

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

JOËL GUIOT

Sur la détermination de régions climatiques quasi-homogènes

Revue de statistique appliquée, tome 34, n° 2 (1986), p. 15-34

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1986__34_2_15_0

© Société française de statistique, 1986, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Revue de statistique appliquée » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

SUR LA DÉTERMINATION DE RÉGIONS CLIMATIQUES QUASI-HOMOGÈNES

Joël GUIOT

U.A. 1152 du CNRS

Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie

Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie

rue Poincaré, F-13397 Marseille

RÉSUMÉ

Cet article présente quelques façons de délimiter des zones climatiques quasi-homogènes dans un réseau d'observations. L'exemple choisi est la région Provence-Alpes-Côte d'Azur dans le Sud-Est de la France. Dans un premier temps les précipitations mensuelles de 42 stations sont synthétisées par une analyse en composantes principales et des zones climatiques sont déterminées par une classification ascendante hiérarchique. Dans un second temps, les 12 séries les plus longues sont appréhendées sous l'angle fréquentiel par une analyse spectrale suivie d'une analyse en composantes principales des spectres, ce qui permet un second type de classification basée sur les fréquences dominantes. Finalement, une analyse autorégressive moyenne mobile est effectuée sur les séries de températures moyennes mensuelles et les précipitations totales mensuelles; les principaux paramètres permettant de résumer ces séries sont mis en évidence et une analyse en composantes principales de ceux-ci permet une classification intégrant un maximum de caractéristiques du climat de la région. Les potentialités de cette dernière classification permettent de résoudre le dilemme qui se pose souvent au bio-climatologiste : utiliser un maximum de variables climatiques sans les réduire à leur plus simple expression (par exemple leur moyenne).

INTRODUCTION

L'identification de sous-régions climatiques correspondant à des régimes climatiques particuliers est un point essentiel dans la compréhension du climat d'une région donnée, par exemple pour expliquer la répartition de la végétation. Dans cette optique, les écologistes ont défini la notion de bioclimat, c'est-à-dire la résultante efficace au niveau biologique des différents paramètres du climat physique. Avant l'avènement des ordinateurs, le climat d'une région était analysé sous forme d'indices bioclimatiques (bâti sur des moyennes) ayant la propriété de synthétiser plusieurs aspects du climat. Dans une analyse bioclimatique, des seuils sont fixés sur la base de l'observation de la végétation et les types de climats définis en fonction de ceux-ci. Une grande variété d'indices ont été construits suivant les idées que se font les utilisateurs de l'influence de tel ou tel paramètre du climat sur la répartition de la végétation (voir Daget, 1977).

Maintenant ces analyses, dites aussi climatographiques, sont devenues plus fines. Elles font appel aux techniques d'analyse de données et aux

statistiques multivariées. De nombreuses méthodes ont été proposées et appliquées à toutes les parties du globe. Malheureusement, la plupart des recherches dans ce sens ne peuvent éviter un compromis entre la prise en compte des variations temporelles d'un petit nombre voire d'un unique paramètre et la prise en compte d'un maximum de paramètres climatiques sous une forme simplifiée. Un rapide tour d'horizon de la littérature va le montrer clairement.

Steiner (1965) a introduit dans son analyse des U.S.A., 16 paramètres climatiques. En contrepartie, il a été obligé de les moyenner sur 30 ans. Une analyse en composantes principales (ACP) (avec rotation VARIMAX) a été effectuée sur ces 16 variables observées en 67 stations. Une classification et une analyse discriminante a permis de délimiter et tester 10 sous-régions. Ce type d'analyse permettrait cependant une ouverture vers une classification plus dynamique en introduisant des variables symbolisant certaines périodicités du système climatique.

Gregory (1975) a passé en revue différentes méthodes de classification englobant les caractéristiques temporelles du climat. Les stations d'Angleterre sont considérées comme variables et les relevés mensuels comme observations. Ces méthodes sont basées également sur l'ACP, les corrélations et/ou des méthodes de classification. L'auteur a proposé une méthode appelée « linkage analysis » qui est hiérarchique et basée sur les corrélations entre les stations, mais seules les précipitations ont été analysées.

