Michel Lepage, de l'ORSTOM, qui ont pris en charge les travaux de digitalisation et n'ont pas ménagé leurs efforts pour nous communiquer leur expérience du système d'informations géographiques Savane.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
PREMIERE PARTIE : GEOGRAPHIE DU BASSIN DE CHALCO	6
I.1 Morphométrie et topographie	6
I.2 Hydrographie	8
I.3 Pédologie	10
I.4 Occupation du sol	14
DEUXIEME PARTIE : CLIMATOLOGIE DU BASSIN DE CHALCO	16
II.1 LES PRECIPITATIONS	19
II.1.1 Les données pluviométriques	19
II.1.2 Variabilité spatiale des précipitations	19
II.1.2 Analyse chronologique des variations pluviométriques annuelles	23
II.1.3 Distributions des pluies annuelles	25
II.1.4 Répartition mensuelle des pluies	28
II.1.5 Distributions des pluies journalières maximales	30
II.2 CLIMATOLOGIE	32
II.2.1 Températures	32
II.2.2 Ensoleillement	32
II.2.3 Evaporation et évapotranspiration	34
II.2.4 Humidité relative	34
II.2.5 Vents	34
II.3 CONCLUSIONS	36
TROISIEME PARTIE : HYDROLOGIE DES SOUS-BASSINS	38
III.1 HYDROLOGIE DES SOUS-BASSINS	40
III.1.1 Les données hydrométriques	40
III.1.2 Bilan hydrologique	41

III.1.3 Analyse chronologique des écoulements annuels	42
III.1.4 Analyse des crues	44
III.1.5 Distributions statistiques des valeurs de débits	47
III.1.6 Répartition mensuelle des écoulements	49
III.1.7 Conclusions	51
III.2 GEOGRAPHIE DES SOUS-BASSINS	52
III.2.1 Topographie et drainage	52
III.2.2 Pédologie et occupation des sols	54
CONCLUSION GENERALE	57
BIBLIOGRAPHIE	60

Annexe : Recueil de données hydro-climatologiques sur le bassin de Chalco

INTRODUCTION

La zone de Chalco, située à la périphérie sud-est de l'agglomération de Mexico (fig. 1), connaît depuis une dizaine d'années une forte expansion démographique et urbaine. Ce développement rapide est à l'origine de la mise en place du programme d'étude "Valle de Chalco", destiné à caractériser cette croissance, et en prévoir les conséquences tant sur les plans économiques et sociaux que sur le plan de l'environnement.

Au sein de ce programme, nos recherches ont porté sur le thème de l'étude et la gestion de la ressource en eau, qui constitue l'un des enjeux importants actuels, non seulement pour le bassin de Chalco lui-même, mais encore pour l'agglomération de Mexico toute proche. L'étude de ce thème comporte classiquement les étapes suivantes :

1. Inventaire des ressources en eau : étape préliminaire au cours de laquelle il s'agit notamment de rassembler, gérer et traiter les données existantes pour décrire le cycle de l'eau dans le bassin de Chalco : climatologie, hydrologie et hydrogéologie, ainsi que l'ensemble des facteurs géographiques intervenant dans ce cycle (pédologie, géologie, topographie, occupation des sols, hydrographie,...).

2. Gestion de la ressource en eau : où l'on s'interrogera sur les besoins en eau existant dans le bassin de Chalco (agriculture, industrie, urbanisation) ; sur les risques quantitatifs représentés par l'insuffisance, ou l'excès, de la ressource (baisse du niveau des nappes, inondations en zone urbaine) ; sur les risques qualitatifs (pollutions bactériologiques ou chimiques, superficielles ou souterraines).

3. Modélisation des écoulements : étape à mener éventuellement en parallèle à la précédente, où l'on cherchera, à partir des données recueillies précédemment, à comprendre les mécanismes d'écoulement sur le bassin de Chalco, pour les extrapoler hors du champ des données et des phénomènes observés : par exemple, comment s'opère la transformation des pluies en écoulements, quels sont les facteurs géographiques qui conditionnent cette transformation,..

4. Proposition et expérimentation d'ouvrages : où, compte tenu des problèmes identifiés et des connaissances acquises sur les mécanismes d'écoulement, on pourra proposer et dimensionner différents aménagement et/ou proposer et appliquer différentes recommandations visant à un meilleur usage de l'eau ou de l'environnement.

Dans ce document, nous présenterons les résultats obtenus concernant l'étape n°1 - inventaire des ressources en eau. Nous détaillerons particulièrement le contexte géographique du bassin de Chalco, la description des régimes de précipitations , et l'étude des régimes hydrologiques de 4 sous-bassins

déterminés par les stations hydrométriques installées par la Comisión Nacional del Agua. Compte tenu des modifications actuelles dues à l'urbanisation, nous analyserons également l'éventuelle évolution dans le temps des caractéristiques climatiques et hydrologiques du bassin de Chalco.

Par ailleurs, et pour compléter l'inventaire de la ressource en eau dans le bassin de Chalco, le lecteur trouvera d'autres informations dans deux rapports publiés dans le cadre du programme "Valle de Chalco" :

- * "Hydrogéologie du bassin de Chalco", par R. Huizar et H. Niedzielski (novembre 1990),
- * "Diagnostico ambiental de la cuenca de Chalco", par J.M. Chavez et al. (novembre 1990).

Figure 1 : Situation du bassin de Chalco

PREMIERE PARTIE

GEOGRAPHIE DU BASSIN DE CHALCO

I.1 Morphométrie et topographie

Le bassin de Chalco (fig. 2) couvre une superficie de 1185 km². Anciennement, la partie inférieure de ce bassin était constituée d'un lac, d'une superficie d'environ 100 km² et d'une profondeur moyenne d'environ 2 m. Le bourg ancien de Chalco était alors un port en bordure du lac, et l'on peut encore voir le bâtiment de l'embarcadère, situé à une altitude légèrement supérieure à 2240 m. L'exutoire du bassin était situé en bordure ouest - à proximité de Tlahuac -, où le trop plein du lac de Chalco se déversait dans le lac voisin de Xochimilco. Depuis le début du 20^e siècle, le lac de Chalco a été progressivement asséché, par le biais de canaux sur lesquels nous reviendrons au paragraphe I.2.

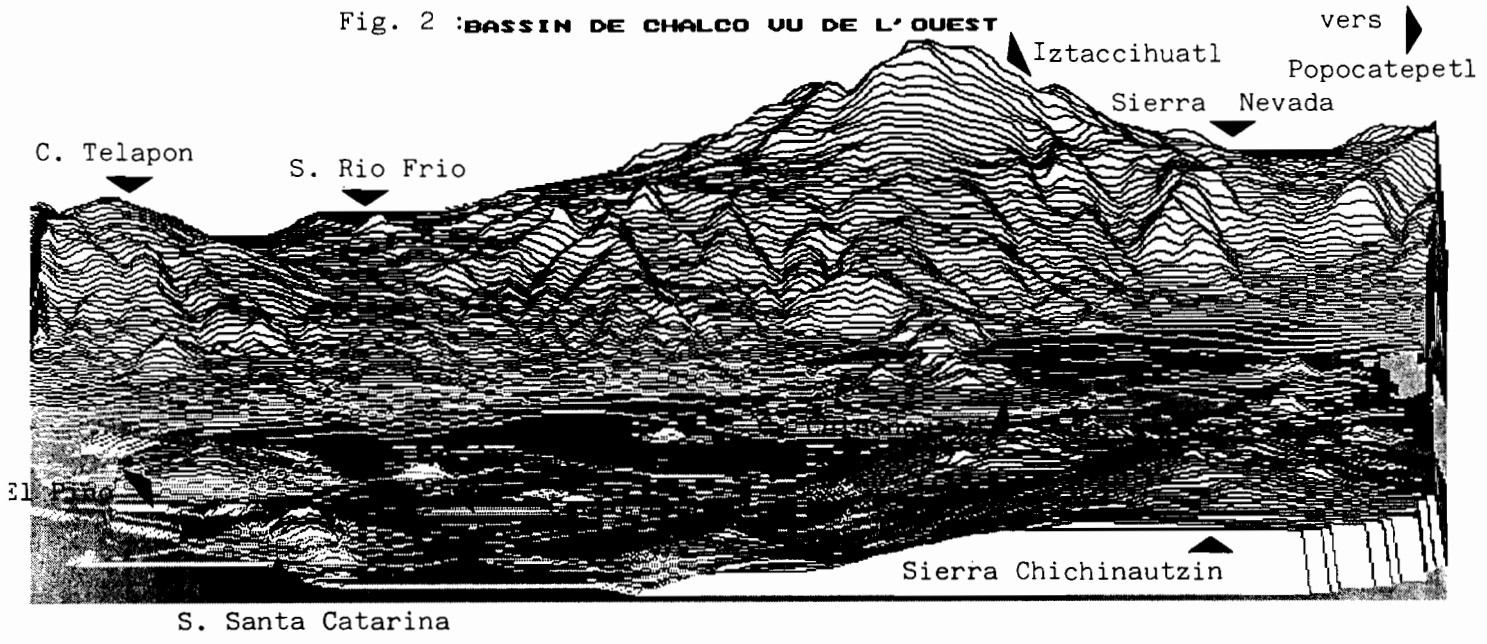
En amont de la zone de plaine, maintenant en partie urbanisée, on rencontre une zone intermédiaire de piémont - vallées avec des pentes douces -, puis de montagnes d'origine volcanique qui entourent le bassin et culminent à plus de 5000 m - volcans Popocatepl et Iztaccihuatl.

Le bassin est donc extrêmement contrasté, tant du point de vue du relief que des différents paysages que celui-ci génère, sans oublier le contraste entre monde rural et monde urbain.

En prenant comme sources les cartes topographiques de l'INEGI au 1/50.000^e, nous avons procédé à la digitalisation des courbes de niveau 2260, 2280, puis de 100 en 100 à partir de 2300 mètres. La figure 3 indique la répartition des altitudes sur le bassin, soit :

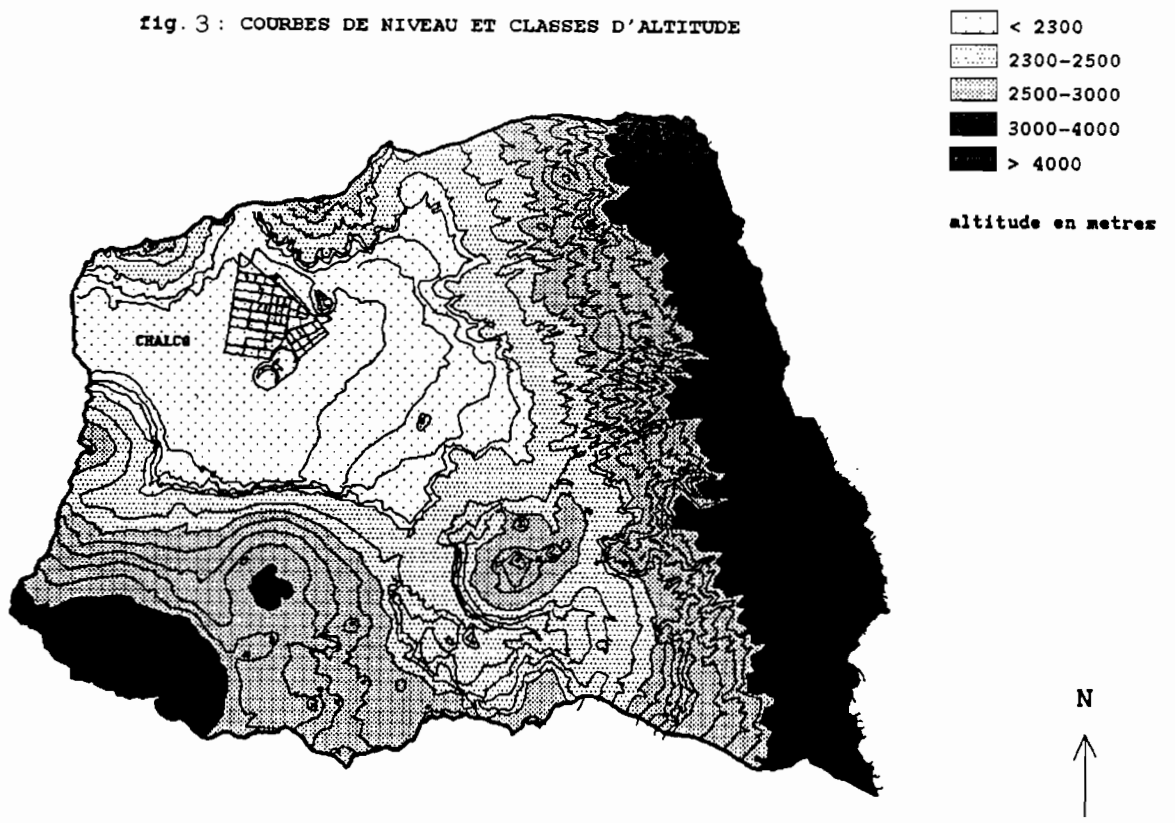
24 % de la superficie totale du bassin située à une altitude inférieure à :	2300 m,
23 %	compris entre : 2300 à 2500 m
31 %	compris entre : 2500 à 3000 m
21 %	compris entre : 3000 à 4000 m
1 %	supérieure à : 4000 m

Fig. 2 : BASSIN DE CHALCO UU DE L' OUEST



S. Santa Catarina

fig. 3 : COURBES DE NIVEAU ET CLASSES D'ALTITUDE



échelle 1/375 000

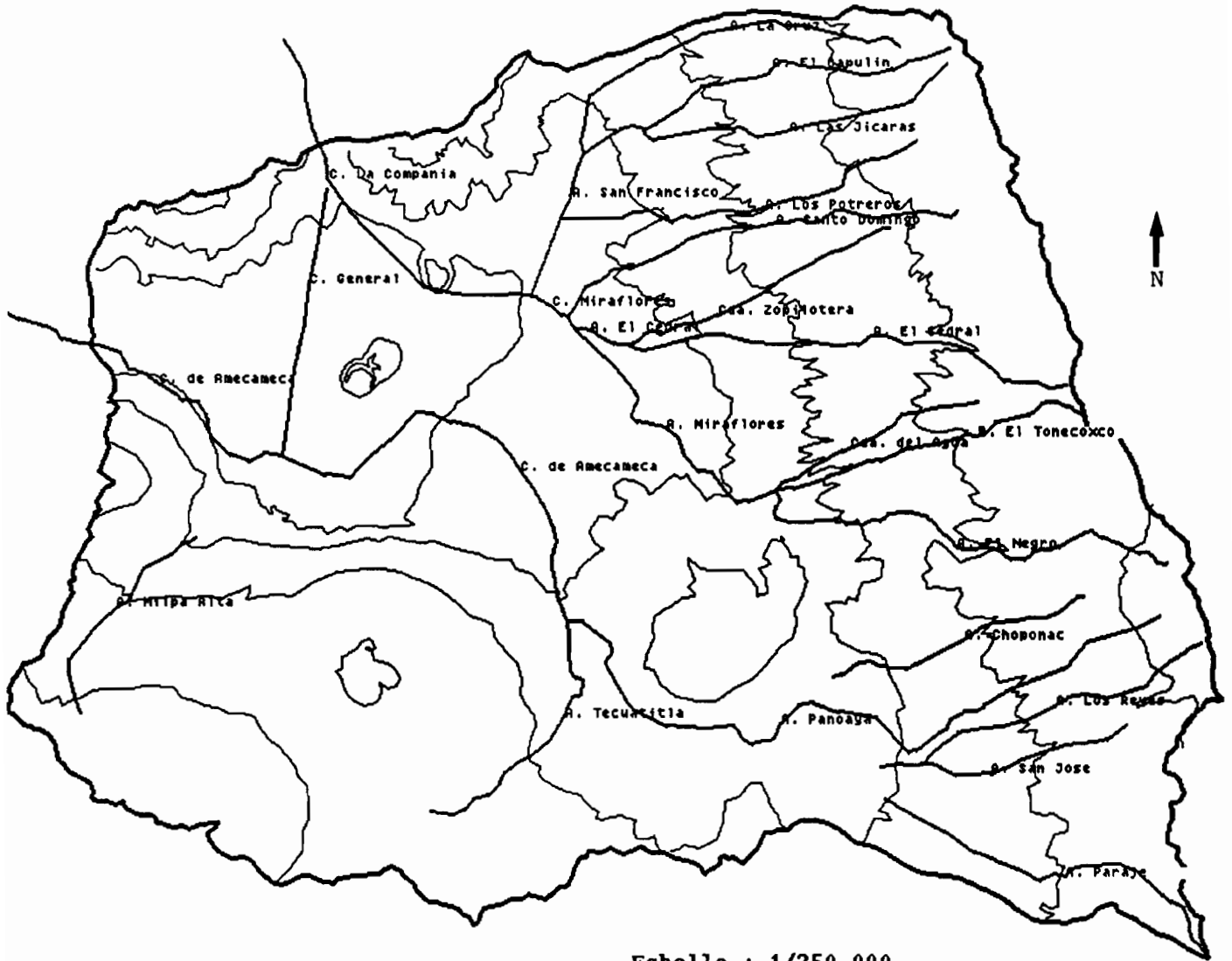
I.2 Hydrographie

Les principaux cours d'eau du bassin sont représentés sur la figure 4 - source carte topographique INEGI au 1/250.000è. On commentera cette carte de la façon suivante :

* les cours d'eau représentés sont quasiment tous intermittents. Certains d'entre eux disparaissent sans rejoindre l'exutoire du bassin.

* le bassin est drainé artificiellement dans sa partie inférieure : une partie des écoulements est drainée vers le lac de Xochimilco par le canal Amecameca à l'ouest, une autre vers le lac de Texcoco par le canal de la Compania au nord-ouest. Le bassin topographique de Chalco est ainsi artificiellement divisé en deux sous-bassins. La zone de plaine, dont l'altitude est le plus souvent inférieure à celle de ces canaux, est drainée artificiellement par des pompes vers l'un ou l'autre des deux canaux. Des travaux de constructions de collecteurs associés à des pompes élévatrices sont actuellement développés dans la nouvelle zone urbaine, située dans la plaine.

fig.4 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE



I.3 Pédologie

Les données pédologiques ont été tirées des cartes pédologiques de l'INEGI, au 1/50.000è. L'information figurant sur ces cartes répond aux normes édictées par la FAO (1976), et porte notamment sur les unités de sols, les classes texturales, les phases physiques, et les phases chimiques.

Sur le bassin, 9 types de sols sont représentés (figures 5 et 6). Les sols principaux sont les Feozems (23 %), les Andosols (19 %), les Litosols (17 %), les Regosols (17 %) et les Fluvisols (13 %). Plus faiblement représentés, on trouve également des Solonchaks (4 %) et des Gleysols (3 %) - tous deux localisés dans la zone de plaine -, des Cambisols (3 %) et des Vertisols (1 %).

En relation avec la perméabilité, on utilisera davantage les classes texturales (figure 7 et 8) : on trouve ainsi 4 % de sols à texture fine(*), 58 % de sols à texture moyenne et 38 % de sols à texture grossière.

La comparaison des textures peut donner une première indication sur les perméabilités respectives des sols. Il convient naturellement de considérer également d'autres facteurs : en premier lieu, occupation des sols (végétation, agriculture, urbanisation), mais également l'information pédologique plus détaillée figurant sur les cartes de l'INEGI (caractères secondaires des sols, phases physiques - figure 6 - et chimiques, points de vérification sur le terrain), et enfin, la géologie du bassin. Les phases physiques (figure 9) indiquent par exemple la présence d'horizons inférieurs imperméables (durique ou durique profond), la faible épaisseur du sol et la proximité de la roche mère (lithique ou lithique profond), etc...Ces informations sont évidemment susceptibles de modifier profondément les perméabilités des sols. Parallèlement au dépouillement cartographique, des mesures d'infiltration par simulation de pluies devront être réalisées sur le terrain pour préciser les perméabilités "in situ".

(*) les classes texturales sont définies par :

Texture fine : plus de 35 % d'argiles - Texture moyenne : moins de 35 % d'argiles et moins de 65 % de sables - Texture grossière : moins de 18 % d'argiles et plus de 65 % de sables.