Dans la même optique, d'autres études ont été entreprises : (1) PERRY (1970) pour l'ACP du champ de pression de surface en Angleterre; (2) SALINGER (1980) pour l'ACP des températures mensuelles de la Nouvelle-Zélande et celle des précipitations mensuelles; (3) WIGLEY *et al.* (1984) pour l'ACP des précipitations mensuelles en Angleterre; (4) FORTIN *et al.* (1982) pour l'ACP des précipitations mensuelles du Québec; (5) TABONY (1981) a entrepris une ACP des précipitations mensuelles en Europe et une analyse spectrale des composantes principales pour tester la présence de cycles; (6) GOOSSENS (1985) a effectué une ACP des précipitations de la région méditerranéenne; (7) GADGIL *et al.* (1983), par une ACP, a analysé les précipitations mensuelles, un indice d'humidité et la température minimale en Inde; ces paramètres sont d'une grande valeur bioclimatique, mais leur intégration en une seule analyse n'a pas été faite; (8) DYER (1975; 1982), par des ACP et une analyse spectrale, a analysé la structure des précipitations du Sud de l'Afrique; (9) DOUGUEDROIT *et al.* (1983) a effectué une ACP des précipitations du Bassin Méditerranéen Occidental. Bien d'autres études existent, mais il n'est pas possible ici de toutes les rappeler.

D'autres méthodes plus spécifiques ont été proposées : (1) MARCHAND (1979) a utilisé la méthode des nuées dynamiques pour analyser le réseau pluviométrique Irlandais; (2) NICHOLSON (1981) a effectué une analyse très fouillée de la répartition des précipitations du continent africain par une analyse des téléconnexions basée sur les coefficients de corrélations; (3) l'analyse des correspondances n'est pas oubliée dans une étude des précipitations de la Mer Egée (MAHERAS, 1981); (4) JOHNSTON (1981) a proposé le recours à la théorie de l'Information et teste sa méthode sur le réseau de GREGORY (1975); (5) L'Hermier Des Plantes *et al.* (1977) a utilisé

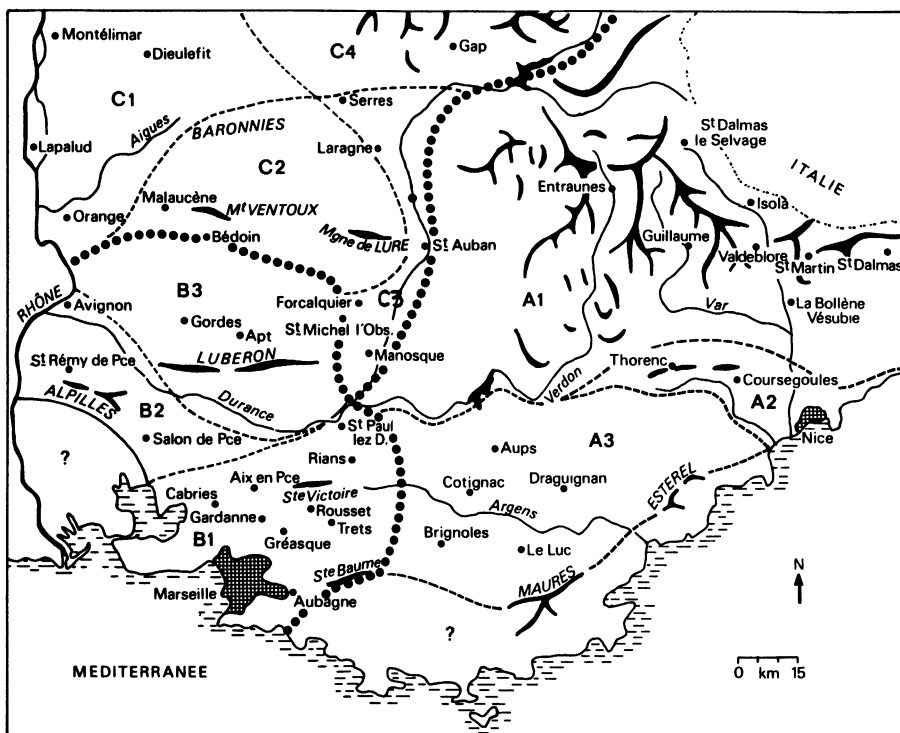


Figure 1. — Carte du Sud Est de la France et les 10 zones pluviométriques délimitées par la classification hiérarchique rassemblées en trois groupes A, B, C.

la méthode STATIS qui permet l'analyse d'un tableau à 3 indices : par exemple, années, mois, paramètres climatiques; cette possibilité de travailler conjointement sur 3 indices résout en partie notre problème; cependant l'interprétation est plus complexe que celle d'une ACP, ce qui peut devenir problématique dans certains cas.