fig. 5 : UNITES PEDOLOGIQUES

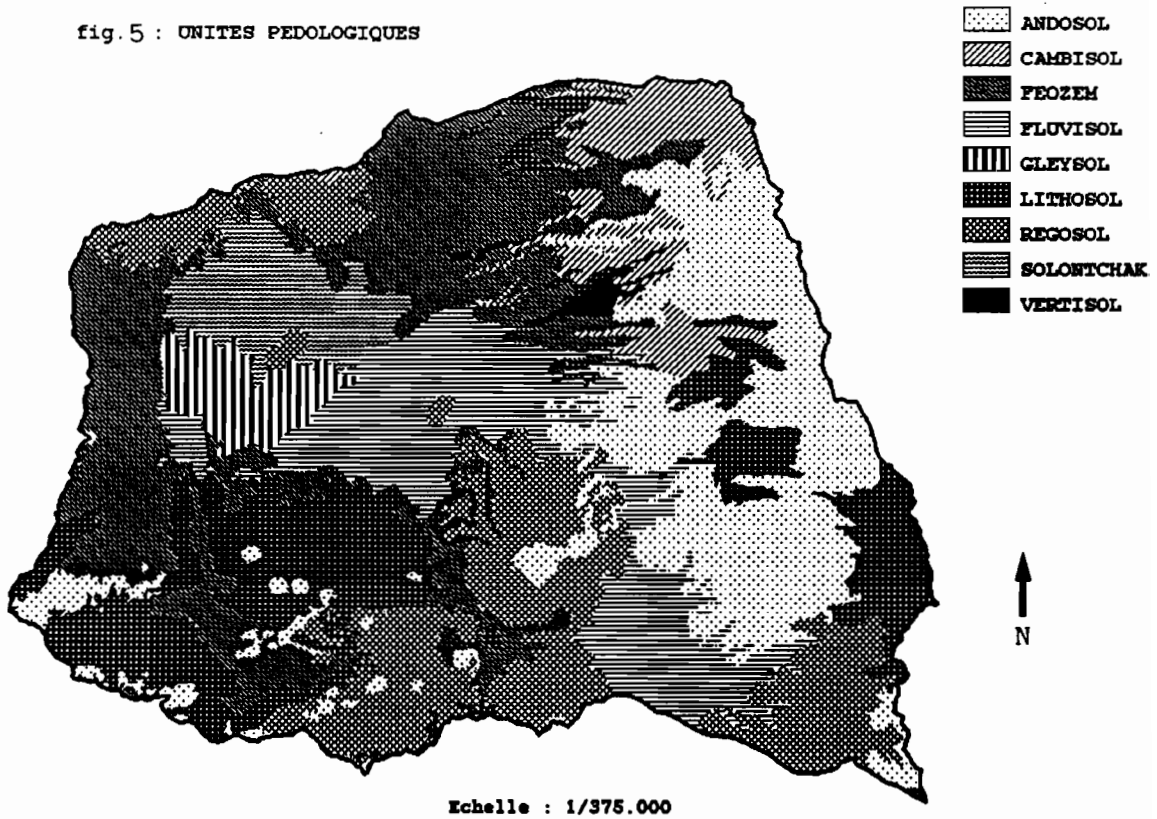


Fig6 : Histogramme unites pedologiques

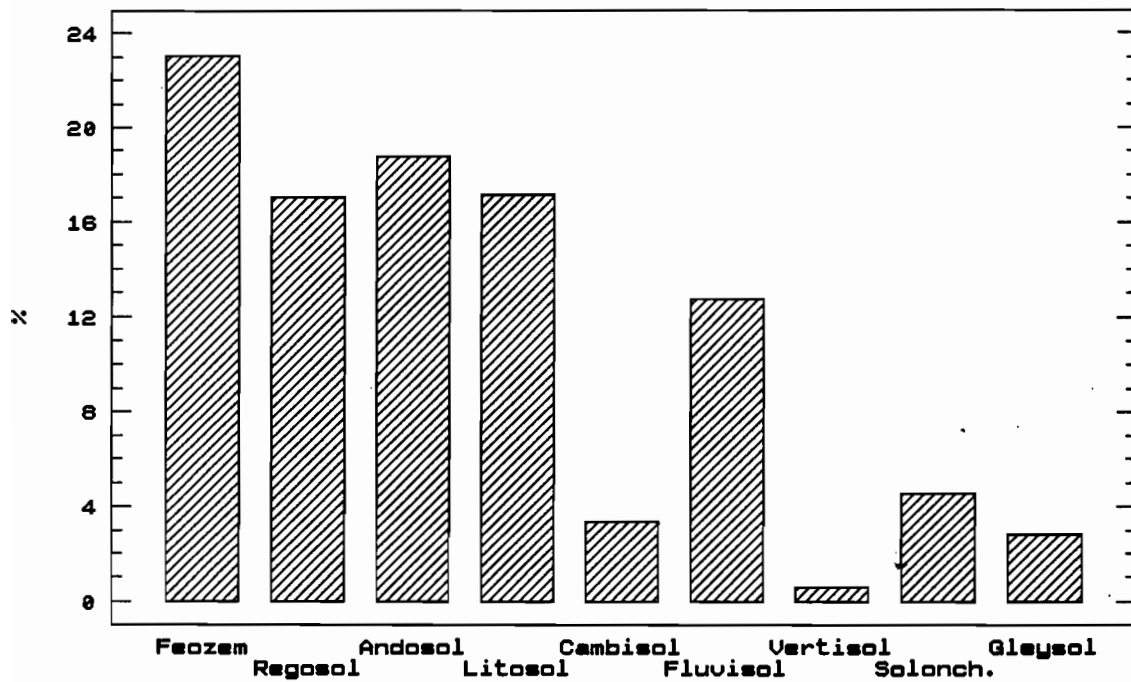


fig.7 : CLASSES TEXTURALES

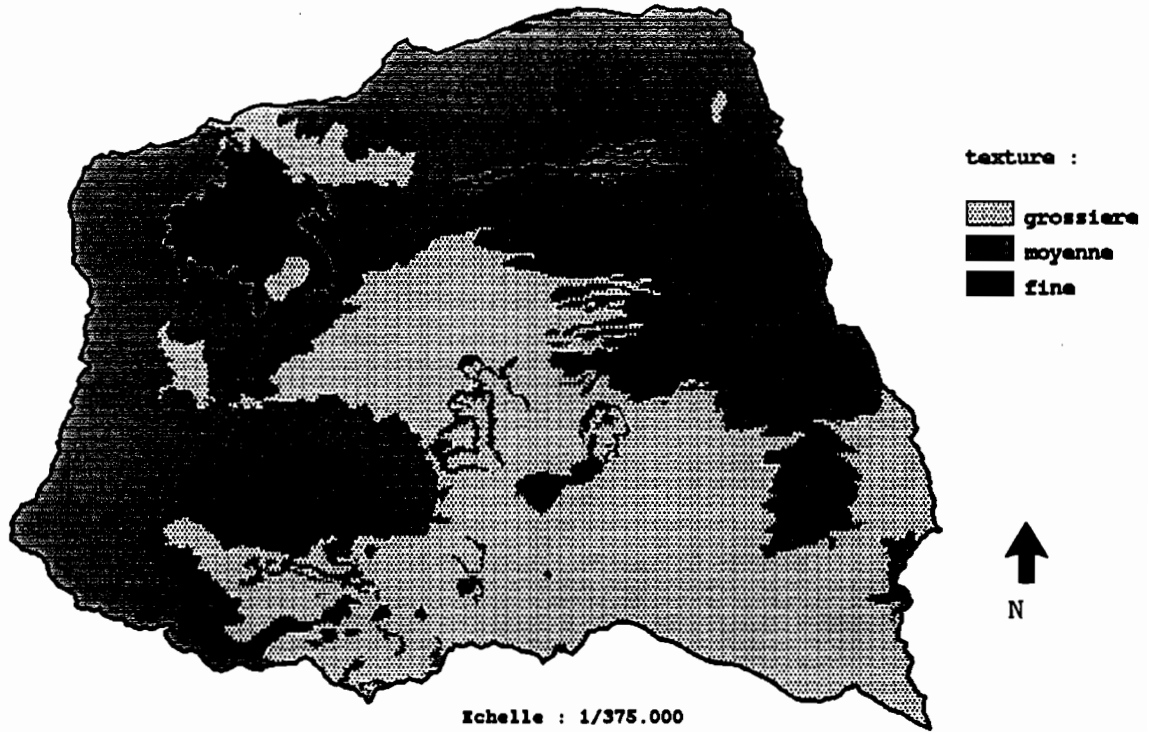


Fig 8 : Histogramme classes texturales

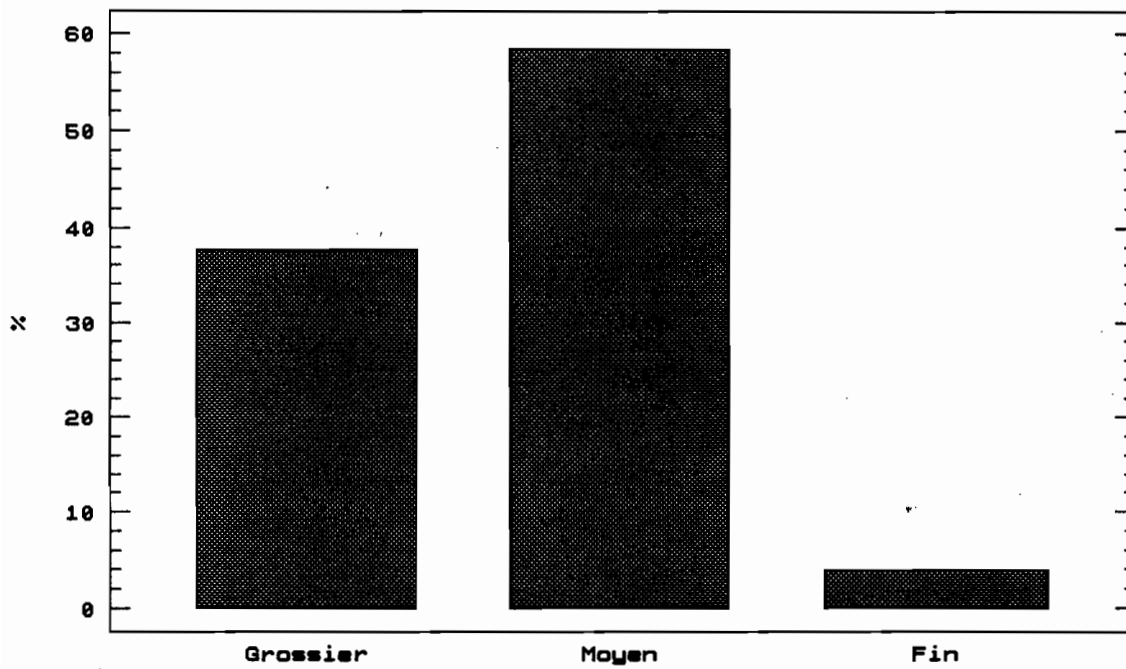
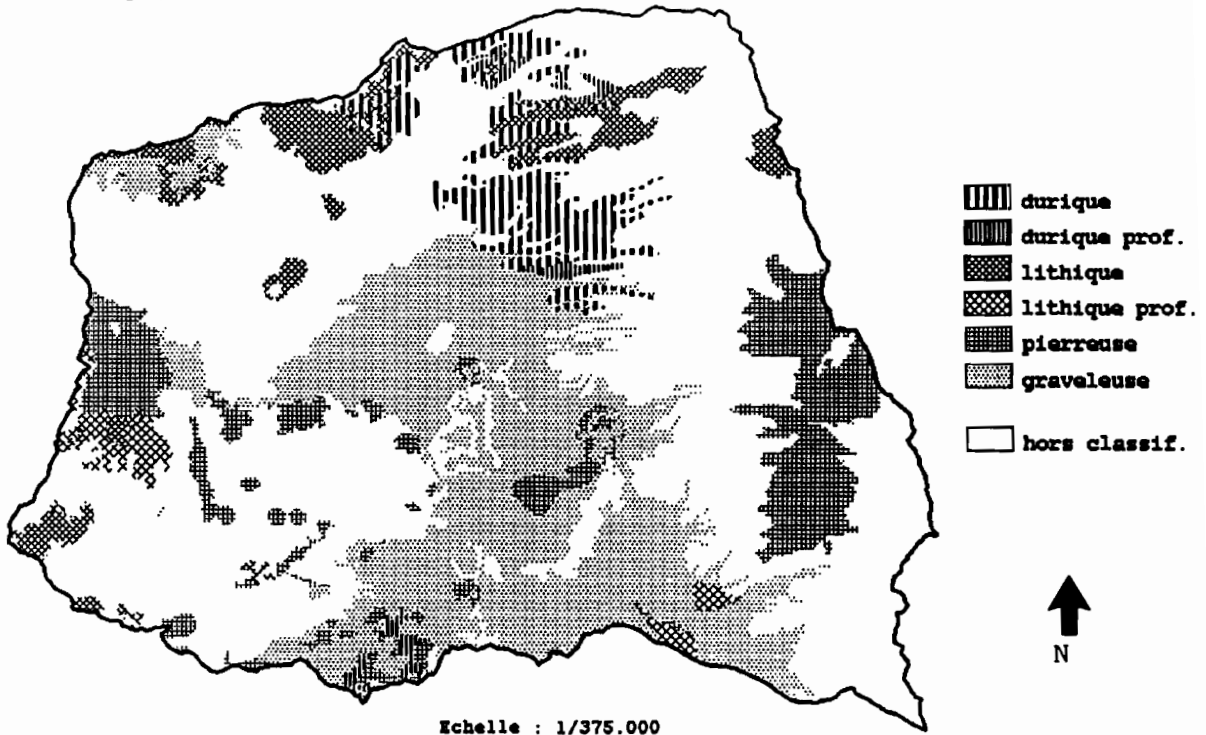


fig. 9: PHASES



Echelle : 1/375.000

I.4 Occupation des sols

Les données d'occupation des sols ont été tirées des cartes de l'INEGI au 1/50.000, réalisées à partir d'une couverture de photographies aériennes datant de 1970 (cartes Chalco, Milpa Alta et Ciudad de Mexico) et 1977 (cartes Amecameca et Huejotzingo). Eu égard à l'évolution du bassin de Chalco, certaines données (urbanisation et agriculture notamment) doivent être réactualisées.

Dix modes d'occupations des sols ont finalement été retenus (fig. 9b et 9c) : les 3 principaux sont les zones d'agriculture (50 %), de forêts naturelles (28 %) et de pâturages (12 %). Les zones urbaines représentent 3 % de la superficie du bassin. Pour le reste, on trouve des zones d'agriculture irriguée, de forêts cultivées, de végétation arbustive, d'herbe rase, de sols nus et de carrières, représentant chacune moins de 1 % de la superficie du bassin.

Plusieurs zones sont liées à l'altitude : l'agriculture occupe la majeure partie du bassin située en dessous de 2500 mètres (jusqu'à 3000 m dans quelques cas) ; la forêt se situe généralement entre 3000 et 4000m (parfois entre 2500 et 3000m) ; plus haut, sur l'Iztaccihuatl et sur les contreforts du Popocatepetl, la forêt laisse place à l'herbe rase (jusqu'à 4000m), puis aux sols nus.

La principale zone urbaine est évidemment l'agglomération de Chalco. On trouve en outre 3 villages importants : Amecameca, Milpa Alta et Juchitepec, puis une trentaine de villages disséminés sur le bassin, à une altitude toujours inférieure à 3000m.

fig.9b: OCCUPATION DU SOL

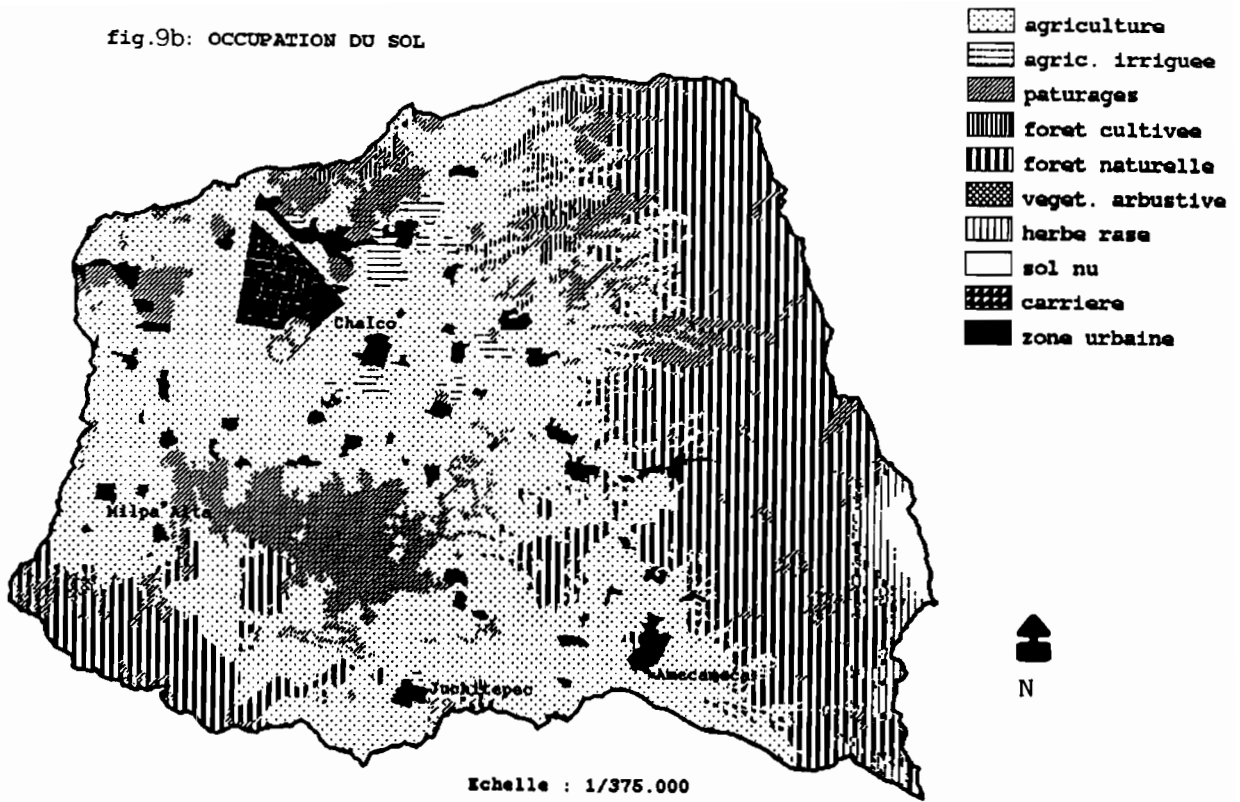
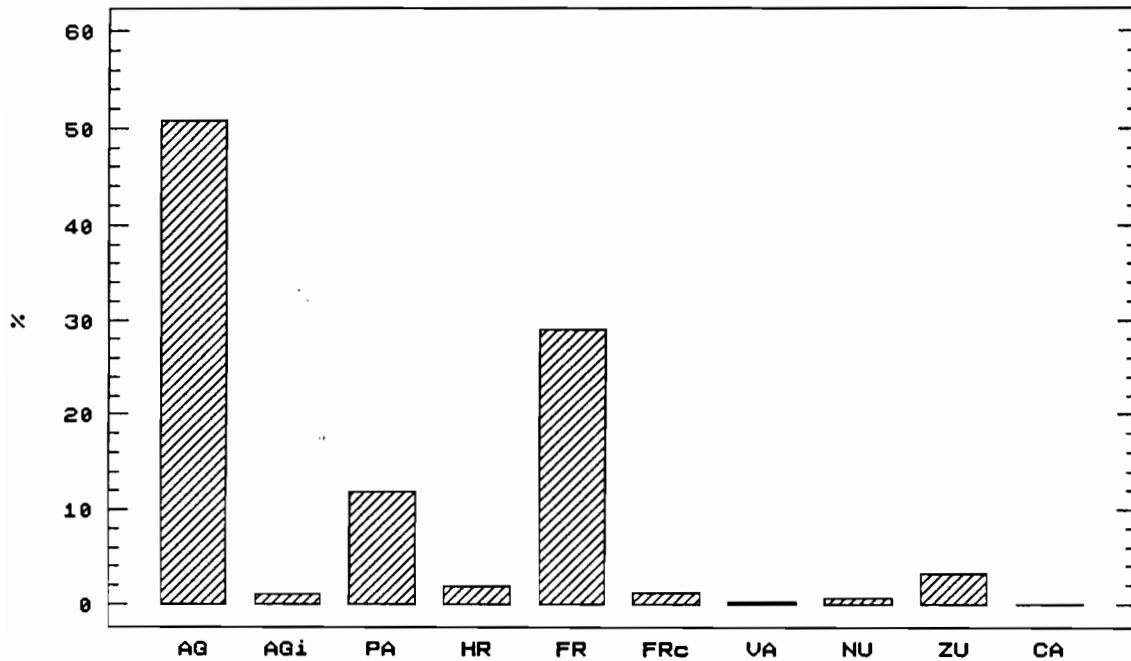


Fig9c : Histogrammes occupation des sols



DEUXIEME PARTIE

CLIMATOLOGIE DU BASSIN DE CHALCO

La couverture d'appareils de mesures climatologiques sur le bassin de Chalco comprend 13 stations, auxquelles s'ajoutent 2 stations situées à proximité immédiate du bassin, soit un total de 15 stations (fig 10 et tab.1).

Tableau 1 : Liste des stations climatiques

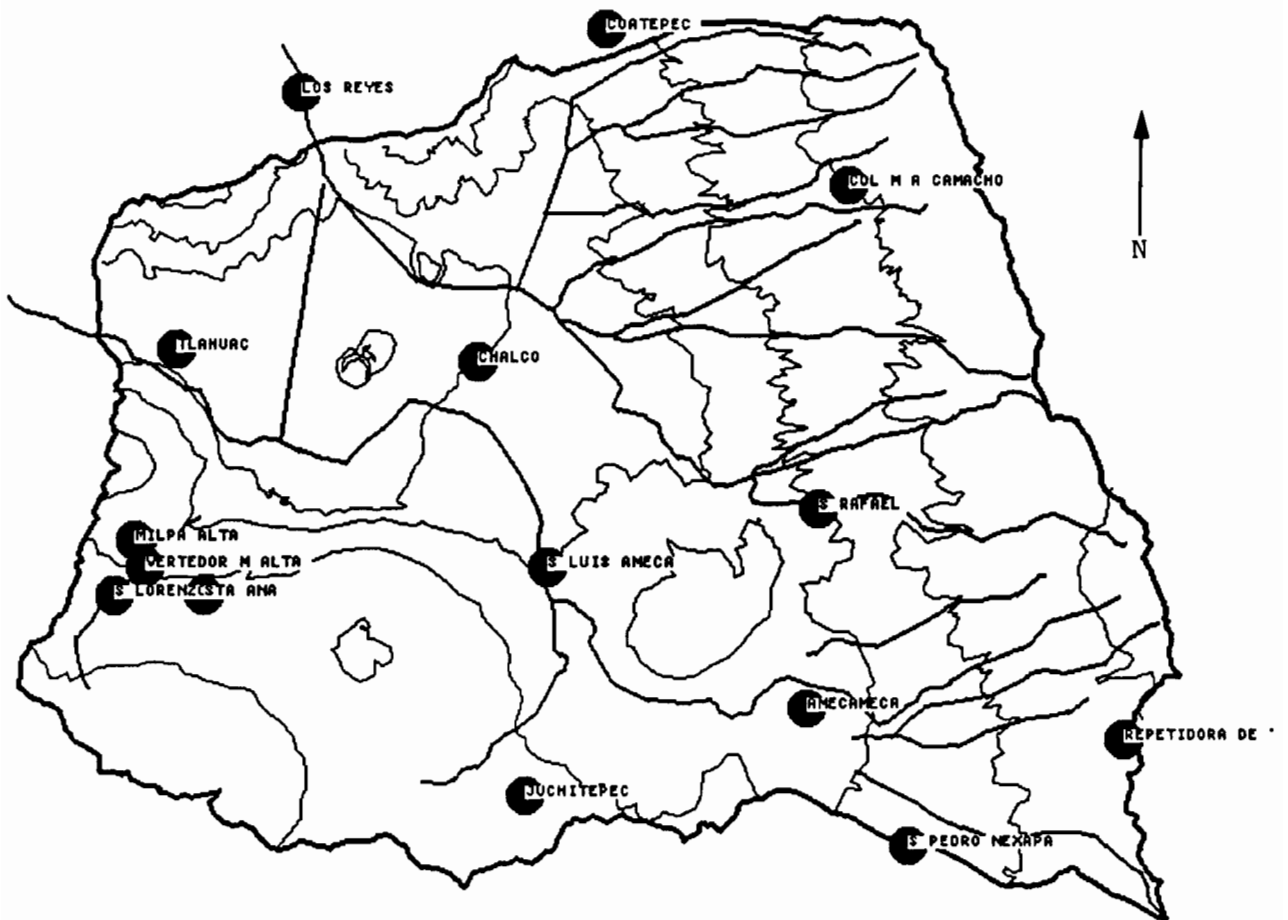
Code	Nom	Type	Latitude ° ' ''	Longitude ° ' ''	Altitude m	Début
2571010801	COL. MANUEL AVILA CAMACHO	P,Pg,T,E	N 19 19 30	0 98 45 45	2480	1960
2571010802	TLAHUAC	P,T,E,A	N 19 15 58	0 99 0 26	2240	1960
2571010803	CHALCO	P,Pg,T,E,HI	N 19 15 30	0 98 53 45	2240	1960
2571010804	SAN RAFAEL	P,Pg,T,E	N 19 12 30	0 98 45 15	2620	1922
2571010805	MILPA ALTA	P,T,E	N 19 11 9	0 99 1 15	2455	1929
2571010806	VERTEDOR MILPA ALTA	P,Pg,T,E,Et,Hy,A,HI	N 19 11 9	0 99 1 15	2455	1963
2571010807	SAN LORENZO	P,T,E	N 19 10 30	0 99 1 54	2620	1963
2571010808	SANTA ANA	P,T,E	N 19 10 30	0 99 0 7	2620	1963
2571010809	SAN LUIS AMECA II	P,T,E	N 19 11 5	0 98 52 10	2280	1952
2571010810	AMECAMECA	P,Pg,T,E,Hy	N 19 8 25	0 98 46 20	2460	1927
2571010811	REPETIDORA DE T.V.	P,Pg,T,Hy	N 19 7 10	0 98 39 10	3900	1961
2571010812	JUCHITEPEC	P,Pg,T,E	N 19 6 7	0 98 52 50	2530	1960
2571010813	SAN PEDRO NEXAPA	P,Pg,T,E,Hy	N 19 5 3	0 98 44 15	2620	1960
Hors Bassin						
2571010714	COATEPEC de los OLIVOS	P,Pg,T,E	N 19 23 3	0 98 50 40	2405	1960
2571010715	LOS REYES de la PAZ	P,Pg,T,E,Hy	N 19 21 45	0 98 57 44	2260	1938

P=Pluviomètre;Pg=PluviographeT=Thermomètre;E=Evaporomètre;
Hy=Hygromètre;A=Anémomètre;HI=Héliographe;Et=Evapotranspiromètre

Ces appareils de mesures sont constitués de 15 pluviomètres, 10 pluviographes, 15 thermomètres, 14 évaporomètres, 5 hygromètres, 3 anémomètres, 2 héliographes et 1 évapotranspiromètre (*), dont la figure 11 indique les périodes de fonctionnement. A partir de ces données, nous avons choisi pour cette étude de consacrer la plus grande partie de l'analyse aux précipitations, qui seront étudiées sur l'ensemble des 13 stations du bassin. Les autres conditions climatologiques seront présentées et analysées à partir des données de la station Vertedor Milpa Alta, qui regroupe 8 appareils de mesures.

(*) à ces appareils s'ajoutent 5 pluviographes mis en service en 1982 par le DDF, dans la zone de Tlahuac.

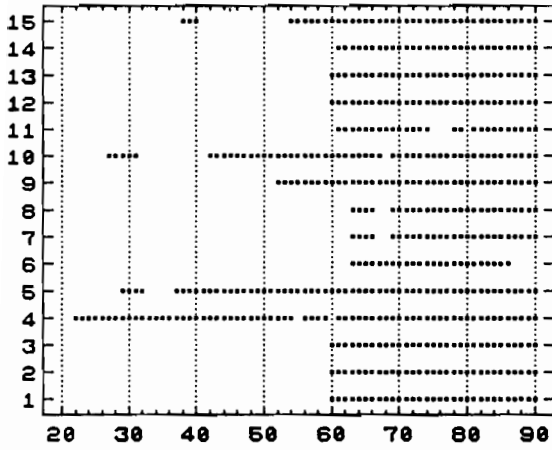
fig.10: LOCALISATION DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES



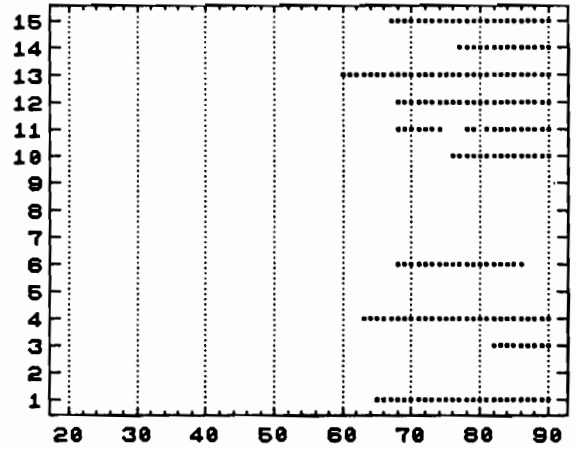
Echelle : 1/300.000

Fig. 11 : Périodes de fonctionnement des appareils climatologiques

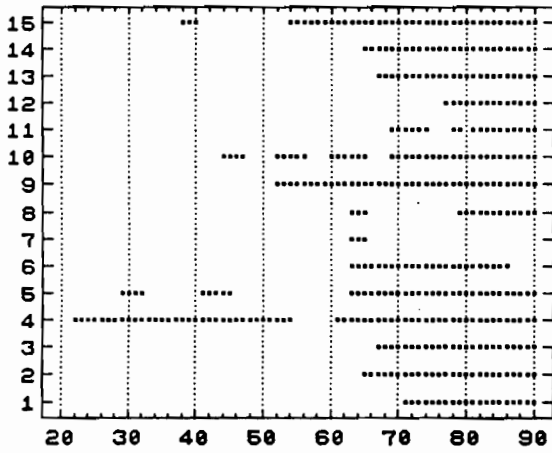
PLUVIOMETRES



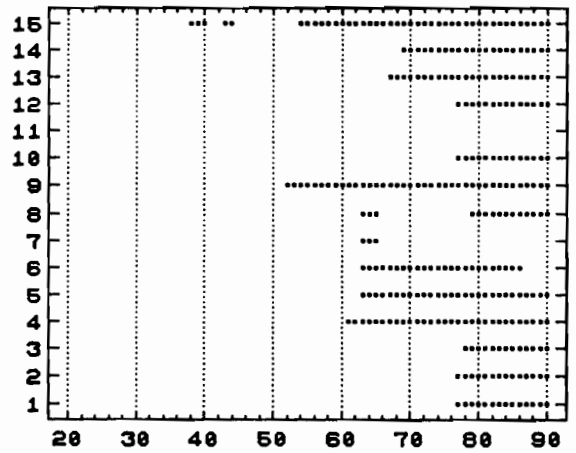
PLUVIOGRAPHES



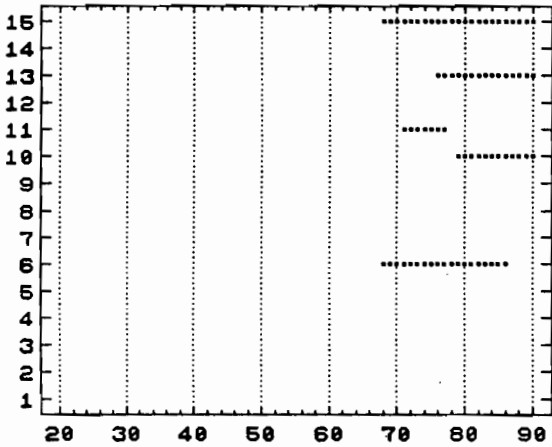
THERMOMETRES



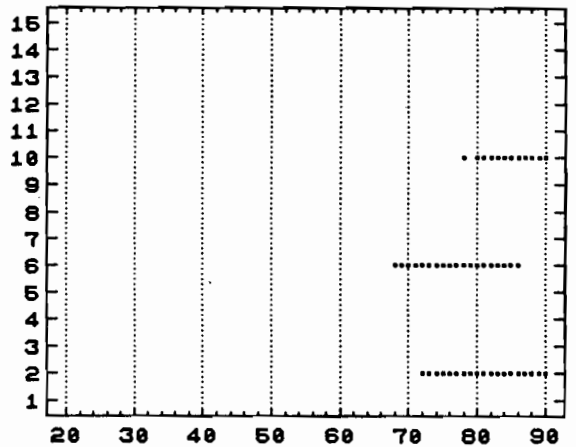
EVAPOROMETRES



HYGROMETRES



ANEMOMETRES



II.1 LES PRECIPITATIONS

II.1.1 Les données pluviométriques

Chacun des pluviomètres a été relevé de façon journalière, avec lecture à 8h du matin. Les pluviographes utilisés sont de marques diverses (Rossbach, Wilh Lambrecht, R. Fuess), tous de type siphon, et fonctionnent en rotation journalière, la feuille étant changée vers 8h du matin.

On trouvera en annexe les données saisies dans le cadre de cette étude : pluies mensuelles et annuelles, pluies maximales en 24 heures, de 1960 à la date la plus récente. La capture des données pluviométriques, réalisée à l'aide de PLUVIOM (ORSTOM, 1989a), sera ultérieurement complétée en fonction des développements de l'étude.

A partir des valeurs annuelles de précipitations, nous avons d'abord entrepris des tests dits de "double-cumul", visant à détecter d'éventuelles anomalies systématiques dans le fonctionnement des stations : ces anomalies sont par exemple dues à un changement d'emplacement de la station, à des erreurs de lecture d'un opérateur, à une détérioration de l'appareil, etc..

Pour chaque station, le cumul des pluies journalières a ensuite été comparé à celui de la station Milpa Alta, choisie comme référence de qualité. On notera sur la figure 12 le bon alignement des points, indice d'homogénéité des mesures réalisées. Pour la station Repetidora T.V., on observera cependant une cassure nette survenant en 1970 ; les relevés sont par ailleurs irréguliers et paraissent peu fiables, et il semble préférable de ne pas tenir compte de cette station.

II.1.2 Variabilité spatiale des précipitations

Les précipitations sur le bassin de Chalco sont d'abord caractérisées par une grande variabilité spatiale, comme le montre le tableau 2 où figurent les moyennes pluviométriques interannuelles des 13 stations installées sur le bassin :

Tableau 2 : Moyennes interannuelles des précipitations annuelles

Station	2	3	9	6	8	5	1	7	12	13	11	10	4
Pann.(mm)	593	629	690	700	724	728	767	771	809	912	933	968	1087
Alt.(m)	2240	2240	2280	2455	2620	2455	2870	2620	2530	2620	3900	2460	2620

Figure 12 : Double-cumuls des pluies annuelles, en millimètres

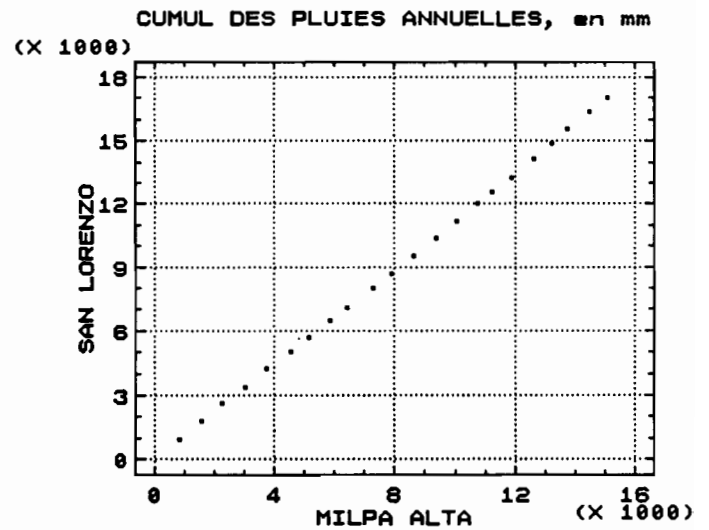
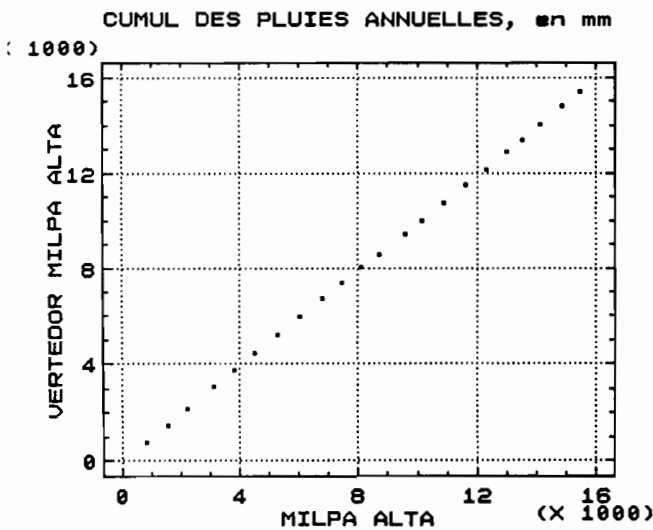
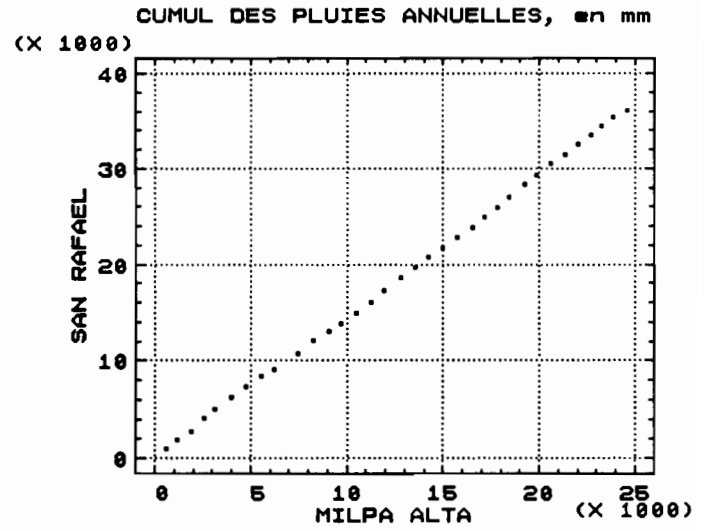
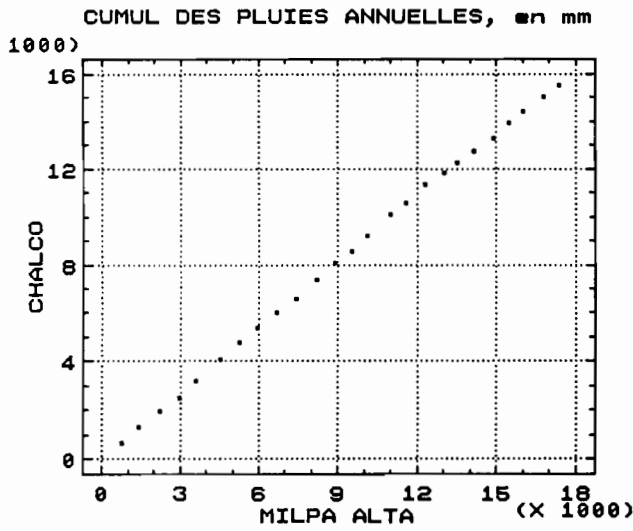
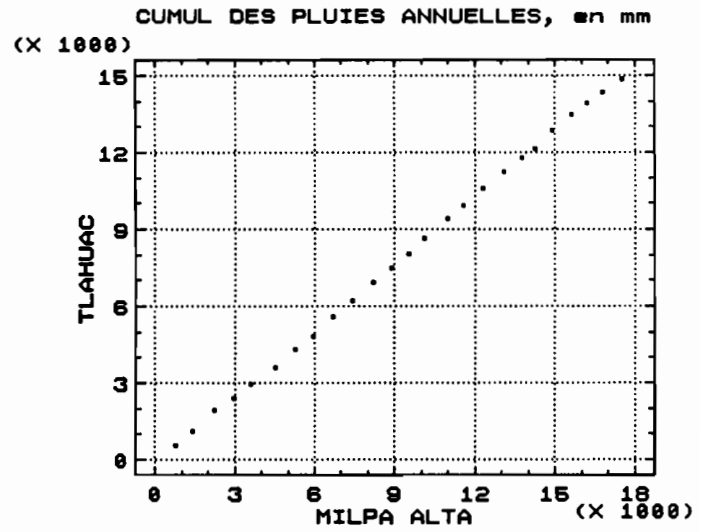
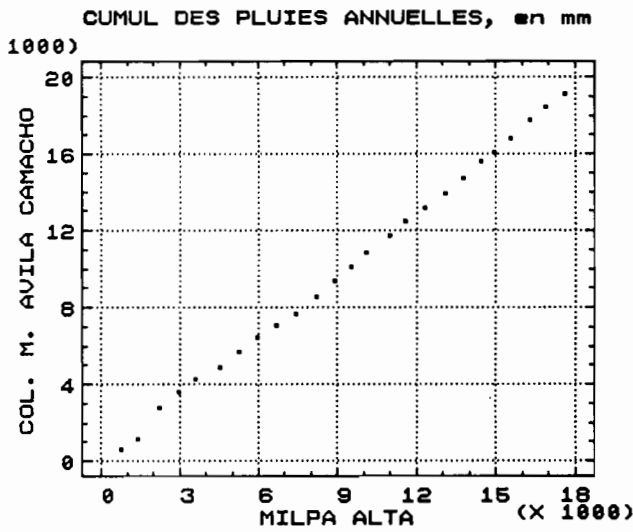
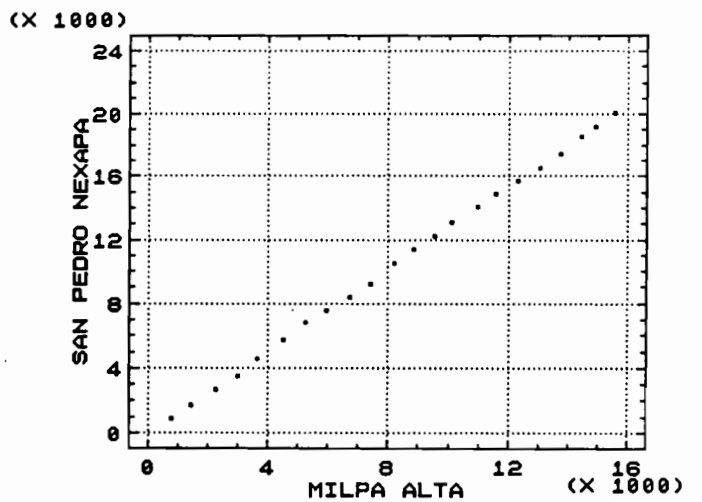
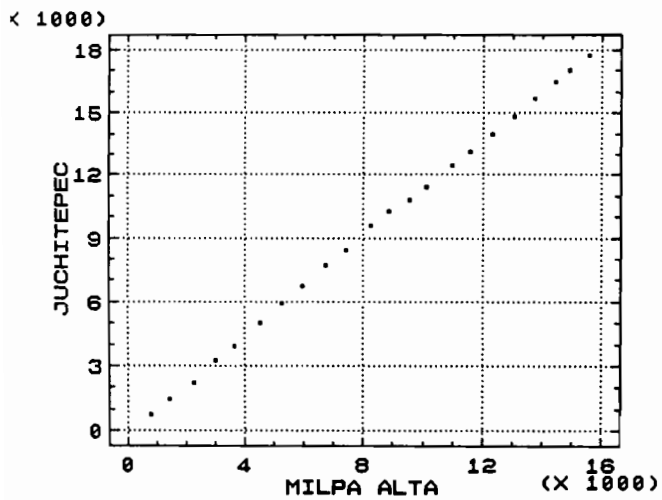
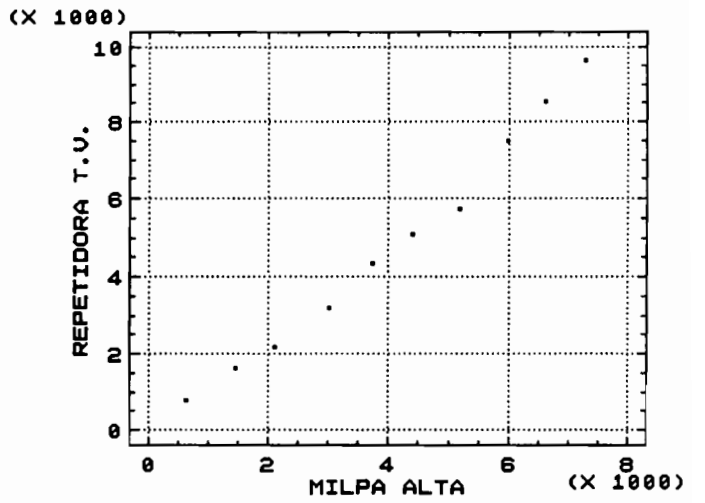
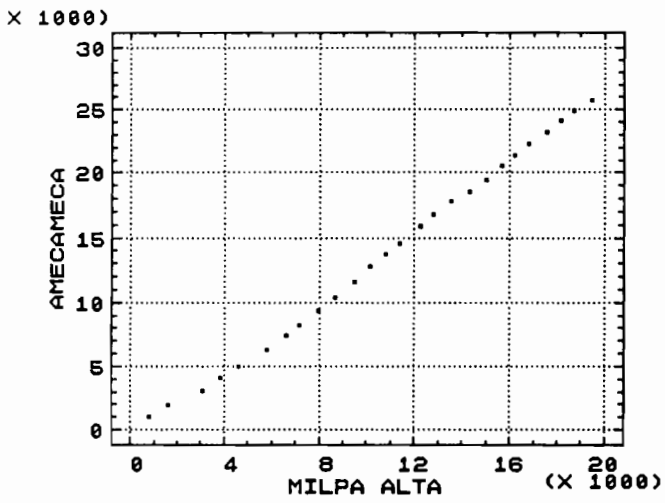
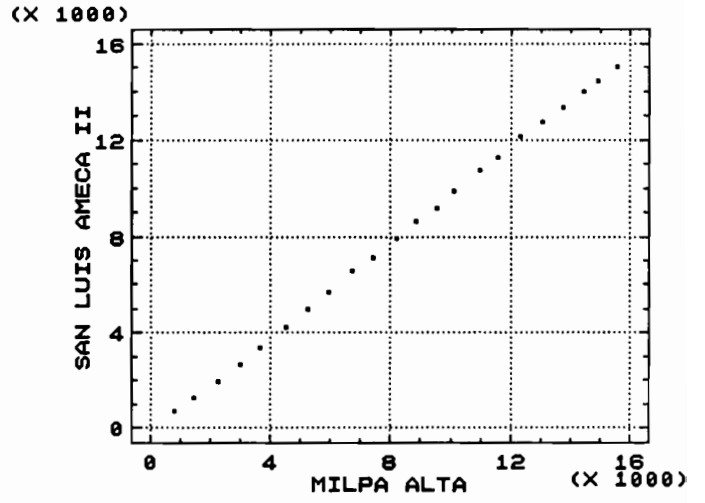
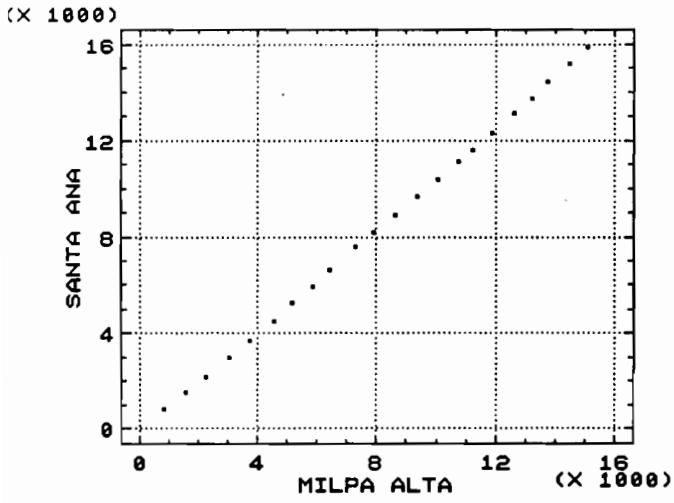


Figure 12 (suite)



De ces valeurs, variant de 593 à 1087 millimètres, il est possible de dégager l'organisation suivante :

* le groupe de stations situées à une altitude inférieure à 2300m : Tlahuac, Chalco, San Luis Ameca II, dont les précipitations annuelles moyennes varient d'environ 600 à 700 mm ;

* le groupe de stations situées à une altitude voisine de 2500m, et localisées dans le sud-ouest du bassin : Milpa Alta, Vertedor Milpa Alta, San Lorenzo, Santa Ana, dont les précipitations annuelles moyennes varient d'environ 700 à 800 mm ;

* le groupe de stations situées à une altitude voisine de 2500 m, et localisées dans le sud-est du bassin : Juchitepec, Amecameca, San Pedro Nexapa, dont les précipitations annuelles moyennes varient d'environ 800 à 1000 mm.