C'est pourquoi, partant d'une méthode de classification ascendante hiérarchique sur composante principales, des notions fréquentielles et temporelles vont être introduites. Par une synthèse de certains aspects dynamiques du climat, ces notions permettront une ouverture sur une régionalisation intégrant à la fois les variations temporelles et un maximum de paramètres climatiques. Cette analyse concerne la région de la Provence-Alpes-Côte d'Azur, délimitée à l'ouest par le Rhône, au Nord par l'axe Montélimar — Gap, à l'est et au sud par l'Italie de la Méditerranée (Fig. 1). Cette région est relativement réduite mais assez diversifiée parce qu'elle englobe plusieurs types de climats : un climat méditerranéen subhumide, un climat méditerranéen de montagne, enfin un climat à tendance continentale avec influences océaniques (au nord). Quarante-deux stations ont été choisies pour leur intérêt écologique et particulièrement dendroclimatologique. Ces données, réunies au Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie de Marseille, ont été fournies par la Météorologie Nationale (centres d'Aix-en-Provence, de Nice

TABLEAU 1

Liste des stations. Celles qui sont marquées de * sont disponibles de 1900 à 1979, les autres de 1950 à 1979

code: stations	Dépt	Alt.!	code: stations	Dept	Alt.
Aix: Aix-en-Provence *	13	173	! Mar: Marseille-Obs. *	13	75
Apt: Apt *	84	234	! Mon: Montélimar	26	75
Aub: Aubagne *	13	127	! Ven: Mont Ventoux	84	1912
Aup: Aups	83	500	! Nic: Nice Aéro *	06	5
Avi: Avignon *	84	25	! Ora: Orange *	84	53
Bed: Bédouin	84	360	! Rea: Réaltor Cabries*	13	160
Bri: Brignoles *	83	215	! Ria: Rians	83	381
Cot: Cotignac	83	380	! Rou: Rousset	13	235
Cou: Coursegoules	06	1000	! Sal: Salon de Prov. *	13	65
Die: Dieulefit	26	380	! SAu: St Auban	04	459
Dra: Draguignan	83	183	! Ten: St Dalmas de Tende	06	650
Ent: Entraunes	06	1250	! Sel: St Dalmas le Selv.	06	1510
For: Forcalquier	04	535	! SMV: St Martin Vesubie	06	1000
Gap: Gap *	05	735	! SMO: St Michel Obs.	04	647
Gar: Gardanne *	13	283	! SPD: St Paul Durance	13	296
Gre: Gréasque *	13	322	! SRm: St Rémy de Prov.*	13	48
Gor: Gordes	84	350	! Ser: Serres	05	672
Gui: Guillaume-Bourg	06	760	! Tho: Thorenc	06	1168
Iso: Isola	06	878	! Tre: Trets *	13	249
Lap: Lapalud	84	49	! Val: Valdeblone la Bol.	06	1050
Lar: Laragne	05	575	!		
Mal: Malaucène	84	330	!		

et de Carpentras) ou sont tirées, pour les longues séries, de GARNIER (1974). Les séries ont été comblées et vérifiées par BRIATTE (1982) et GUIOT (1984). Les différentes séries de précipitations mensuelles sont présentées au tableau 1. Les plus courtes débutent dans les années cinquante et la plus longue débute en 1821 (Marseille). Deux périodes de référence sont utilisées : 1950-1979 et 1900-1979.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES ET CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE

Les 42 séries de précipitations mensuelles sont analysées sur la période 1950-1979, ce qui donne une matrice (360,42), les 12 mois $\times$ les 30 années formant les observations et les 42 stations formant les variables. La matrice de corrélation (42,42) est calculée. L'ACP va permettre de décrire les principales structures de cette matrice, dont les éléments sont tous supérieurs à 0.50 et dont les maxima valent 0.97 (St-Michel/Forcalquier) et 0.95 (Thorenc/Coursegoules, St-Martin de Ves./Valdeblorre, St-Martin de Ves./St-Dalmas de Tende). Le cycle saisonnier est faible en variance expliquée pour toutes ces stations (max. 18 %), ce n'est donc pas lui qui est responsable de ces excellentes corrélations. Le tableau 2 présente les valeurs propres, les pourcentages de variance expliquée et les produits cumulés des valeurs propres notés PVP (on en reparlera lors de la classification).

TABLEAU 2

Valeurs propres (V.P.), pourcentages simples et cumulés de variance expliquée et produits cumulés (PVP) pour les 20 premières composantes principales

No	V.P.	% expl.	cum.	PVP	!	No	V.P.	% expl.	cum.	PVP
1	31.12	74.1	74.1	31.12	!	11	0.20	0.5	93.3	0.07
2	2.66	6.3	80.4	82.78	!	12	0.20	0.5	93.8	0.01
3	2.17	5.2	85.6	179.63	!	13	0.19	0.5	94.3	0.00
4	0.75	1.8	87.4	134.72	!	14	0.18	0.4	94.7	0.00
5	0.55	1.3	88.7	74.10	!	15	0.17	0.4	95.1	0.00
6	0.48	1.1	89.8	35.57	!	16	0.15	0.4	95.5	0.00
7	0.37	0.9	90.7	13.16	!	17	0.14	0.3	95.8	0.00
8	0.32	0.8	91.5	4.21	!	18	0.14	0.3	96.1	0.00
9	0.31	0.7	92.2	1.30	!	19	0.13	0.3	96.4	0.00
10	0.26	0.6	92.8	0.34	!	20	0.12	0.3	96.7	0.00

La première composante principale (C.P. explique près de 75 % de la variance totale. Les deux suivantes expliquent chacune près de 5 %. Ensuite, il y a brusque chute à moins de 2 %. Seules donc les trois premières vont être étudiées (soit 85.6 % de la variance totale).

Une façon assez intéressante de présenter ces 3 C.P. est de les porter sur une carte géographique par une méthode d'interpolation suivant l'inverse des distances.

C.P. 1. (Fig. 2)

Au niveau de cette composante, deux « anomalies » se font jour. La première concerne la seule station de Réaltor qui a un poids élevé sur cette C.P. à l'encontre des stations environnantes : cet isolement permet de mettre en cause des aberrations dans les données de Réaltor, ce que confirme leur examen détaillé.

La deuxième anomalie concerne Forcalquier, mais aussi les stations voisines de St Michel et, à un moindre degré de St Auban, Laragne et Serres. Elle est donc significative. Pour l'expliquer, il faut d'abord noter que cette C.P. 1 doit représenter l'allure principale du régime des pluies du Sud-Est de la France, puisqu'elle explique de loin le maximum de la variance. Or durant la partie humide de l'année (automne, hiver, printemps), les stations du nord (Montélimar, Gap) sont influencées principalement par le régime océanique des masses d'air du nord-ouest (front polaire), tandis que les stations du sud, particulièrement de Nice et des environs, sont principalement arrosées par des masses d'air venant du sud-est (dépression du Golfe de Gênes).

Dans ces conditions on conçoit que les stations intermédiaires soient influencées tantôt par un régime du premier type tantôt par un régime du second type avec une variabilité plus grande de leur régime des pluies.

Mais dans le cas de Forcalquier, St Michel et les stations voisines de la boucle de la Durance, cette variabilité est fort accentuée par l'existence de reliefs aussi bien à l'ouest (Luberon, Ventoux, Lure, plateau du Vaucluse et Baronnies) qu'à l'est (Alpes), barrières dont le franchissement par vents humides est assez aléatoire.

C.P. 2. (Fig. 3)

Cette C.P. semble présenter un gradient influencé par le relief, c'est-à-dire orienté du nord-est au sud-ouest. Suivant ce gradient, les stations les plus différentes sont les stations alpines d'une part et Marseille d'autre part, Nice étant bordé de trop près par les Alpes pour avoir un comportement similaire aux autres stations du littoral.