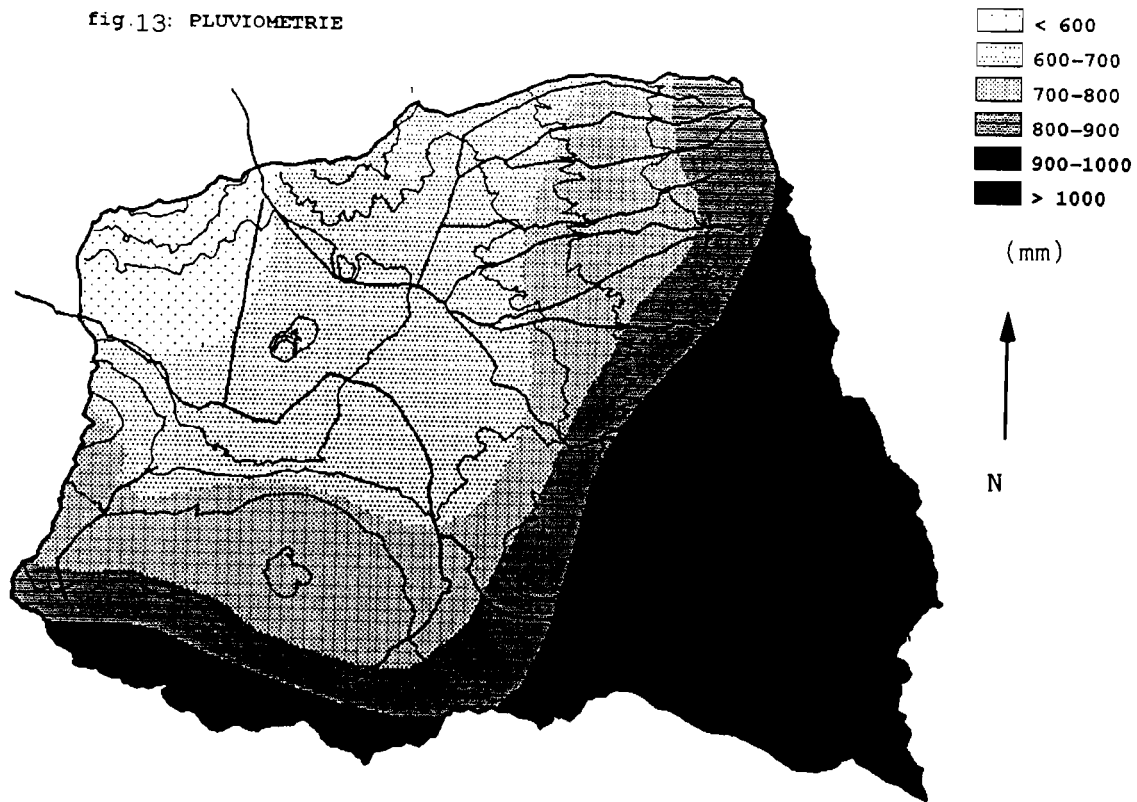
Ainsi, l'on doit considérer deux facteurs de variations des précipitations, dus à l'influence du relief sur le bassin (de 2240 à 5200 mètres) :

* directement, l'élévation du relief produit une augmentation des précipitations. On ne dispose cependant pas d'assez nombreuses observations pour caractériser précisément le gradient pluviométrique : une seule station correspond à une altitude supérieure à 2900 m, et les valeurs annuelles mesurées à cette station (Repetidora T.V., 4000m) sont peu nombreuses et peu cohérentes.

* indirectement, le relief génère des courants de masses d'air, et les précipitations, pour une altitude donnée, sont manifestement influencées par leur localisation sur le bassin. Ainsi, 8 des 13 stations dont l'altitude varie peu (entre 2400 et 2650 m) présentent des précipitations annuelles variant de 700 à 1087 millimètres. Pour une altitude donnée, les précipitations augmentent en fait en suivant deux courants circulaires périphériques de l'ouest vers l'est, qui convergent et atteignent un maximum observé à la station San Rafael.

En considérant ces différents facteurs, nous avons établi à titre indicatif une carte des isohyètes moyennes annuelles (fig 13) sur le bassin. Il doit être clair cependant que de nouvelles mesures doivent être réalisées pour préciser les variations pluviométriques dans les zones d'altitudes supérieures à 3000 mètres notamment. Avec ces réserves, la pluie annuelle moyenne serait de 812 millimètres sur le bassin.

fig.13: PLUVIOMETRIE



échelle : 1/375 000

II.1.2 Analyse chronologique des variations pluviométriques annuelles

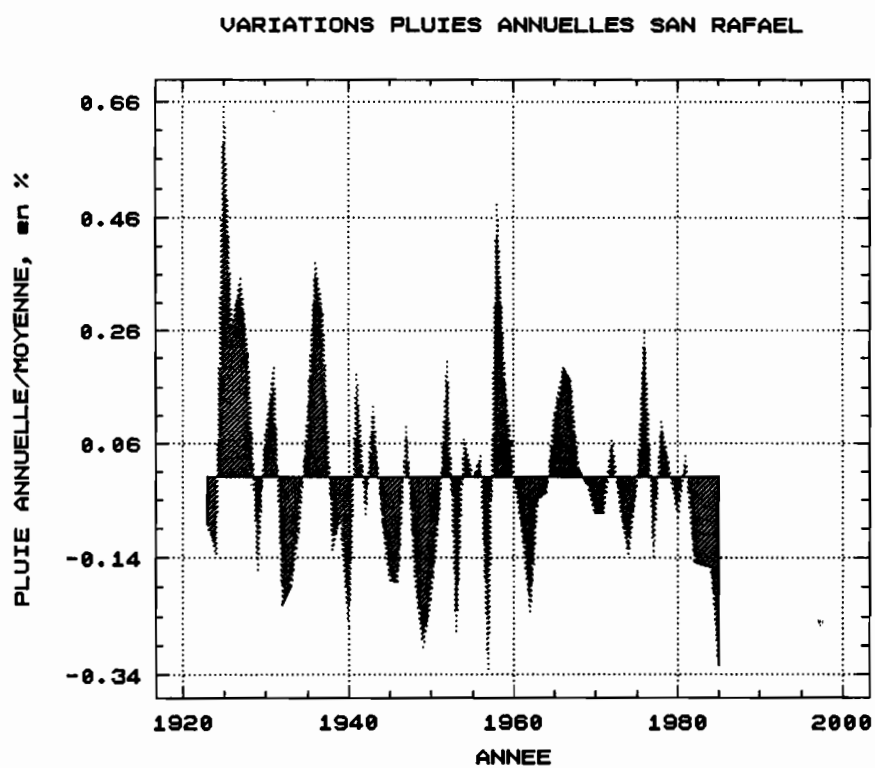
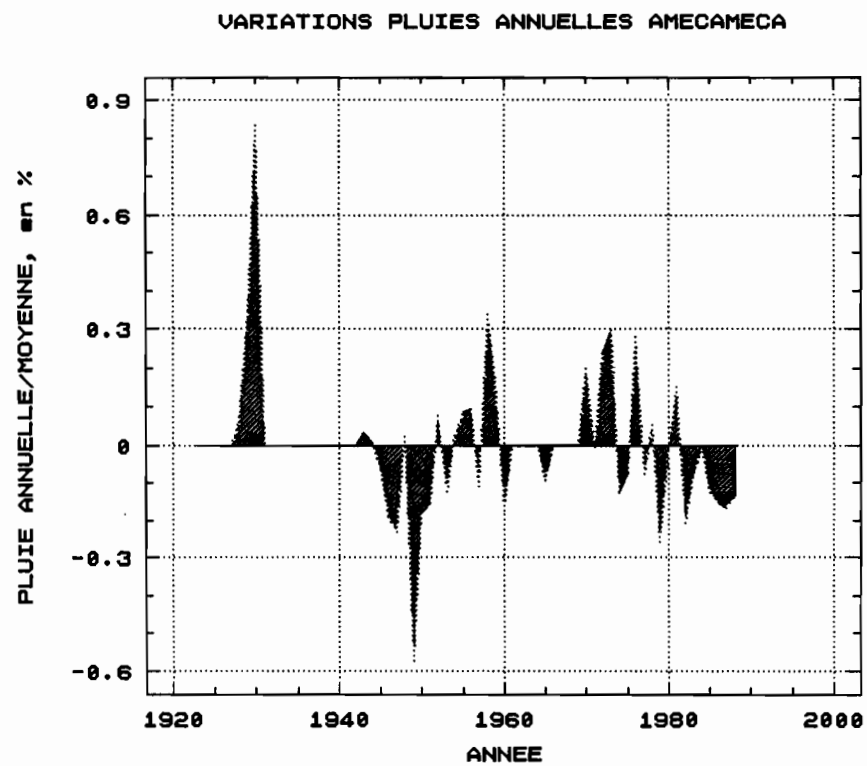
Les plus longues séries de pluies annuelles, correspondant aux stations San Rafael (60 ans) et Amecameca (41 ans), permettent d'obtenir un aperçu chronologique des principales variations pluviométriques sur le bassin de Chalco (fig 14). On constate que :

1) les années excédentaires et déficitaires semblent bien réparties au cours du temps. On pourra noter néanmoins les groupements d'années suivantes :

- période humide de 1925 à 1928 (4 années),
- période sèche de 1945 à 1950 (5 années en exceptant l'année 1947),
- période humide de 1965 à 1968 (4 années),
- période sèche de 1982 à 1988 (7 années).

2) la longueur des groupements d'années de même type (excédentaire ou déficitaire) paraît être distribuée de façon aléatoire. Le phénomène de persistance entre états secs ou pluvieux est peu marqué, à l'échelle de l'année : pour la station la plus longue, San Rafael, et sur les 56 transitions possibles entre états secs et pluvieux, 30 d'entre elles sont des successions d'un même état, contre 26 qui correspondent à des transitions d'états.

Figure 14 : Variations chronologiques de la pluviométrie



En conclusion, l'analyse chronologique des deux plus longues séries pluviométriques ne permet pas de faire apparaître des phénomènes marquants (tendance, cycle, persistance) dans la structure des précipitations annuelles, qui apparaissent distribuées aléatoirement dans le temps. On surveillera néanmoins l'évolution de la période sèche actuelle, commencée en 1982 et perdurant jusqu'à 1988, voire 1989 d'après les données de stations voisines (voir Chalco, San Lorenzo, Santa Ana).

II.1.3 Distributions des pluies annuelles

L'étude statistique des pluies annuelles a été réalisée sur les deux plus longues chroniques de précipitations, soit :

San Rafael (60 années de données) : de 1923 à 1985, sauf 1955, 1960 et 1979.

Amecameca (41 années de données) : de 1928 à 1930, de 1943 à 1960, 1965, de 1970 à 1988.

Pour cette dernière station, nous n'avons pas tenu compte des valeurs extrêmes, 1786 mm en 1930 et 415 mm en 1949 : ces valeurs sont très éloignées des valeurs immédiatement voisines (1312 mm et 721 mm) et leur caractère exceptionnel de ces valeurs n'est pas confirmé par les valeurs enregistrées à la station San Rafael pour les mêmes années. La chronique des données se réduit donc à 39 années pour la station Amecameca.

Le traitement statistique a été réalisé par le logiciel DIXLOI (ORSTOM, 1989), dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- * 10 lois statistiques peuvent être ajustées à chaque échantillon,
- * deux tests statistiques rendent compte de l'adéquation de l'ajustement : le test du CHI², qui renseigne sur l'adéquation globale de l'ajustement; le test dit de Brunet-Moret (1978), qui accorde plus de poids aux valeurs extrêmes; la possibilité de visualisation graphique des ajustements complète la comparaison des différents ajustements ;
- * le logiciel fournit les intervalles de confiance correspondants à chacun des ajustements.

Les caractéristiques des pluies annuelles, à San Rafael et à Amecameca, sont résumées dans le tableau 3 :

Fig. 15 : Ajustements statistiques de Gumbel, Galton et Pearson 3
aux précipitations annuelles

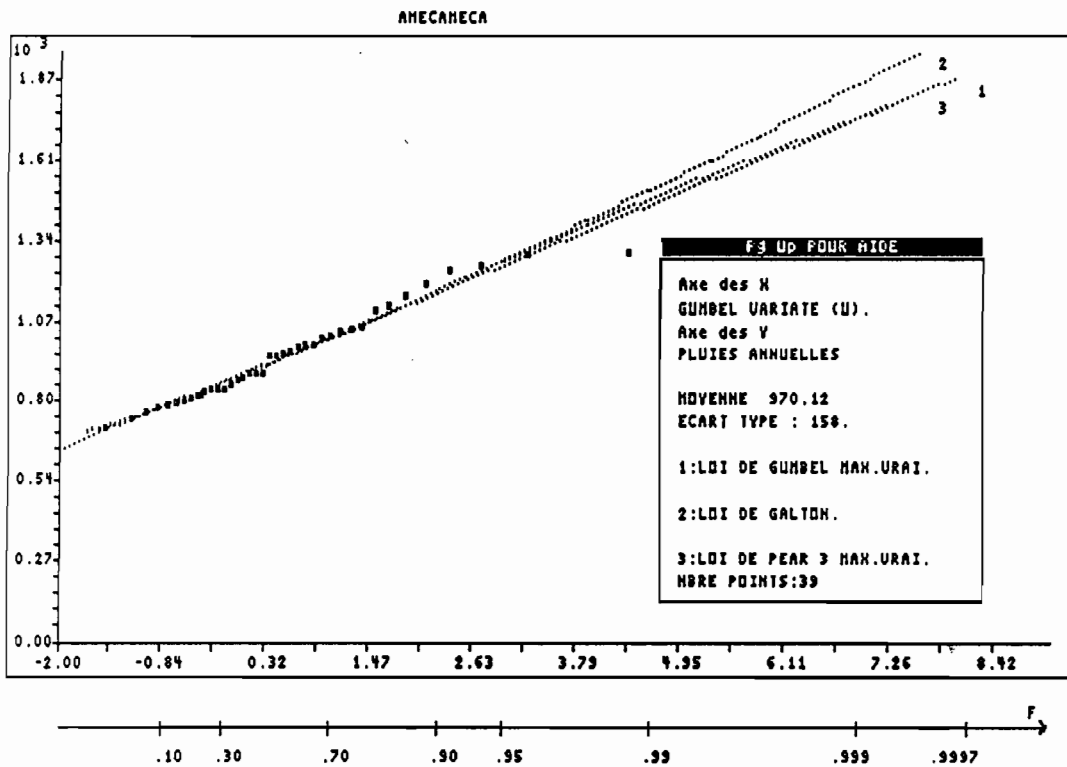
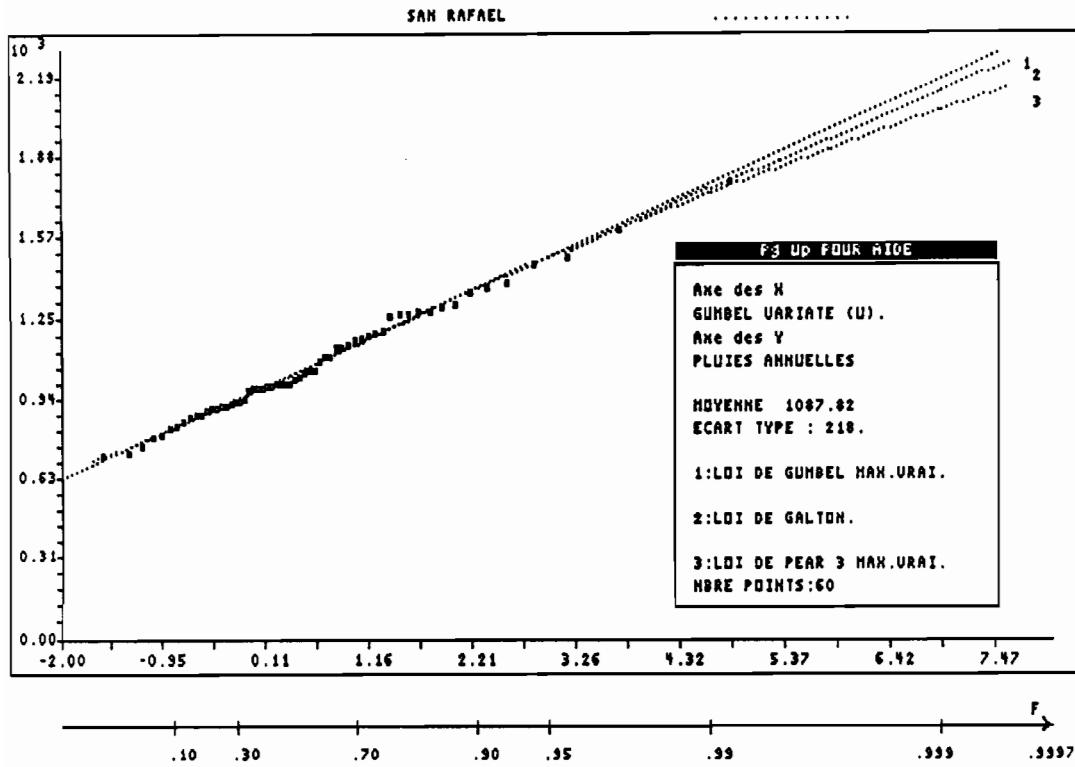


Tableau 3 : Paramètres des distributions des pluies annuelles

Station	San Rafael	Amecameca
Moyenne observée (mm)	1087,2	968,0
Médiane observée(mm)	1028,7	966,8
Ecart-type (mm)	217,8	157,7
Coefficient asymétrie	0,85	0,66
Coefficient aplatissement	0,84	-0,47

Les distributions de ces pluies sont dyssimétriques, et parmi les dix lois testées, les meilleurs ajustements sont obtenus par les lois de Gumbel, log-normale, et Pearson 3 (fig 12). Le tableau 4 résume les caractéristiques des distributions des pluies annuelles - quantiles avec bornes des intervalles de confiance à 90 % - pour les deux stations, après ajustement d'une loi de Gumbel dont la fréquence au non-dépassement F s'écrit :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u))$$

avec $u = (x-986)/175$ pour la station San Rafael

$(x-894)/125$ pour la station Amecameca

Tableau 4 : Quantiles et intervalles de confiance à 90 % des distributions des pluies annuelles

Station	SAN RAFAEL		AMECAMECA	
	Pluie annuelle	Intervalle de confiance Borne inf. Borne sup	Pluie annuelle	Intervalle de confiance Borne inf Borne sup
Sèche				
100	719	670 768	702	659 746
50	747	701 793	723	682 764
20	794	752 836	756	719 794
10	840	801 879	789	755 824
5	903	866 940	834	801 867
2	1050	1007 1094	940	901 979
5	1249	1182 1316	1082	1022 1142
10	1380	1294 1466	1176	1100 1253
20	1506	1401 1611	1266	1173 1360
50	1669	1539 1800	1383	1267 1500
100	1792	1641 1942	1471	1337 1605
Humide				

II.1.4 Répartition mensuelle des pluies

La figure 16 montre les histogrammes des pluies mensuelles moyennes obtenus pour 6 stations, l'une située au centre du bassin (San Luis Ameca II), les cinq autres régulièrement réparties sur la périphérie du bassin.

Pour l'ensemble de ces stations, les histogrammes moyens des pluies mensuelles sont très semblables, et permettent de distinguer uniformément :

- * une saison humide de 4 mois (juin à septembre), qui regroupe en moyenne 71 % du total pluviométrique annuel,
- * une saison sèche de 6 mois (novembre à avril), qui ne reçoit en moyenne que 12 % du total pluviométrique annuel,
- * deux mois de transitions (mai et octobre), qui reçoivent en moyenne 17 % du total pluviométrique annuel.

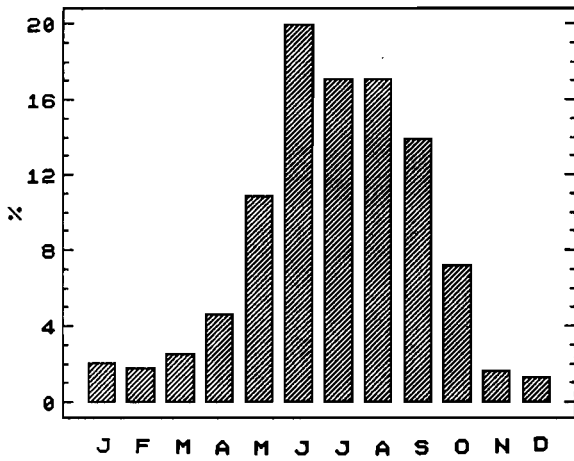
Il est cependant possible d'observer des précipitations importantes en période réputée sèche : l'exemple le plus significatif est celui de la station Milpa Alta, qui a reçu 65 mm en 24 heures en janvier 1967, soit le total journalier le plus important de l'ensemble des 23 années de mesures. Le tableau 5 résume la variabilité des précipitations mensuelles pour 3 stations : Chalco, Vertedor Milpa Alta et San Pedro Nexapa.

Tableau 5 : Valeurs minimales, moyennes et maximales des précipitations mensuelles, en millimètres

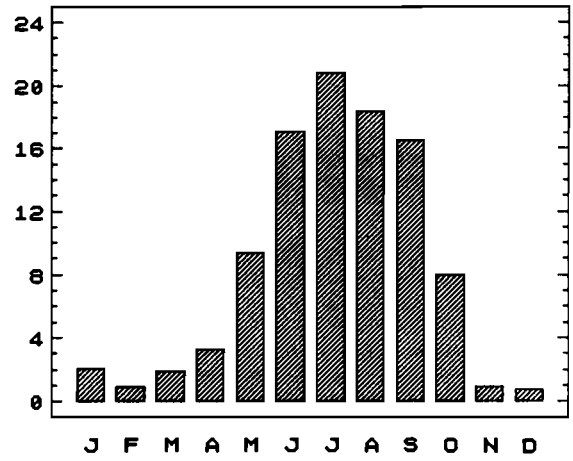
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
CHALCO (moy. ann. 626 mm)												
Min.	0	0	0	0	8	42	52	55	27	0	0	0
Moy.	11	7	13	25	53	109	136	123	93	44	7	6
Max.	91	26	61	73	164	213	206	190	181	119	21	33
VERTEDOR MILPA ALTA (moy. ann. 700 mm)												
Min.	0	0	0	0	8	56	85	53	21	1	0	0
Moy.	16	10	13	28	71	122	141	133	103	47	10	6
Max.	104	35	64	97	211	186	211	210	212	165	38	33
SAN PEDRO NEXAPA (moy. ann. 912 mm)												
Min.	0	0	0	0	21	95	50	76	84	14	0	0
Moy.	22	11	16	42	92	166	165	150	154	72	15	9
Max.	147	54	56	126	181	274	288	238	230	152	55	29

Fig.16 : Histogrammes des pluies mensuelles

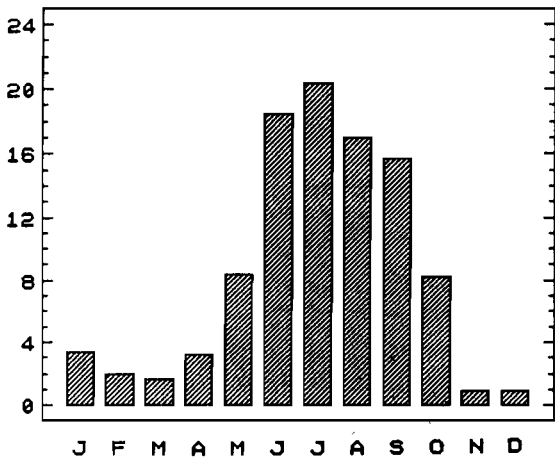
STATION COL. M. AVILA CAMACHO



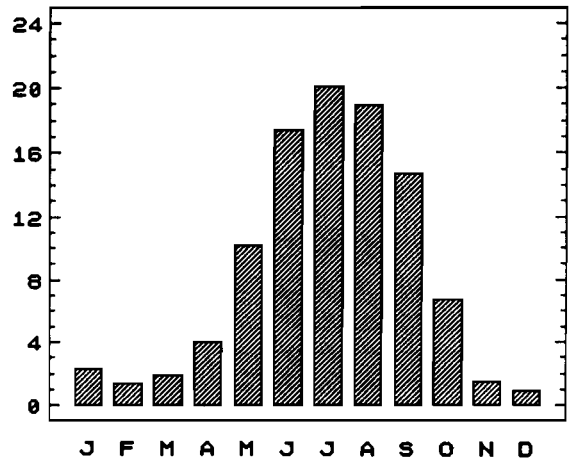
STATION TLAHUAC



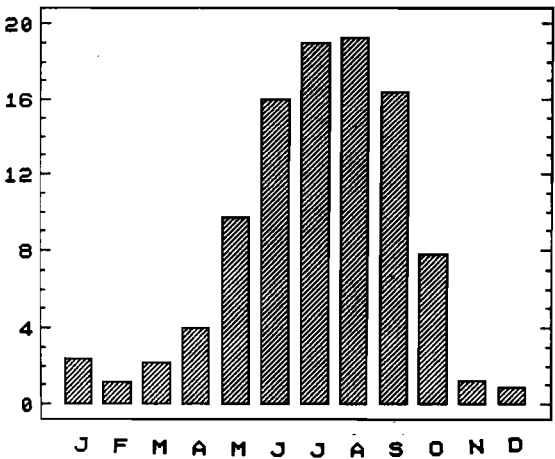
STATION SAN RAFAEL



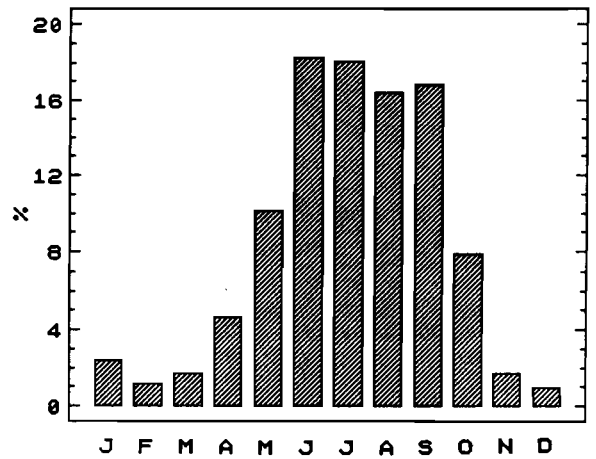
STATION VERTEDOR MILPA ALTA



STATION SAN LUIS AMECA II



STATION SAN PEDRO NEXAPA



II.1.5 Distributions des pluies journalières maximales

Les distributions des pluies journalières maximales ont été calculées à l'aide du logiciel DIXLOI, pour les deux plus longues chroniques disponibles, stations San Rafael et Milpa Alta. Les échantillons étudiés ont été constitués en prenant pour chaque année la valeur maximale journalière, soit 49 valeurs pour San Rafael, et 31 pour Milpa Alta.

Pour les deux stations, nous avons choisi la loi de Gumbel pour représenter les distributions des pluies journalières maximales (figure 17). Ces lois s'écrivent, en fréquence au non-dépassement F :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u))$$

avec $u = (x-45,8)/9,1$ pour San Rafael

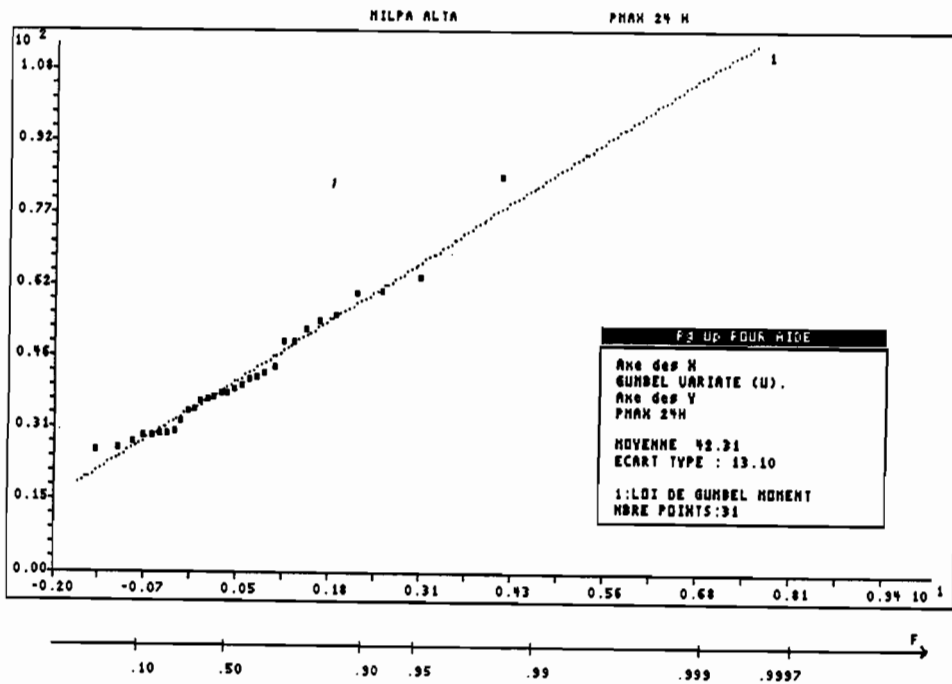
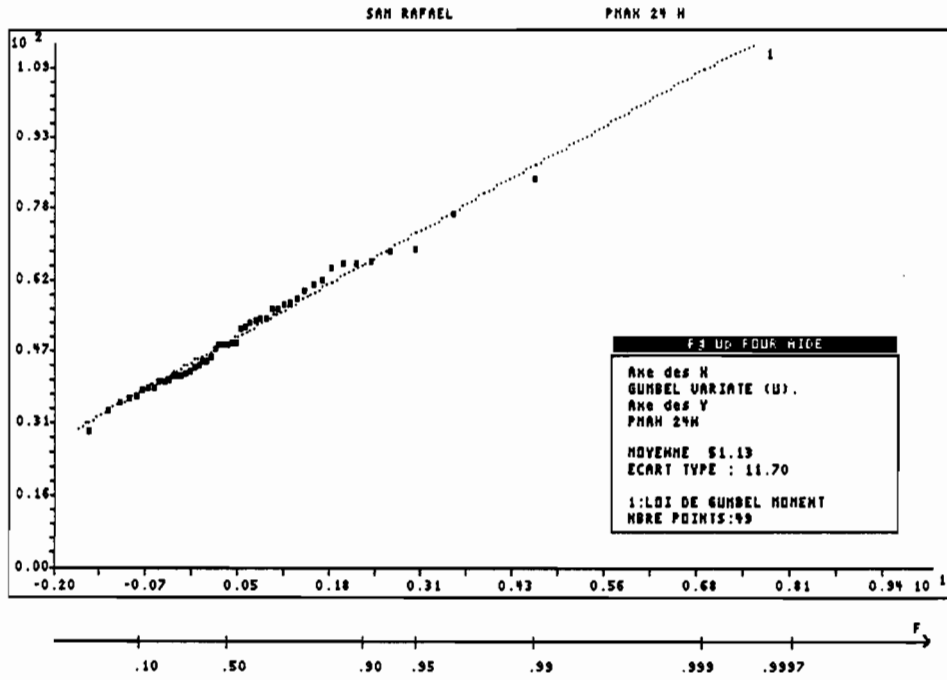
$(x-36,4)/10,2$ pour Milpa Alta

On trouvera dans le tableau 6 les quantiles estimés par ces distributions, ainsi que les intervalles de confiance à 90 %.

Tableau 6 : Quantiles et intervalles de confiance à 90 % de la loi de Gumbel pour les précipitations maximales journalières

Station	SAN RAFAEL			AMECAMECA		
	Pluie max 24h.	Intervalle de confiance Borne inf. Borne sup		Pluie max 24h.	Intervalle de Borne inf Borne sup	
5	59	55	64	52	46	58
10	66	61	72	59	51	67
20	73	67	80	67	57	77
50	81	72	91	76	63	89
100	88	77	98	83	68	99

Fig. 17 : Ajustements de la loi de Gumbel aux pluies maximales journalières



II.2 CLIMATOLOGIE

La station Vertedor Milpa Alta réunit un ensemble de 8 appareils de mesures climatiques : pluviomètre, pluviographe, thermomètre, évaporomètre, évapotranspiromètre, héliographe, hygromètre et anémomètre. Toutes les mesures sont effectuées au pas de temps journalier.

Les résultats obtenus à cette station, située au sud-ouest à une altitude de 2450 mètres, donnent une première évaluation des caractéristiques climatiques du bassin de Chalco. Compte tenu du relief important sur le bassin de Chalco et de ses effets probables sur la climatologie, il conviendra de compléter les informations qui suivent par une étude approfondie sur différents sites.

On trouvera dans le recueil en annexe les valeurs mensuelles de températures, évaporation, évapotranspiration, ensoleillement, hygrométrie, vitesses et directions des vents mesurés à cette station.

II.2.1 Températures (figure 18)

Les variations saisonnières moyennes sont comprises entre 12,7 °C, pour le mois de janvier, et 17,9 °C, pour le mois de mai. Dès le mois de juin, les températures décroissent sous l'effet de l'apparition des pluies, puis du cycle saisonnier de l'hémisphère nord.

Les températures moyennes annuelles varient entre 14,9 °C et 16,1 °C, sans qu'il semble possible de mettre en évidence une évolution particulière au cours de ces dernières années.

II.2.2 Ensoleillement (figure 19)

Au niveau mensuel, le maximum d'ensoleillement est obtenu au cours du mois de mars, avec un total moyen de 263 heures ; le minimum au mois de septembre, avec un total moyen de 141 heures. Annuellement, le nombre moyen d'heures d'ensoleillement varie de 2212 à 2553.

Fig. 18 : Variations températures - Station Vertedor M.A.

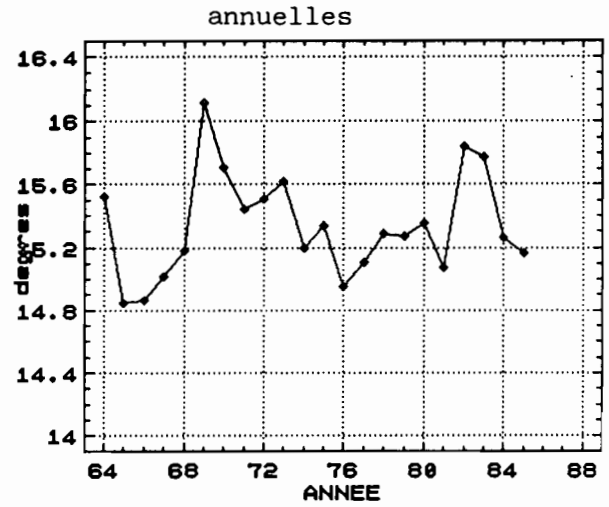
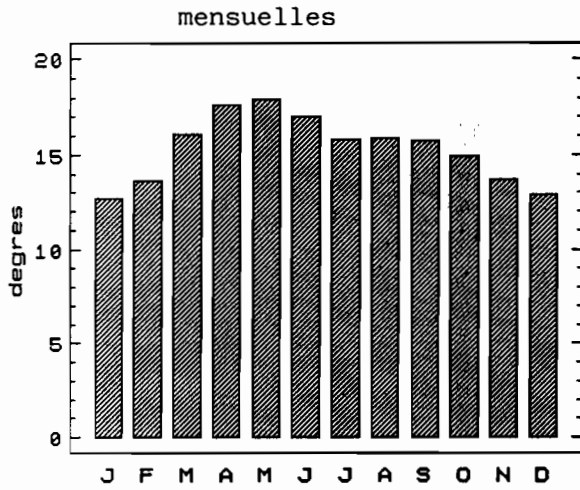


Fig. 19 : Variations ensoleillement - Station Vertedor M.A.

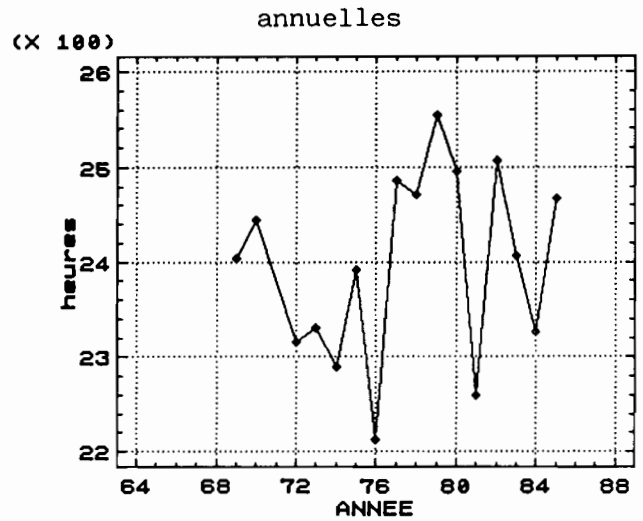
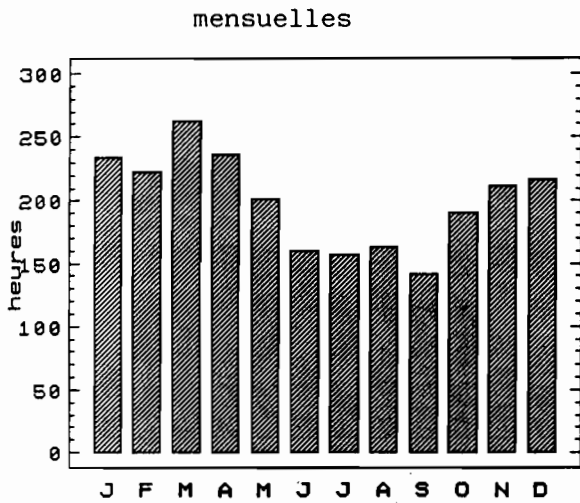
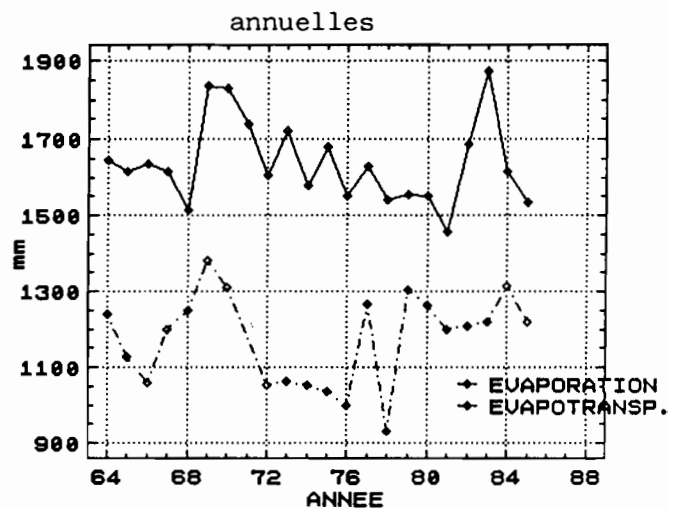
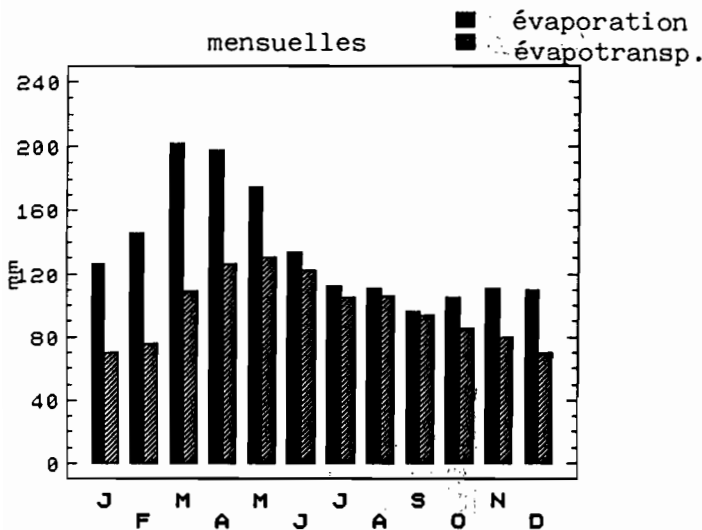


Fig. 20 : Variations évaporations et évapotranspirations - Vertedor M.A.



II.2.3 Evaporation et évapotranspiration (figure 20)

Les valeurs mensuelles d'évaporation, réalisées sur bac, varient en moyenne de 110,2 mm, pour le mois de septembre, à 201,8 mm, pour le mois de mars. En moyenne annuelle, les valeurs d'évaporation varient de 1454 à 1834 mm.

Les évapotranspirations mensuelles varient de 69,6 mm en moyenne au mois de janvier à 130,3 en moyenne au mois de mai. Les valeurs moyennes annuelles varient de 932 mm à 1380 mm.

L'évapotranspiration potentielle mesurée est en moyenne, à l'échelle annuelle, de 28 % inférieure à l'évaporation potentielle. Le rapport entre évaporation et évapotranspiration est cependant très variable au niveau mensuel, de l'ordre de 55 % au mois de janvier jusqu'à 92 % au mois de juin.

Le cycle saisonnier de l'évaporation est identique à celui de l'ensoleillement, alors que le cycle de l'évapotranspiration l'est à celui des températures.

II.2.4 Humidité relative

Les valeurs mensuelles d'humidités relatives varient en moyenne de 46 % au mois de mars à 70 % au mois de septembre. Les valeurs annuelles varient de 54 à 65 %. Le cycle saisonnier de l'humidité relative est identique à ceux de l'ensoleillement et de l'évapotranspiration.

II.2.5 Vents

A la station de Milpa Alta, donc sur le versant sud du bassin de Chalco, les directions du vent évoluent nettement au cours de l'année (tableau 7) : d'octobre à mai, les vents dominants viennent du SUD, puis s'établissent au NORD-EST au cours de la période pluvieuse de juin à septembre.

Les vitesses du vent (tab. 8) sont les plus élevées dans la période qui précède la période pluvieuse (février-mars-avril) ; elles diminuent ensuite jusqu'en décembre. Ces vitesses sont par ailleurs très faibles dans leur ensemble.

Tableau 7 : Répartition mensuelle de la direction d'origine du vent suivant 8 directions (en %) : moyenne interannuelle

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
N	0	5	5	5	9	18	9	14	5	10	0	5	7
NE	9	5	5	5	26	<u>23</u>	<u>36</u>	<u>27</u>	27	5	20	20	17
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	14	9	14	14	13	0	0	0	0	5	0	5	6
S	<u>59</u>	<u>59</u>	<u>59</u>	<u>55</u>	<u>39</u>	18	14	18	23	<u>30</u>	<u>60</u>	<u>55</u>	41
SW	5	5	18	18	4	9	9	5	18	10	10	10	10
W	9	5	0	0	0	14	9	18	14	10	0	0	7
NW	5	14	0	5	9	18	23	18	14	30	10	5	13

Tableau 8 : Vitesses du vent (en m/s) : moyennes interannuelles

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
Inter.	1,3	1,5	1,6	1,4	1,1	0,9	1,1	0,7	0,7	0,8	1,0	1,0	1,1

II.3 CONCLUSIONS

Précipitations :

Sur le bassin de Chalco, le régime de précipitations est caractérisé par :

- * des précipitations annuelles variant de 600 à plus de 1000 millimètres. Ces variations importantes dépendent de l'altitude d'une part, et d'autre part, pour une altitude donnée, de la localisation sur le bassin. Dans ce dernier cas, les précipitations augmentent suivant deux gradients circulaires périphériques, qui convergent vers l'est du bassin.
- * une période de pluie intense, de juin à septembre, regroupant environ 70 % du total pluviométrique annuel sur 4 mois de juin à septembre ;
- * des précipitations journalières ne dépassant guère 80 millimètres "une fois tous les 50 ans".

Climatologie (station Vertedor Milpa Alta) :

Evaporation, ensoleillement et humidité relative sont minimum en septembre (110 mm, 141 h et 46 %), et maximum en mars (202 mm, 263 h et 70 %), alors que évapotranspiration et température sont minimum en janvier (70 mm et 12,7°C) et maximum en mai (130 mm et 17,9°C). Les évapotranspirations potentielles ne sont que très légèrement inférieures aux évaporations potentielles de juin à septembre. Les vents dominants viennent du sud, sauf de juin à septembre où ils s'établissent au nord-est.

Séries chronologiques annuelles :

Les traitements effectués (sur 60 ans pour les précipitations et environ 30 ans pour les autres variables climatiques) ne montrent pas d'organisation particulière (cycle, tendance, persistance) des variables au cours du temps. En relation avec les modifications que connaît le bassin de Chalco depuis 1980, il est vrai que les données sont encore peu nombreuses pour caractériser un éventuel changement climatique. En ce qui concerne les précipitations, on surveillera néanmoins l'évolution de la période sèche actuelle, qui a débuté en 1982 et qui constitue la plus longue répétition d'un état donné - sec ou humide - observée à ce jour sur le bassin.

Recommandations :

En raison de la grande variabilité spatiale des précipitations sur le bassin, la couverture de pluviomètres et de pluviographes s'avère insuffisante pour obtenir une évaluation précise des précipitations. Il convient de compléter cette couverture, notamment dans les régions d'altitude élevée, supérieure à 3000 mètres. Il serait également souhaitable de mettre en place d'autres appareils sur la zone relativement démunie comprise entre Colonia Avila Camacho et San Rafael.

TROISIEME PARTIE

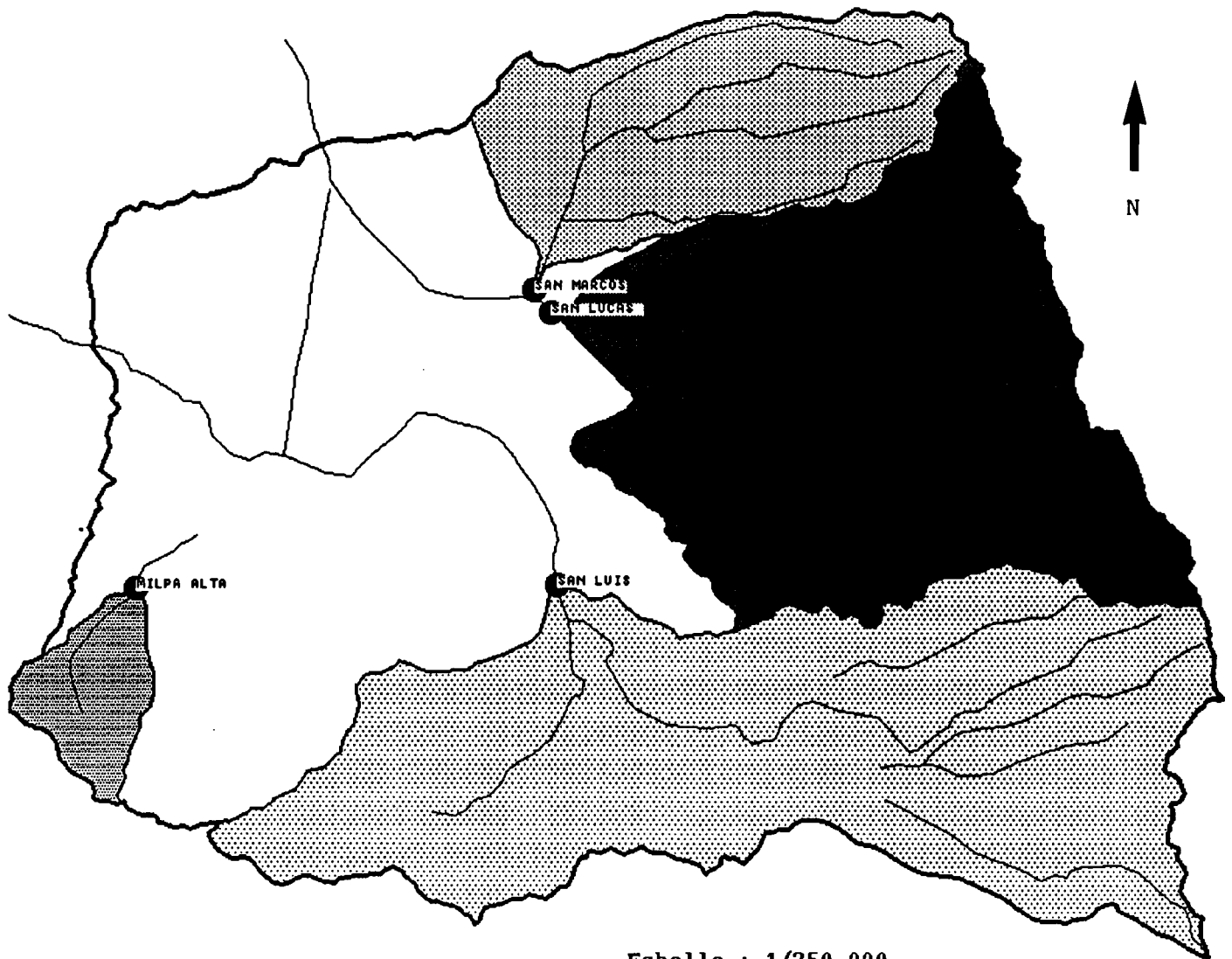
HYDROLOGIE DES SOUS-BASSINS

L'étude des régimes hydrologiques, présentée dans cette partie, porte sur les 4 sous-bassins - San Marcos, San Lucas, Milpa Alta et San Luis - installés par la Comisión Nacional del Agua.