C.P. 3. (Fig. 4)

Le gradient s'oriente ici du sud-est vers le nord-ouest. Cette C.P. met donc en opposition les stations à régime pluviométrique plus frontal (Montélimar) et les stations à régime pluviométrique plus méditerranéen (Nice).

Une analyse des 15 séries les plus longues (stations marquées d'un astérisque au tableau 1), basée sur 1900-1979, confirme cette répartition, ce qui montre sa stabilité (tenant compte du fait que le climat d'avant 1950 est assez différent de celui d'après 1950). Seul le creux de Forcalquier n'est pas mis en évidence pour la simple raison qu'il n'y a pas de séries longue en cet endroit.

L'analyse précédente a été effectuée sur les 3 premières C.P. Une analyse de classification hiérarchique (LEBART *et al.* 1979 ou JAMBU *et al.* 1978) permet quant à elle d'intégrer autant de C.P. que l'on veut. Il n'est néanmoins pas intéressant de les utiliser toutes puisque les dernières, de faible variance, ne représentent que du bruit. Le critère du PVP mis au point dans GUIOT (1981) permet de choisir un référentiel de faible dimension représentant un

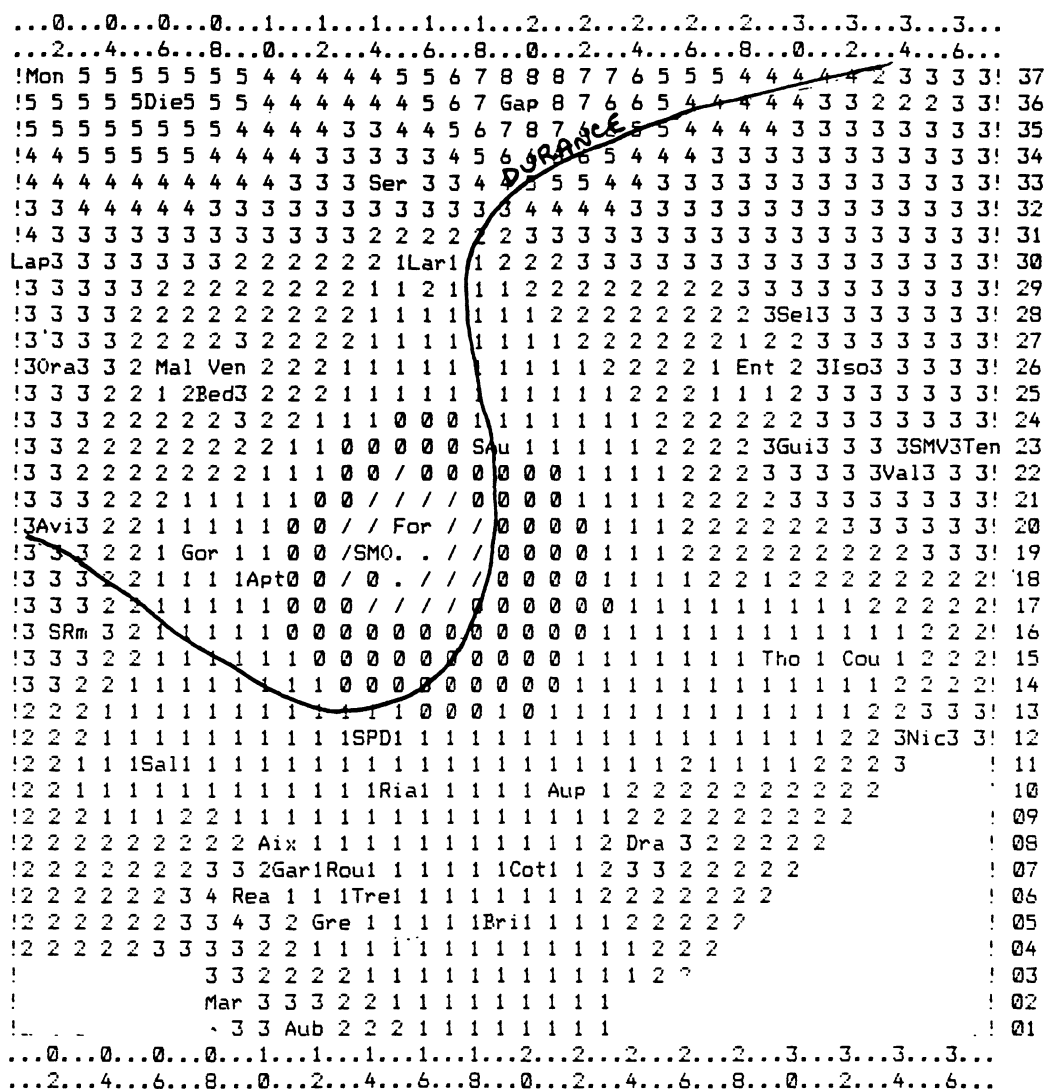


Figure 2. — Composante principale 1 des précipitations projetée sur la carte des 42 stations.


```

...0...0...0...0...1...1...1...1...1...2...2...2...2...2...3...3...3...3...
...2...4...6...8...0...2...4...6...8...0...2...4...6...8...0...2...4...6...
!Mon 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 37
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 36
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 35
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 34
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 33
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 32
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 31
Lap5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 30
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 29
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 28
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 27
!50ra5 5 5 Mal Ven 5 5 4 4 4 3 3 3 3 3 2 2 2 2 1 1 1 Ent 1 1 Isol 1 1 1 0 26
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 3 3 3 3 3 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 25
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 3 3 3 3 3 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 24
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 3 3 3 3 3 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 23
!5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 3 3 3 3 3 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 22
!4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 21
!4Avi4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 For 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 20
!4 4 4 4 4 4 4 Gor 3 3 3 3 3SM03 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 19
!4 4 4 4 4 4 4 4 4 3Apt3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 18
!4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 17
!4 SRm 4 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 16
!4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 15
!4 4 4 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 14
!3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 13
!3 3 3 3 3 2 3 2 2 2 1 1 1SPD1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 12
!3 3 3 3 3Sal3 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 11
!3 3 3 3 3 3 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10
!2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 09
!2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 Aix 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 08
!2 2 2 2 2 1 1 1 1 1GariRou1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 07
!2 2 1 1 1 1 1 1 1 Rea 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 06
!2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 Gre 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 05
!1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 04
! 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 03
! Mar 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 02
! 1 0 Aub 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 01
...0...0...0...0...1...1...1...1...1...2...2...2...2...2...3...3...3...3...
...2...4...6...8...0...2...4...6...8...0...2...4...6...8...0...2...4...6...

```

Figure 4. — C.P. 3 des précipitations projetée sur la carte des 42 stations.