La figure 21 montre la disposition de ces sous-bassins par rapport à la délimitation globale du bassin de Chalco. L'ensemble des superficies des 4 sous-bassins est égale à 778 km², ce qui représente 66 % du bassin de Chalco dans son ensemble, et 80 % de la partie du bassin de Chalco située à une altitude supérieure à 2300 m. On notera donc que, dans l'état actuel des données, la connaissance de l'hydrologie du bassin de Chalco porte principalement sur sa partie rurale. La zone de plaine, actuellement en cours d'urbanisation, est en fait un système hydrologique bien distinct, et doit avant d'être étudié faire l'objet de campagnes de mesures appropriées.

Nous décrirons successivement les caractéristiques physiques des bassins étudiés, puis, à l'aide des données fournies par la CNA, préciserons les caractéristiques de leurs régimes hydrologiques, à plusieurs échelles de temps : annuel, mensuel, journalier, inférieur à la journée. Nous nous intéresserons principalement aux distributions statistiques des débits, aux coefficients de ruissellement et aux formes des crues. Enfin, nous comparerons les caractéristiques hydrologiques de chacun des sous-bassins, et chercherons à interpréter les éventuelles différences à partir des caractéristiques géographiques ou climatiques de ces sous-bassins.

fig.21 : STATIONS HYDROMETRIQUES ET SOUS-BASSINS



Echelle : 1/250.000

III.1 HYDROLOGIE DES SOUS-BASSINS

III.1.1 Les données hydrométriques

1) Inventaire des données

Les données hydrométriques qui nous ont été remises par la Comisión Nacional del Agua, sont généralement les valeurs des cotes lues ou dépeignées à un pas de temps fixe d'une durée de une heure. Avec ces données ont été également remises les courbes d'étalonnage des stations, permettant de transformer les cotes en débits. Dans certains cas, les données remises se sont limitées à des valeurs de débits instantanés, dépeignées à un pas de temps fixe d'une heure.

Le tableau 9 indique les principales caractéristiques des stations :

*** Tableau 9 ***

LISTA DE LAS ESTACIONES HIDROMETRICAS
INVENTARIO (RED Y CUENCAS REPRESENTATIVAS)

País : MEXICO

Estación	Río	Latitud I grad min seg	Longitud I grad min seg	Alt. I	Sup. I (km ²)	Períodos I de I I Informacón
2571010801 SAN MARCOS	R. San Francisco	+19 17 26	-098 52 42	2240	122.6	11964 / 1985
2571010802 SAN LUCAS	R. Compania	+19 17 05	-098 52 24	2240	290.2	11959 / 1980
2571010803 VERTEADOR MILPA ALTA	R. Milpa Alta	+19 11 05	-099 01 15	2450	26.5	11984 / 1985
2571010804 SAN LUIS II	R. Amecameca	+19 11 02	-099 52 12	2280	338.1	11962 / 1984

Les données remises ont été traitées avec le système HYDROM (ORSTOM, 1989c). On consultera en annexe de ce rapport le recueil des données rassemblées, comprenant pour l'hydrométrie :

- * la liste des stations hydrométriques,
- * l'inventaire des débits instantanés, pour chaque station (le code D qui apparaît dans les tableaux signifie que les cotes horaires et les étalonnages correspondants, ne sont pas actuellement disponibles, et que les débits nous ont été remis déjà calculés),
- * un exemple d'impression des débits instantanés, (pour la station San Lucas, année 1967),
- * la liste des débits moyens journaliers, pour chaque station,

- * la liste des débits moyens mensuels et annuels, pour chaque station,
- * la liste des débits extrêmes et caractéristiques, pour chaque station.

2) Commentaires sur les données hydrométriques

Les traitements présentés dans cette étude sont réalisés sur la base des données transmises en l'état par la Comisión Nacional del Agua. On soulignera d'abord l'intérêt de disposer de longues chroniques importantes de débits instantanés. Il faut cependant prendre en compte les facteurs suivants, qui peuvent altérer la qualité des données :

- * le mode de dépouillement utilisé, à pas de temps horaire fixe, induit une certaine imprécision sur la détermination des hydrogrammes réels (calcul des volumes écoulés, débit de pointe de crue etc..),
- * les courbes d'étalonnage nous ont été communiquées sans les jaugeages correspondants : on devra s'assurer que les jaugeages sont cohérents et en nombre suffisant pour établir un étalonnage robuste.
- * enfin, sur les 4 bassins cités précédemment, les données remises pour le bassin vertedor Milpa Alta sont trop peu nombreuses pour être analysées. Nous ne retiendrons en définitive que les 3 sous-bassins- San Marcos, San Lucas et San Luis - pour l'étude hydrologique.

III.1.2 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique classique consiste à préciser à l'échelle de l'année la répartition de la lame d'eau précipitée en divers constituants tels que :

- * écoulement à l'exutoire du bassin (avec éventuellement séparation de l'écoulement dit "rapide" ou "superficiel" de l'écoulement dit "retardé" ou "sub-surfacique"),
- * retour de l'eau à l'atmosphère par prise évaporatoire, à la surface de nappes d'eau libres ou par évapotranspiration végétale,
- * alimentation des nappes souterraines par infiltration.

Pour notre part, nous nous limiterons à indiquer la part représentée par l'écoulement observé à l'exutoire de chaque bassin. Nous avons calculé dans ce but un coefficient moyen d'écoulement sur la durée totale d'observation des stations : ce calcul fait intervenir pour chaque bassin la pluie moyenne d'une part, et le volume moyen écoulé à l'exutoire d'autre part.

1) Calcul de la pluie moyenne reçue par chaque bassin

La carte des isohyètes annuelles moyennes dessinée au paragraphe II.1.2 permet de calculer les valeurs des pluies moyennes reçues annuellement sur chaque sous-bassin. Ces valeurs sont :

715 millimètres pour le bassin San Marcos,
885 millimètres pour le bassin San Lucas,
907 millimètres pour le bassin San Luis.

2) Calcul des écoulements annuels moyens

Les valeurs moyennes des écoulements annuels observés sont respectivement 58 l/s, 197 l/s et 165 l/s pour les bassins San Marcos (123 km²), San Lucas (290 km²) et San Luis (338 km²). En termes de débits spécifiques (débits rapportés à l'unité de surface), les écoulements annuels sont en moyenne de l'ordre de 0,47 l/s/km², 0,68 l/s/km² et 0,49 l/s/km².

3) Coefficients d'écoulement annuels moyens

Les coefficients d'écoulement annuels moyens calculés à partir des valeurs précédentes sont respectivement égaux à 2,1 %, 2,4 % et 1,7 % pour San Marcos, San Lucas et San Luis.

On constate donc que, pour chacun des bassins, la part de l'écoulement superficiel est extrêmement réduite dans le bilan hydrologique, et que reprise évaporatoire et infiltration sont largement prépondérants.

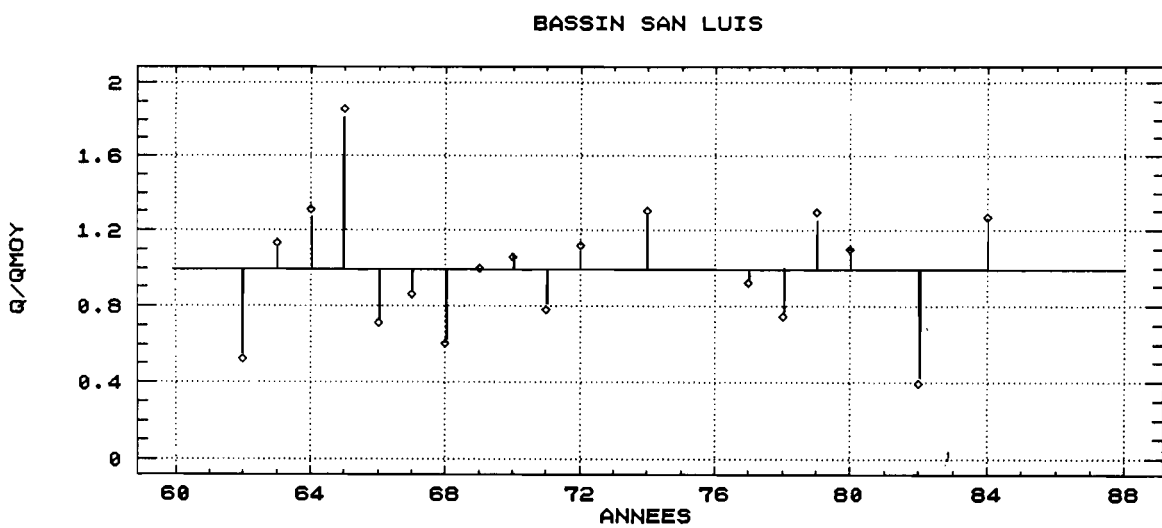
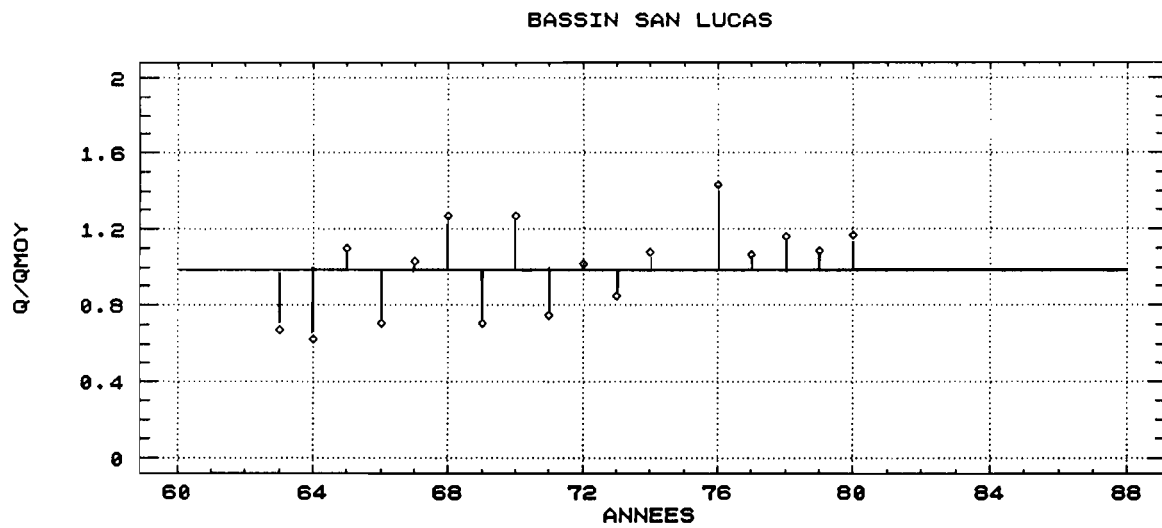
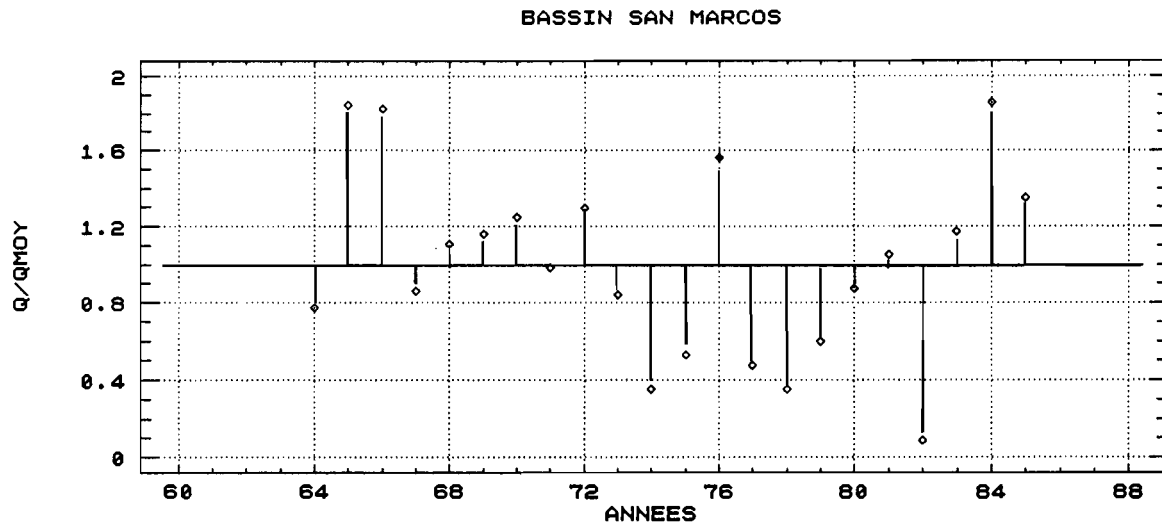
Ceci étant, les écoulements superficiels ne doivent pas être négligés pour autant. Leur connaissance précise - en termes de volumes, et surtout de crues - représente un enjeu important dans plusieurs domaines, comme la protection de zones de plaines contre les inondations, les possibilités d'irrigation et plus généralement, tout problème d'aménagement et d'infrastructure (construction de buses, de ponts, de retenues etc..).

III.1.3 Analyse chronologique des écoulements annuels

Disposant de chroniques de débit portant sur environ 20 ans pour les 3 bassins, il est intéressant d'examiner la variabilité dans le temps de ces écoulements, et, le cas échéant de mettre en rapport d'éventuelles modifications avec l'évolution du milieu

La figure 22 représente les variations dans le temps sur chacun des bassins des modules observés Q (débits moyens annuels), rapportés au module moyen Q_{moy} calculé sur l'ensemble de la période d'observation :

Fig. 22 : Variations chronologiques des écoulements annuels



* il semble difficile de détecter une éventuelle organisation chronologique des modules, en termes de tendance, de cycle, voire de persistance. On remarquera surtout que les variations ne concordent pas sur les bassins : ainsi, sur la période 1977-1980, on enregistre 4 années déficitaires (en termes de modules) pour San Marcos, 4 années excédentaires pour San Lucas et un partage de 2 années déficitaires et 2 années excédentaires pour San Luis !

* pour la période récente correspondant au début de l'urbanisation de la plaine de Chalco, à partir de 1980, nous ne disposons au plus que de 6 années continues d'observations sur le bassin San Marcos. On notera que sur ce bassin, les 3 derniers modules observés sont excédentaires, alors que dans le même temps, les précipitations sont déficitaires (voir II.1.3). L'augmentation des écoulements peut avoir diverses origines : la qualité des données, des modifications portant sur la délimitation du bassin - du à un éventuel aménagement -, ou sur la structure des sols et/ou leur utilisation. Pour cette dernière hypothèse, un suivi de l'occupation des sols au cours des 15 dernières années donnerait de plus amples informations.

III.1.4 Analyse des crues

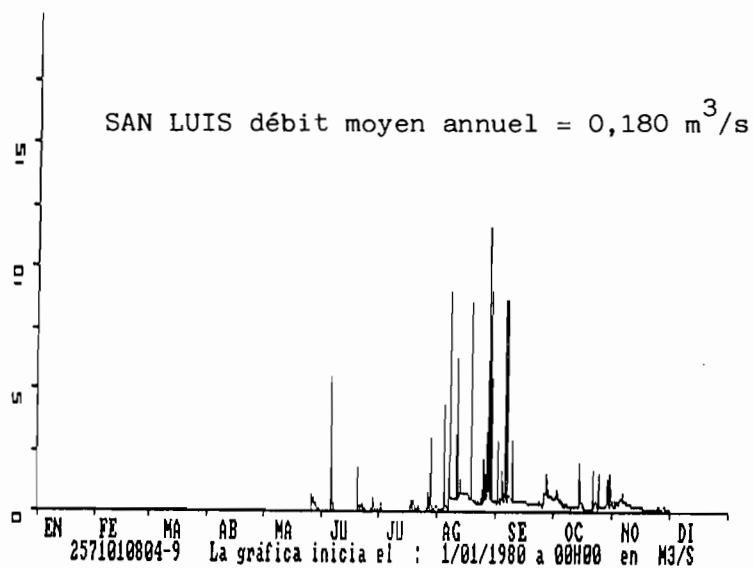
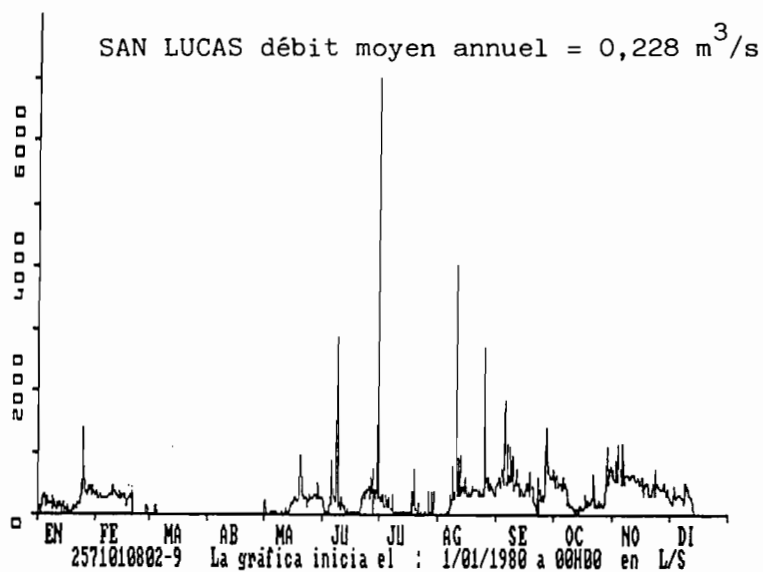
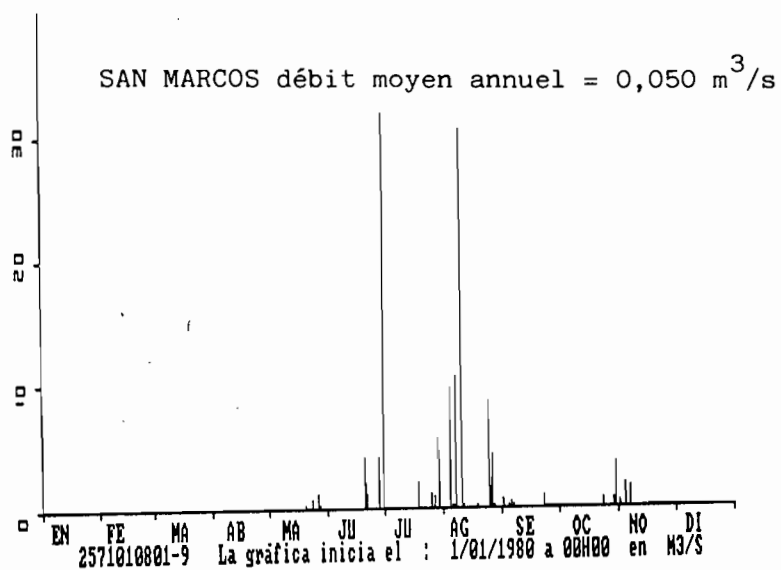
La figure 23 montre l'organisation des écoulements pour chacun des bassins et pour une année choisie, 1980. Les 3 bassins se différencient par l'existence plus ou moins marquée d'un débit de base correspondant à la vidange lente du réservoir sub-surfacique : négligeable pour le bassin San Marcos, pour lequel l'écoulement à l'exutoire est essentiellement constitué de ruissellement superficiel rapide ; important au contraire pour le bassin San Lucas ; moyen pour le bassin San Luis.

Nous avons par ailleurs sélectionné pour chaque bassin les crues correspondants aux 3 plus forts débits instantanés annuels. Le tableau 10 résume les caractéristiques principales de ces crues : Q_{max} , débit de pointe de crue, L_r , lame écoulée, T_m , temps de montée de la crue, et T_c , temps caractéristique d'écoulement, qui correspond à la durée pendant laquelle le débit reste supérieur à la moitié du débit de pointe Q_{max} . La figure 24 représente les crues les plus fortes sur chaque bassin.

Les caractéristiques des crues appellent les commentaires suivants :

1) les temps de montée des crues observées sur les bassins San Marcos et San Luis seraient voisins de une heure, qui est le pas de temps fixe choisi pour le dépouillement des limnigrammes. En fait, ces temps de montée sur ces bassins sont manifestement inférieurs à une heure : il en résulte que les débits de pointe de crue, comme les volumes écoulés, risquent d'être sous-estimés sur ces bassins. Il faudra revenir aux diagrammes originaux pour corriger cette sous-estimation.

Figure 23 : Ecoulements observés sur les 3 sous-bassins en 1980



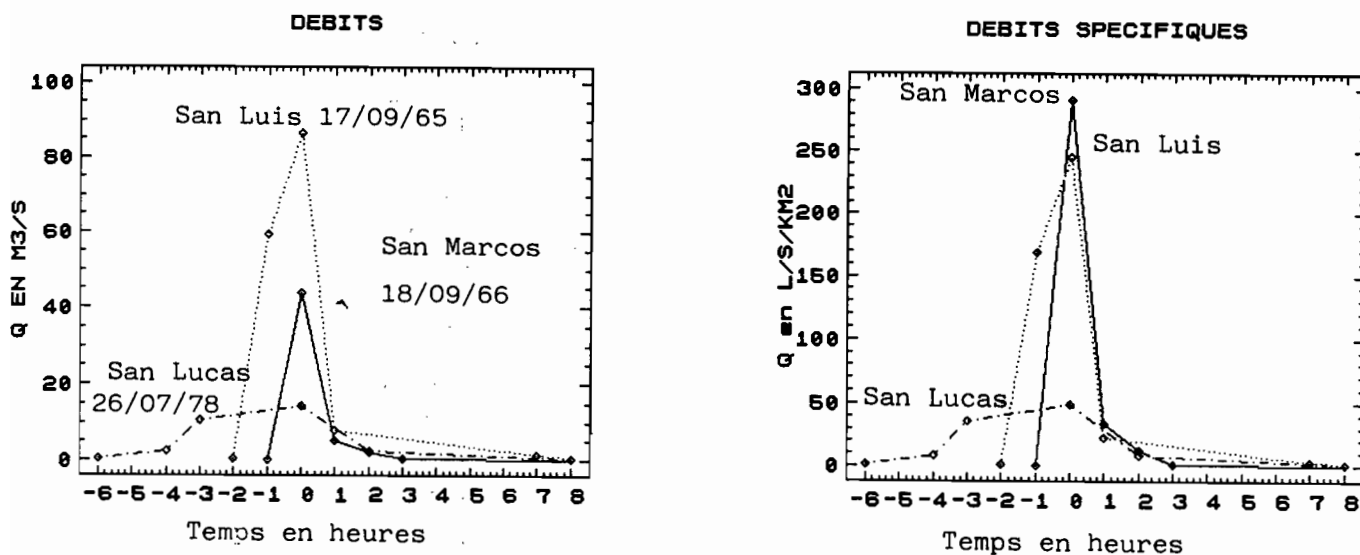
2) pour le bassin San Lucas, qui se différencie déjà des deux autres bassins par l'existence d'un débit de base abondant, les hydrogrammes observés sont nettement plus plats que ceux des bassins San Marcos et San Luis. En revanche, les formes de crues identifiées sur ces derniers bassins sont semblables, avec des temps de montée et temps caractéristiques en rapport avec les superficies respectives de ces bassins.

3) les coefficients d'écoulement associés à ces événements restent faibles. Compte tenu de la difficulté d'estimer les hauteurs moyennes des averses sur ces sous-bassins, une évaluation grossière les situe entre 2 et 5 %.

Tableau 10 : Caractéristiques des plus grosses crues observées sur les 3 sous-bassins

Bassin	Date	Qmax m ³ /s	Lr mm	Tm mn	Tc mn
SAN MARCOS	18/09/66	43,9	1,3	60	70
	01/09/73	35,3	1,4	60	80
	30/06/80	31,8	2,4	60	180
SAN LUCAS	26/07/78	14,4	0,9	300	300
	26/07/77	12,7	0,3	180	120
	21/08/76	11,9	0,4	120	160
SAN LUIS	27/09/65	86,6	1,8	120	110
	07/07/64	71,0	0,9	60	70
	31/08/69	38,7	0,5	60	70

Fig. 24 : Les plus fortes crues observées (débits de pointe maximum)



III.1.5 Distributions statistiques des valeurs de débits

Pour chacun des bassins, les valeurs que nous avons analysées sont :

- * les écoulements moyens annuels (modules),
- * les débits journaliers maxima, un pour chaque année de mesures,
- * les débits instantanés maxima, un pour chaque année de mesures.

Pour chacune de ces variables et chacune des stations, les ajustements fournis par la loi de Goodrich sont ceux qui conviennent le mieux. Cette loi s'écrit, en fréquence au non-dépassement F :

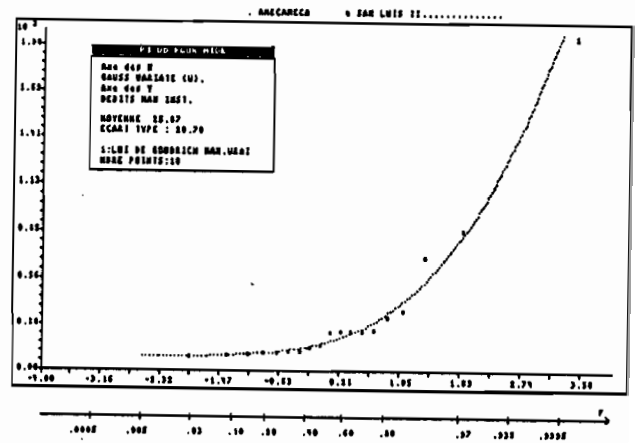
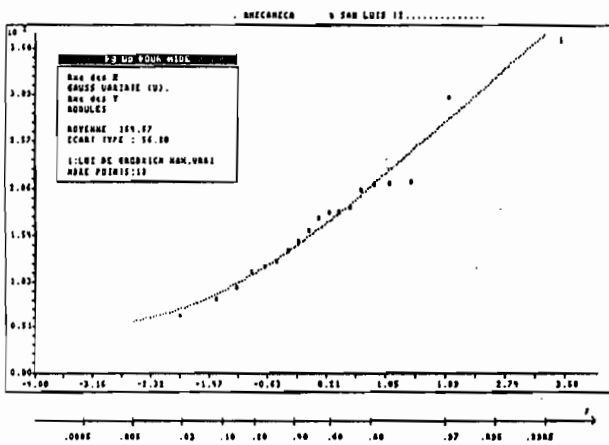
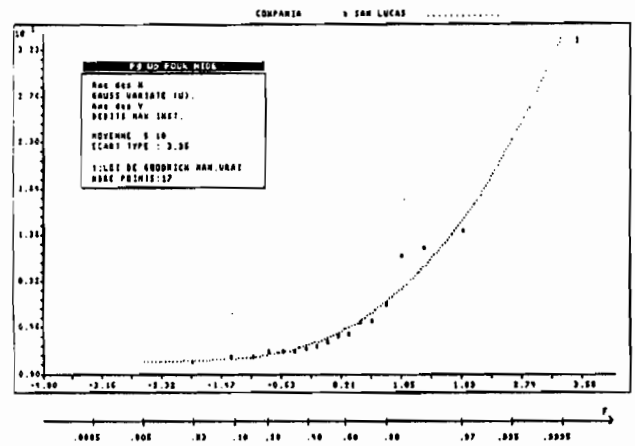
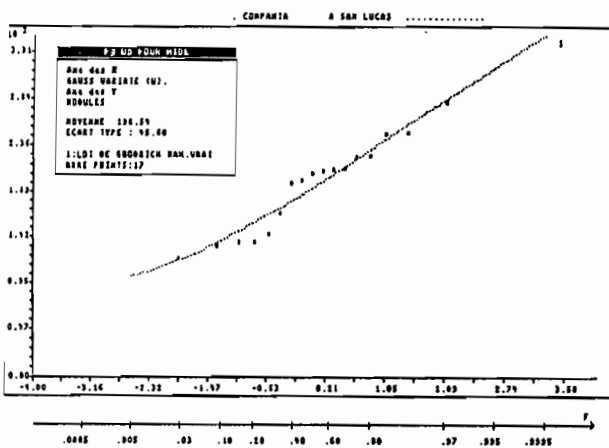
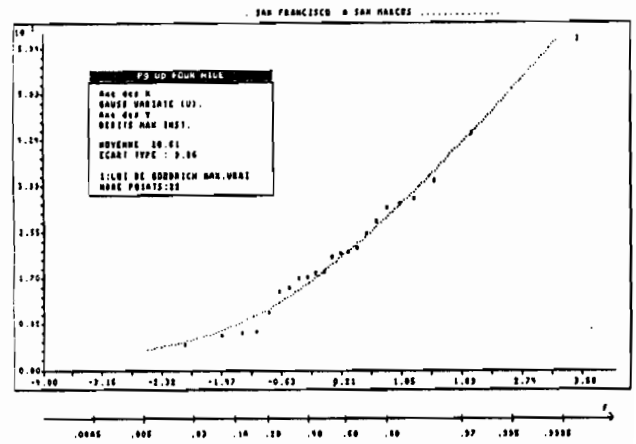
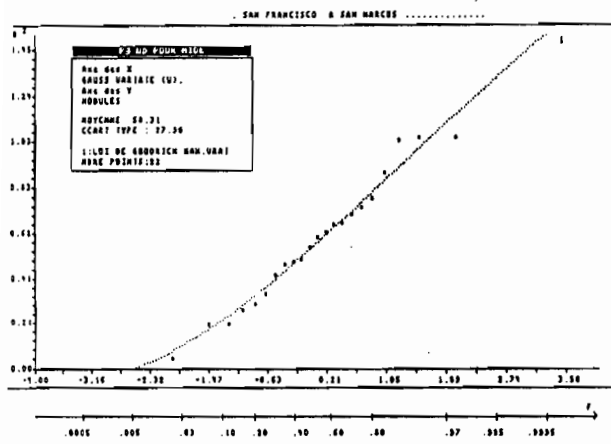
$$F(x) = 1 - \exp(-u^{1/\delta}), \text{ avec } u = (x-x_0)/s,$$

où x_0 , s et δ sont respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme (tableau 12). On trouvera dans le tableau 11 les principales caractéristiques de ces distributions, ainsi que les intervalles de confiance à 90 % des quantiles associés à ces distributions. La figure 25 représente les ajustements obtenus.

Tableau 11 : Quantiles et intervalles de confiance des lois de Goodrich ajustées aux échantillons de débits

	BASSIN SAN MARCOS			BASSIN SAN LUCAS			BASSIN SAN LUIS		
	I.C. 90%			I.C. 90%			I.C. 90%		
		B. inf.	B. sup.		B. inf.	B. sup.		B. inf.	B. sup.
Modules(l/s)									
Moy.	58,3			196,6			165		
E.T.	27,8			45,6					
Q-(50)	7,5	5,1	9,9	114	110	119	69	65	73
Q-(10)	23,0	18,6	27,4	140	132	148	95	86	103
Q+(10)	95,0	81,3	108	256	231	281	241	207	275
Q+(50)	117	101	134	292	262	323	294	250	337
Débits max. journaliers (m³/s)									
Moy.	2,6			1,3			2,9		
E.T.	1,4			0,6			1,5		
Q+(10)	4,5	3,6	5,4	2,2	nc	nc	5,0	3,4	6,7
Q+(50)	6,1	4,8	7,4	3,2	nc	nc	7,6	4,5	10,7
Débits max. instantanés (m³/s)									
Moy.	20,6			5,1			25,9		
E.T.	9,9			4,0			20,7		
Q+(10)	34,3	28,3	40,2	10,3	6,4	14,1	51,5	29,4	73,5
Q+(50)	44,7	36,8	52,7	17,2	10,2	24,3	93,5	50,1	137

Fig. 25 : Ajustements de la loi de Goodrich aux débits annuels, journaliers et instantanés



On retrouve les distinctions entre les bassins : San Lucas est celui qui fournit l'écoulement le plus important, mais en revanche, les débits journaliers et instantanés sont nettement plus élevés sur les deux autres bassins, conséquence des mécanismes de crue que nous avons identifié au paragraphe précédent.

Les valeurs présentées dans ce tableau pourront servir aux aménageurs qui souhaitent calculer les dimensions d'ouvrages tels que canaux, digues ou retenues, ou en relation avec l'irrigation. On retiendra cependant que les débits sont probablement sous-estimés à cause du mode de dépouillement choisi.

Tableau 12 : Paramètres de la loi de Goodrich pour chaque échantillon de débits

	SAN MARCOS			SAN LUCAS			SAN LUIS		
	ech.	pos.	for.	ech.	pos.	for.	ech.	pos.	for.
Débits annuels (en l/s)	78,2	-11,2	0,37	126,1	84,7	0,37	132,4	47,1	0,46
Débits journaliers (en m ³ /s)	2,5	0,3	0,62	0,6	0,7	1,0	1,6	1,4	1,0
Débits journaliers (en m ³ /s)	20,1	2,7	0,54	3,6	1,3	1,1	14,3	9,3	1,3

III.1.6 Répartition mensuelle des écoulements

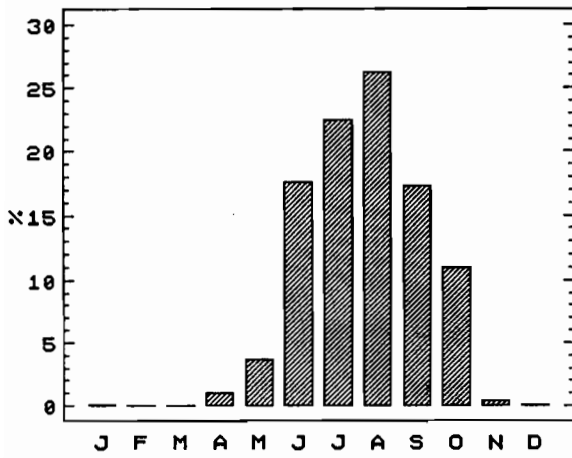
Les histogrammes des écoulements moyens mensuels sont représentés pour chaque bassin sur la figure 26. On observera que :

- * les écoulements sont très faibles, voire nuls, pendant au moins quatre mois de l'année pour chacun des bassins,
- * le cycle saisonnier de l'écoulement est nettement marqué avec un maximum en août ou septembre, puis une décroissance des débits jusqu'à un minimum quasiment nul atteint en mars pour chacun des bassins, avant la reprise de l'écoulement en avril.

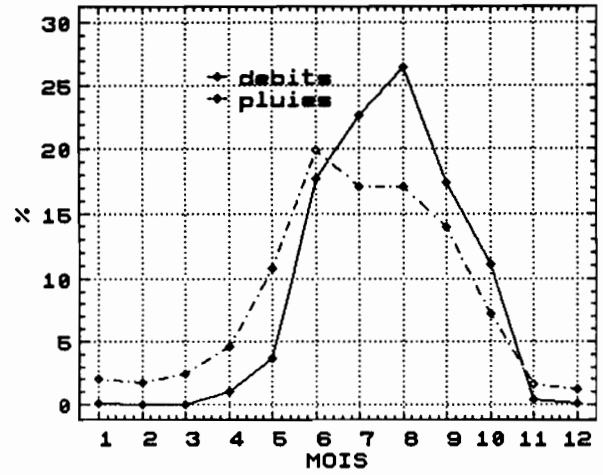
Sur la même figure, nous avons représenté sur la droite la comparaison entre les cycles saisonniers des précipitations et des écoulements. On notera les décalages existants entre les deux cycles, montrant qu'à une première phase de recharge du stock souterrain succède une deuxième phase de vidange de ce stock. On vérifiera également que la quantité d'écoulement impliquée dans ces deux phases est manifestement plus élevée pour le bassin San Lucas que pour les deux autres.

Fig. 26 : Histogrammes des écoulements mensuels

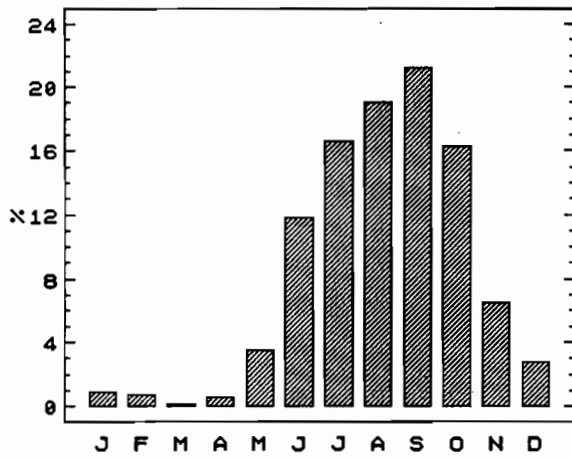
BASSIN SAN MARCOS



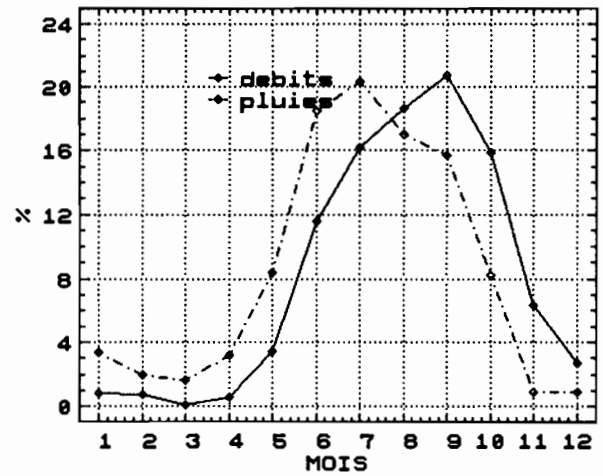
BASSIN SAN MARCOS / ST. AVILA CAMACHO



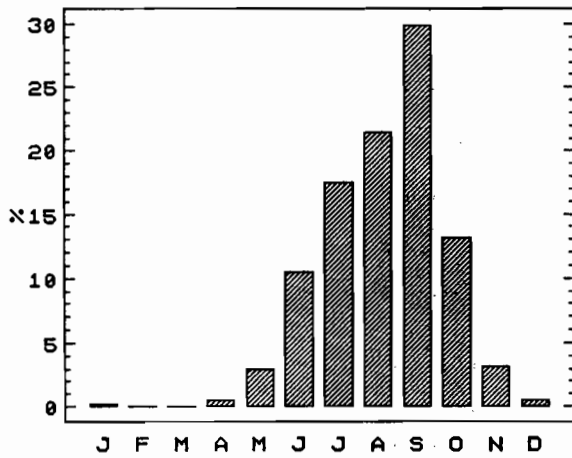
BASSIN SAN LUCAS



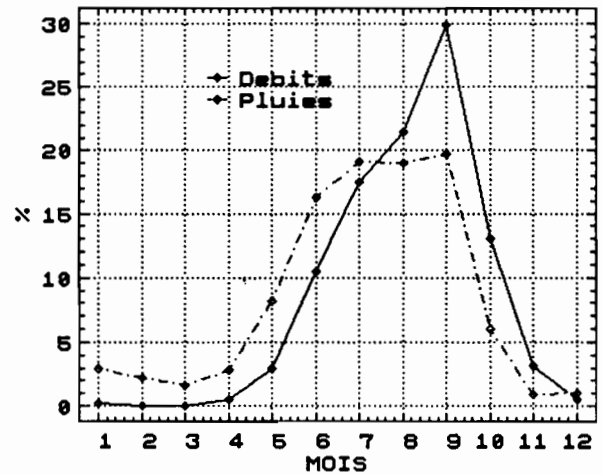
BASSIN SAN LUCAS / ST. SAN RAFAEL



BASSIN SAN LUIS



BASSIN SAN LUIS / ST. AMECAMECA



III.3.7 Conclusions

Malgré des réserves concernant la précision des données, plusieurs résultats peuvent être considérés comme étant significatifs :

l'écoulement superficiel représente une part très faible du bilan hydrologique sur chacun des sous-bassins étudiés. Les calculs effectués montrent que les écoulements annuels moyens ne dépassent pas 2 ou 3 % des précipitations reçues sur chaque bassin. En tenant compte d'une éventuelle sous-estimation dans le calcul des écoulements, ces coefficients ne semblent pas devoir dépasser 5 %.

les comportements des sous-bassins sont cependant assez différents. Deux types s'opposent : le premier représenté par les bassins San Marcos et San Luis, pour lesquels les crues sont essentiellement dues à des écoulements superficiels "rapides", le stockage et la vidange des réservoirs sub-surface sont faibles ; le second, représenté par le bassin San Lucas, pour lequel au contraire l'écoulement sub-surface constitue l'apport principal à l'exutoire du bassin. Les crues sur ce bassin sont donc beaucoup plus plates que sur les bassins voisins, et les débits maximum moins élevés.

En matière d'aménagement, ces différences revêtent un grand intérêt pour le dimensionnement des ouvrages d'art (ponts, canaux, retenues ...), dont les proportions et les coûts peuvent ainsi varier considérablement d'un endroit à l'autre. Les ajustements statistiques présentés dans cette partie de l'étude fournissent des valeurs de débits annuels, journaliers, instantanés - pour différentes périodes de retour - qui contribueront à la résolution de ces problèmes d'aménagement.

On pourra utiliser ces résultats pour d'autres bassins comparables, situés sur les versants de la vallée de Mexico, ou des vallées voisines de Cuernavaca, Puebla et Toluca, voire de l'Altiplano mexicain. Il est donc important de décrire les caractéristiques géographiques des sous-bassins étudiés, et d'analyser dans quelle mesure ces caractéristiques influencent les écoulements. Nous donnons dans la partie suivante quelques éléments permettant d'établir la représentativité des bassins étudiés et des résultats obtenus concernant leurs régimes hydrologiques.

III.2 GEOGRAPHIE DES SOUS-BASSINS

Le bassin San Lucas se distingue des bassins San Marcos et San Luis par des formes de crues aplaties, des débits de pointe de crue faibles, des écoulements d'origine essentiellement sub-surfacique, et en définitive un coefficient de ruissellement supérieur.

En fonction de l'information géographique que nous avons réunie, nous chercherons à expliquer l'origine de ces différences hydrologiques. Nous examinerons en particulier l'influence de la topographie et de la morphométrie sur les formes de crues ; celle de la pédologie et de l'occupation des sols sur les volumes écoulés.

III.2.1 Topographie et drainage

Pour l'étude du relief sur les sous-bassins, nous avons utilisé le logiciel LAMONT (ORSTOM, 1990), logiciel d'analyse de Modèles Numériques de Terrain. LAMONT permet de constituer, pour un ensemble de mailles carrées de côté égal au pas du MNT - dans notre cas, 250 mètres-, des fichiers de variables :

- * géomorphométriques : altitudes, pentes, orientations, convexités, encaissements ;
- * géomorphologiques : plans horizontaux, dépressions, vallées, versants, sommets, crêtes ;
- * hydrologiques : directions de drainage, détermination de bassins versants ;
- * hydrométriques : longueurs de drainage, surfaces drainées, distances à l'exutoire, indices de compacité, indices de Kirkby.

Un premier ensemble d'indicateurs résume les caractéristiques topographiques et morphométriques des sous-bassins (tab 13). La figure 27 indique également les différentes relations entre altitudes et superficies sur ces bassins.

Tableau 13 : Caractéristiques géomorphométriques des sous-bassins

	San Marcos	San Lucas	San Luis
Superficie S (en km ²)	122,6	290,2	338,1
Longueur du drain le plus long L (en km)	27,8	34,5	30,8
Indice de compacité S/L (en km)	4,4	8,4	10,8
Pente moyenne le long du drain le plus long (en %)	6,1	8,0	5,1

Fig 27 : Relations altitudes/superficies

(X 100)

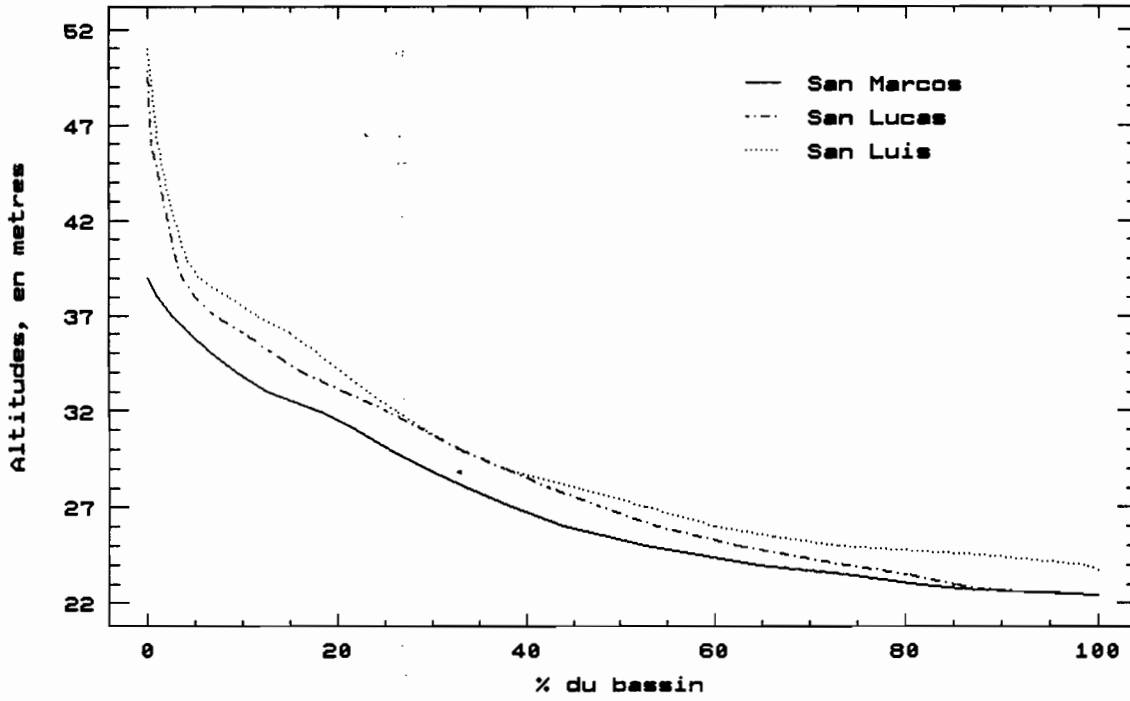
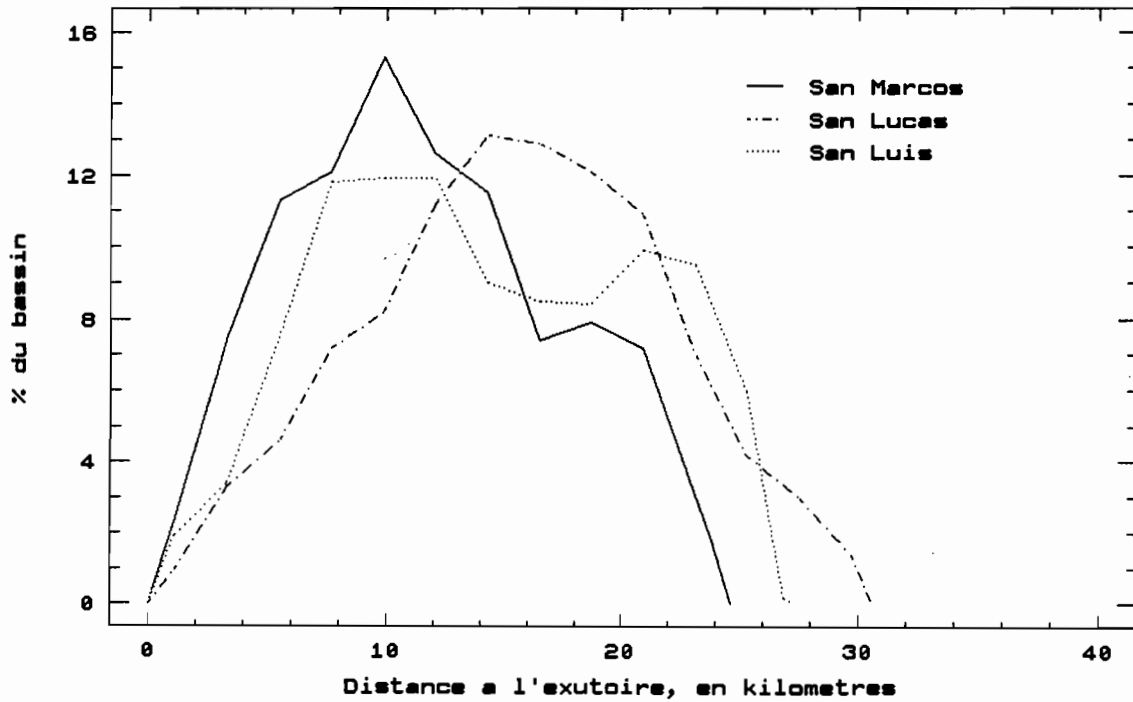


Fig 28 : Distances a l'exutoire/ Aires



Les différences entre les formes de crues observées sur les sous-bassins (voir fig. 24) peuvent être reliées à la longueur du drain le plus long. Les autres indicateurs, notamment pentes et compacités, ne peuvent être interprétés dans le sens de ces différences.

Plus que sur ces indicateurs globaux, dont la signification est d'autant plus limitée que la zone étudiée est tourmentée, il semble préférable de bâtir l'analyse des formes de crue sur des indicateurs capables d'intégrer la distribution spatiale des caractéristiques topographiques et morphométriques de l'ensemble. A l'aide du MNT du bassin de Chalco, nous avons ainsi représenté pour chaque sous-bassin la relation entre distances à l'exutoire et superficies (fig. 28). Ces relations permettent, à partir de considérations uniquement métriques, de construire un hydrogramme synthétique sur chacun des bassins. En supposant que les vitesses d'écoulement soient uniformes en chaque point des sous-bassins(*), les hydrogrammes ainsi construits caractérisent la zonification isochrone de chaque bassin, et, ce faisant, peuvent être comparés à des hydrogrammes de crue.

On retrouve alors dans la comparaison de ces "hydrogrammes" quelques caractéristiques de propagation des crues apparues au paragraphe III.1 : similitudes entre San Marcos et San Luis concernant les temps de montée des crues, étalement plus important dans le temps des crues sur San Lucas.

En conclusion, il semble donc possible de relier, au moins en partie, les différences concernant les formes des crues observées sur les bassins à leurs caractéristiques morphométriques et topographiques propres. Pour ce faire, des indicateurs globaux - comme ceux qui apparaissent dans le tableau 13 - restent trop limités. Il faut donc rechercher des indicateurs plus détaillés pour donner une définition plus réaliste et plus objective du réseau de drainage. L'analyse des Modèles Numériques de Terrain contribuera à trouver ces indicateurs, dont la relation entre distance à l'exutoire et superficie constitue une ébauche. Un axe de recherche consiste par exemple à déterminer l'hydrogramme unitaire d'un bassin non seulement à partir de la distribution spatiale des distances à l'exutoire, mais également à partir des distributions des pentes, des perméabilités et des rugosités sur le bassin.

III.2.2 Pédologie et occupation des sols

Les sous-bassins sont essentiellement différenciés par leurs caractéristiques pédologiques, alors que l'occupation des sols y est relativement semblable (fig. 29, 30 et 31) :

(*) approximation grossière qui ne prend pas en compte les effets d'amortissement des crues, les différences de pentes, de rugosités...

Fig 29 : Histogrammes unites pedologiques

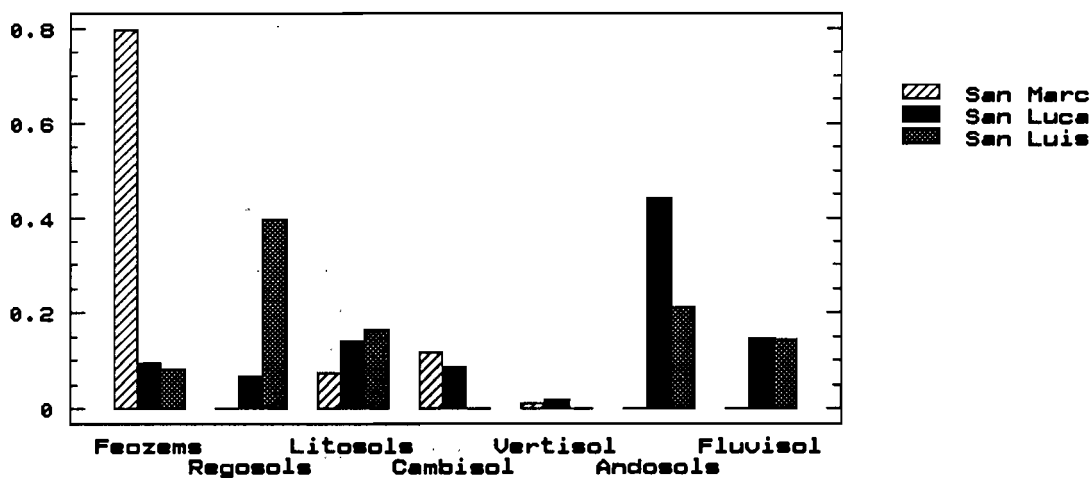


Fig 30 : Histogrammes classes texturales

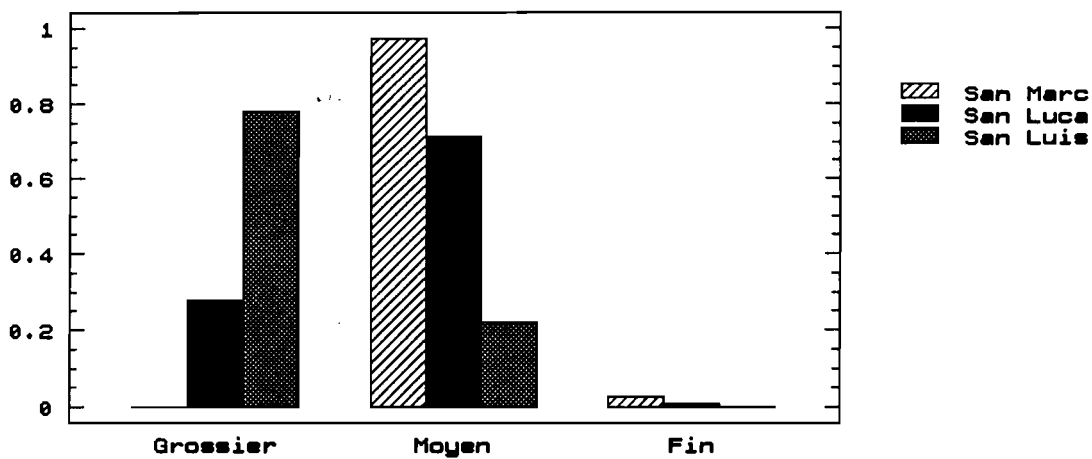
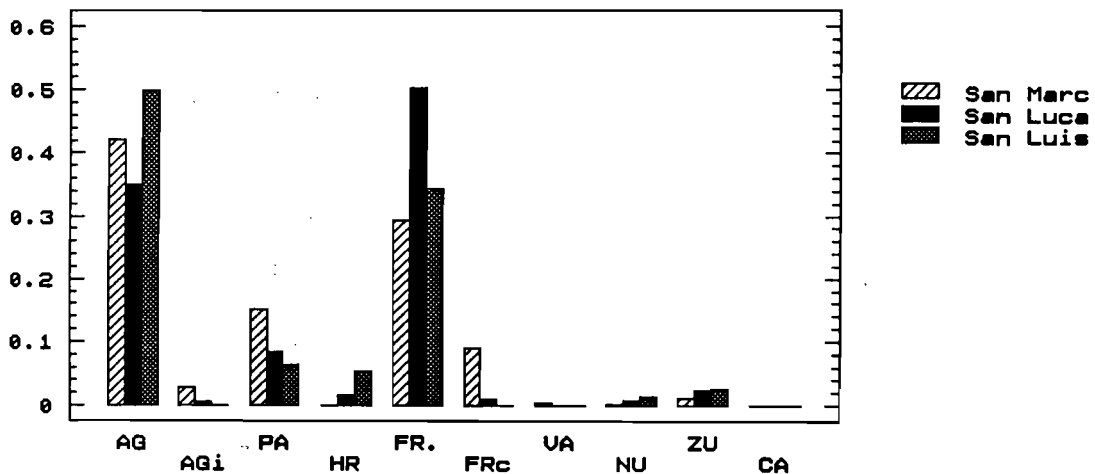


Fig 31 : Histogrammes occupation des sols



* unités de sols : San Marcos est le sous-bassin le plus homogène, constitué principalement de Feozems (80 %), et pour le reste, de Litosols, Cambisols et Vertisols. San Lucas et San Luis sont plus hétérogènes, avec dominance d'Andosols (45 %) pour le premier, et de Regosols (40 %) pour le second.

* textures : comme précédemment, San Marcos est plus homogène avec 98 % de sols à texture moyenne, les autres 2 % étant constitués de Vertisols à texture fine. Les sols sont majoritairement de texture moyenne sur San Lucas (72 %), et de texture grossière sur San Luis (78 %).

* occupation des sols : sur les 3 sous-bassins San Marcos, San Lucas et San Luis, l'occupation des sols se résume à 3 modes principaux : agriculture (resp. 42, 34 et 50 %), forêts naturelles (resp. 28, 52 et 34 %) et pâturages (resp. 16, 8 et 6 %). La végétation couvre plus de 95 % des bassins, en considérant que seuls les modes zones urbaines et sols nus en sont dépourvus.

De façon grossière, la perméabilité des bassins peut être évaluée d'après la texture des sols et la couverture végétale : la perméabilité augmente avec la texture et la couverture végétale. Cette dernière étant relativement peu variable sur les 3 bassins, les perméabilités de ces bassins peuvent être essentiellement différenciées par les textures des sols : le bassin le plus perméable serait alors San Luis, suivi de San Lucas, et enfin San Marcos.

D'après les coefficients de ruissellement observés, San Luis est effectivement le plus perméable (avec un Kr annuel égal à 1,7 %). En revanche, San Lucas "ruisselle" davantage que San Marcos (Kr annuels respectivement égaux à 2,4 % et 2,1 %). Ce décalage entre les indicateurs de perméabilité, basés sur les textures des sols, et les volumes écoulés observés peut s'expliquer de deux façons :

* ces indicateurs restent très grossiers : une analyse approfondie des perméabilités doit s'appuyer non seulement sur les caractéristiques de texture (avec une classification plus détaillée), de couverture végétale, mais aussi de géomorphologie, de géologie (pour ce qui concerne la nature du sous-sol), et enfin, sur la réalisation de mesures "in situ". Le croisement de ces informations doit permettre d'affiner considérablement l'estimation des perméabilités superficielles des sols.

* des considérations géologiques sont plus probablement à l'origine du comportement hydrologique spécifique du bassin San Lucas :

une partie importante des écoulements s'infiltré - par failles et fractures -, avant de réapparaître à l'aval de ces zones d'infiltration : ce qui explique l'existence d'un débit de base soutenu dans le temps ;

ces zones d'infiltration sont éventuellement extérieures au bassin (sur le versant externe de l'Iztaccihuatl ?) : c'est alors par suite de cet apport d'écoulement extérieur au bassin que le coefficient de ruissellement du bassin San Lucas est supérieur aux deux autres. Le bassin réel de San Lucas serait donc différent du bassin topographique, cas relativement fréquent dans les régions volcaniques.

CONCLUSION GENERALE :

Les travaux que nous avons développés sur le thème de la ressource en eau dans le bassin de Chalco avaient deux objectifs :

* décrire, en fonction des données disponibles, les différents régimes climatiques et hydrologiques, pour aider à la planification des aménagements destinés à la gestion de la ressource en eau,

* détecter, d'un point de vue chronologique, d'éventuelles modifications de ces régimes, et tenter de les mettre en rapport, le cas échéant, avec les modifications géographiques actuelles du bassin (influence du peuplement et de l'urbanisation notamment).

Pour le premier objectif, nous avons constitué des bases informatisées de données (à l'aide de Pluviom, pour les données pluviométriques; d'Hydrom pour les données hydrométriques; du S.I.G. Savane pour les données géographiques spatialisées), rassemblant les données acquises sur le bassin, principalement par l'INEGI et la Comision Nacional del Agua. A partir de ces données, les résultats obtenus portent d'abord sur les distributions statistiques des pluies et des débits - à différents pas de temps - qui pourront être utilisées pour le dimensionnement d'ouvrages destinés à la protection contre les inondations, à l'infrastructure routière, ou à l'alimentation en eau (irrigation, consommation des zones urbaines). Sur le plan climatique, on retiendra l'influence du relief sur la variabilité spatiale des précipitations (comme probablement sur l'ensemble des variables climatiques). Sur le plan hydrologique, les écoulements superficiels sont peu importants (de l'ordre de 2 % des précipitations à l'échelle annuelle); les formes des crues sont néanmoins nettement influencées par les caractéristiques climatiques et géographiques des bassins étudiés - les débits spécifiques décennaux de pointe de crue varient dans un rapport 8 sur ces bassins.

Pour le second objectif, évolution des régimes climatiques et hydrologiques, l'examen des chroniques disponibles montrent que :

pour les régimes climatiques : à l'exception des précipitations, pour lesquelles il faut surveiller l'évolution de la succession actuelle d'états secs - débutant en 1982, la plus longue succession observée d'un état donné -, on n'observe pas d'organisations chronologiques (tendance, cycle, persistance) particulières.

pour les régimes hydrologiques : il n'apparaît pas de modifications significatives concernant les écoulements sur les 3 sous-bassins étudiés. Signalons cependant une augmentation des modules pour les 3 dernières années observées sur le bassin San Marcos, dont on examinera les causes, après avoir vérifié les données, en recherchant d'éventuelles modifications dans les caractéristiques géographiques du bassin.

Au stade actuel de l'étude, l'urbanisation d'une partie du bassin de Chalco ne semble donc affecter qu'assez peu les conditions climatiques et hydrologiques. Il est vrai que d'une part, les données hydro-climatiques sont peu nombreuses pour prétendre caractériser d'éventuelles modifications dues à ce phénomène d'urbanisation et que d'autre part, la plupart des données traitées portent sur la zone rurale du bassin, naturellement moins sensible que la zone en cours d'urbanisation. C'est plus probablement du point de vue de l'occupation des sols que la zone rurale pourrait avoir connue des modifications plus perceptibles (déforestation, déplacement des zones de cultures) dues à la pression urbaine : ces modifications expliqueraient par exemple l'augmentation récente des volumes écoulés sur le bassin San Marcos. Un suivi de l'occupation des sols, à l'aide de photographies aériennes et d'images satellitaires, doit être entrepris pour répondre à cette question. Concernant la ressource en eau, on retiendra que les principaux effets de l'urbanisation portent, comme le montrent R. Huizar et H. Niedzielski, sur la baisse du niveau de la nappe et sur la dégradation de la qualité de l'eau.

Les résultats hydrologiques présentés (volumes écoulés et formes des crues) ne se limitent pas au cas des bassins étudiés dans la zone de Chalco. Ils pourront être étendus à des bassins comparables situés sur les versants des vallées de Mexico, de Cuernavaca, de Puebla, de Toluca, voire de l'Altiplano mexicain. Pour identifier ces bassins, nous avons utilisé quelques indicateurs géographiques : distribution spatiale des distances à l'exutoire en relation avec les formes de crues, textures et couvertures végétales en relation avec les volumes écoulés. Il apparaît également, dans le cas du bassin San Lucas, que le réseau de failles et de fractures joue un rôle prépondérant dans l'hydrologie des bassins étudiés. Pour espérer transposer avec succès les résultats obtenus à d'autres bassins, cette modélisation qualitative des écoulements doit faire place à une modélisation plus rigoureuse, et plus quantitative :

les indicateurs géographiques restent grossiers et doivent être affinés. L'hydrogramme unitaire du bassin doit être cherché à partir de la distribution des distances à l'exutoire, mais aussi des pentes, des perméabilités et des rugosités. Les perméabilités des sols seront déterminées en combinant les données cartographiques de pédologie, d'occupation des sols, de géologie, de géomorphologie et des mesures "in situ" réalisées au simulateur de pluie. Enfin, le réseau de failles et de fractures doit être pris en compte et synthétisé par un indicateur (statistique ?) à préciser. Pour l'ensemble de ces recherches, les bases de données spatialisées déjà constituées (à compléter avec la géologie) et l'utilisation des systèmes d'informations géographiques, qui permettent de croiser ces données spatialisées, seront déterminants.

les régimes hydrologiques, volumes et débits, restent à ce stade entachées d'imprécisions, et réclament des compléments de données. Il faut renforcer le réseau pluviométrique pour évaluer l'incertitude portant sur l'estimation des précipitations moyennes sur les bassins étudiés, à des échelles de temps variant de l'année à la durée d'une averse. Il faut également reprendre le dépouillement des limnigrammes en utilisant d'une part un pas de temps variable adapté aux fluctuations des écoulements, en vérifiant d'autre part la validité des courbes d'étalonnages.

L'étude de la ressource en eau dans le bassin de Chalco possède de nombreux prolongements. Outre les aspects déjà signalés ci-dessus, d'autres recherches doivent porter sur :

* l'hydrologie de la zone urbaine : cette zone constitue un système hydraulique et géographique bien distinct et ne peut être comparé à la zone rurale. Les problèmes hydrologiques urbains sont essentiellement liés au drainage, particulièrement malaisé dans cette zone dont la pente est quasi-nulle. Des mesures doivent être effectuées pour évaluer les volumes et débits à évacuer.

* l'hydrogéologie du bassin de Chalco : le problème de la baisse du niveau de la nappe (évaluée à environ 1 mètre par an) pose surtout un problème d'instabilité des sols, qui affecte les constructions et infrastructures urbaines. La stabilisation du niveau de la nappe est donc un des objectifs majeurs, qui requiert une bonne connaissance du fonctionnement hydrogéologique du bassin de Chalco. La modélisation hydrogéologique du bassin de Chalco se heurte actuellement à un manque de données géologiques et à la difficulté d'estimer d'une part, l'alimentation de la nappe par infiltration, d'autre part les volumes extraits par pompages.

* la dégradation de la qualité des eaux superficielles et souterraines : elle est à l'origine de problèmes sanitaires graves, qui demande la mise en place de stations de traitement des eaux. Il faut mieux caractériser les compositions bactériologique et chimique des eaux, et prévoir la quantité d'eaux résiduelles à traiter pour dimensionner les stations.

En conclusion, nous soulignerons que le bassin de Chalco concentre une gamme très étendue de caractéristiques physiques et socio-économiques (zones de plaine, de piémont et de montagne, zones agricoles et urbaines), et une grande variété de problèmes liés à la ressource en eau. Compte tenu des données réunies et des analyses déjà effectuées, ce bassin constitue un terrain de premier plan pour y développer et éprouver métrologies et méthodologies hydrologiques d'une part, aménagements hydrauliques d'autre part. Pouvant espérer des bénéfices dépassant largement le strict cadre de Chalco, on ne saurait trop insister par conséquent sur l'intérêt d'y promouvoir une zone expérimentale privilégiée pour l'étude et la gestion de la ressource en eau, l'un des enjeux actuels prioritaires.

BIBLIOGRAPHIE :

Brunet-Moret Y., 1978. Recherche d'un test d'ajustement. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, volume XV n°3, pp. 261-280.

Chavez J.M. et al., 1990. Diagnostico ambiental de la cuenca de Chalco. Proyecto Valle de Chalco. UAM-X, ORSTOM.

FAO-UNESCO, 1976. Mapa Mundial de suelos.

Huizar R., 1989. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Techniques de Franche Comté-Besançon, 160 p.

Huizar R., Niedzielski H., 1990. "Hidrogeologia de la cuenca de Chalco". Proyecto Valle de Chalco. UAM-X, ORSTOM.

Mooser F., 1975. Historia geologica de la Cuenca de México. Mém. Obras Sistema de Drenaje Prof. del Distrito Federal. México D.F. Depto. del D.F.T. 1, pp.7-38.

ORSTOM, 1989a. PLUVIOM, un logiciel de gestion des données pluviométriques, 187 p..

ORSTOM, 1989b. DIXLOI, un ensemble de programmes Fortran 77 pour l'ajustement de lois statistiques et leur représentation graphique, 55 p.

ORSTOM, 1989c. HYDROM, sistema de banco de datos hidrométricos, 96 p.

ORSTOM, 1990. LAMONT, Logiciel d'Analyse des Modèles Numériques de Terrain, 127 p.