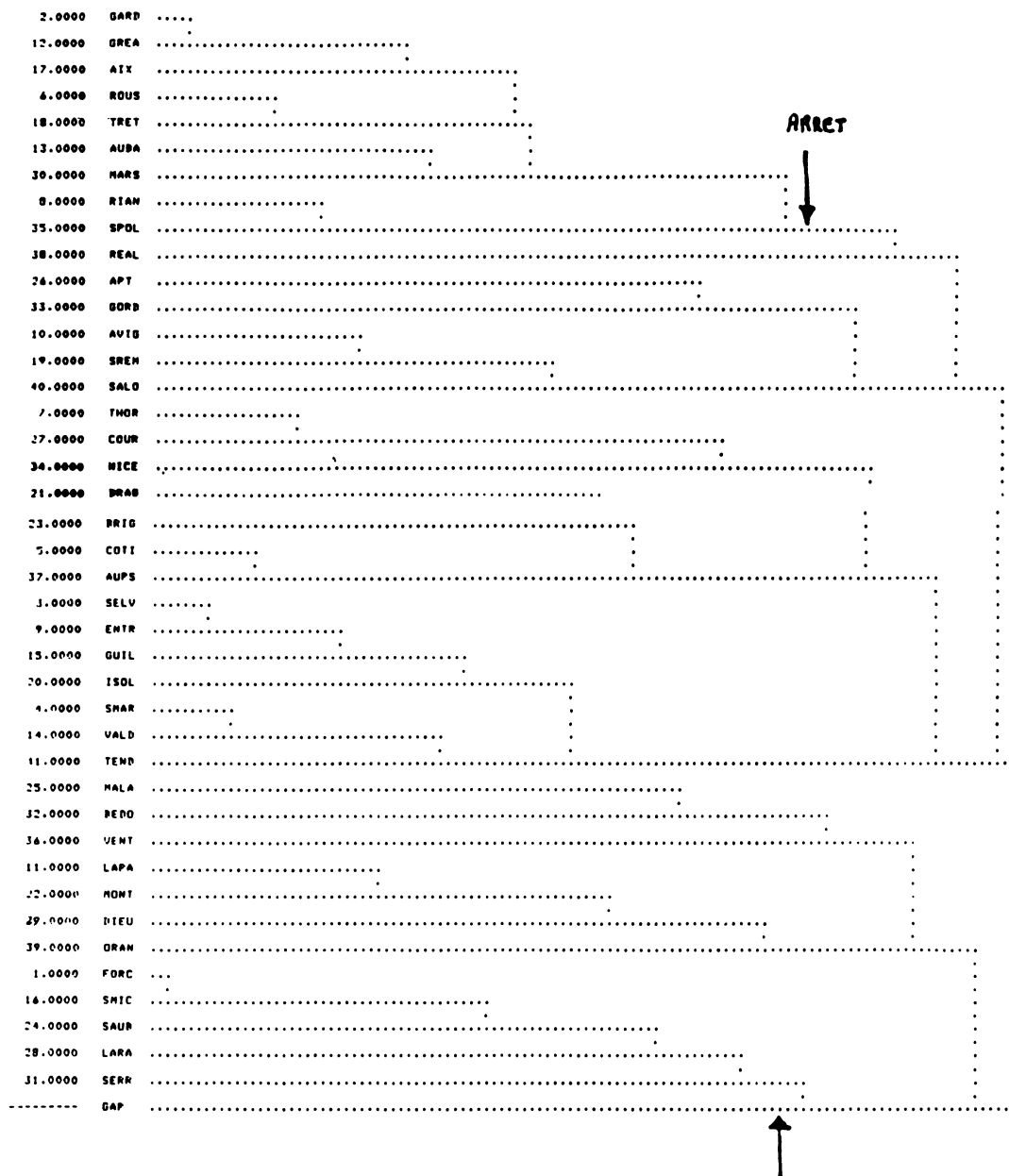


Figure 5. — Arbre de la classification hiérarchique des 42 séries de précipitations.

maximum de variance totale. Il consiste à calculer le Produit cumulé des Valeurs Propres jusqu'à ce qu'il devienne inférieur à 1. Le produit des valeurs propres d'une matrice de corrélation diagonale (donc de variables indépendantes) vaut 1, c'est la raison pour laquelle ce seuil est choisi. Ce produit tombe en dessous de 1 après la neuvième C.P. (tableau 2). La classification sera donc effectuée sur les neuf premières C.P. Dans cet espace, la distance entre deux stations j et k est calculée par la formule suivante :

$$d^2(j, k) = (1/9) \sum_{i=1}^9 \lambda_i (a_{ji} - a_{ki})^2 \quad (1)$$

où a_{ji} (respectivement a_{ki}) est la valeur de la C.P. i pour l'observation j (respectivement k) et λ_i est la valeur propre correspondant à la C.P. i .

La matrice (42,42) des distances est ainsi formée. On recherche la plus petite distance : St Michel — Forcalquier. Ce couple est agrégé et sa distance moyenne avec les autres stations est calculée. On obtient une matrice (41,41), on y recherche la plus petite distance : Gréasque — Gardanne. On groupe et on continue de la sorte jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un seul groupe de 42 stations.

Parallèlement, on calcule l'indice égal à la distance entre les deux classes réunies lors du dernier groupement effectué. Dans cette classification il est inférieur à 0.010 depuis l'étape 1 jusqu'à l'étape 30. A l'étape 31 il augmente de 0.012. On a la plus grande augmentation 0.022 à l'étape 40. Il est donc intéressant de considérer les étapes 30 (12 groupes) et 39 (3 groupes). La figure 5 montre l'arbre de classification qui en découle. Considérant que le Mont Ventoux est proche de Bédoin et Malaucène (agrégation à l'étape 32) et que Réaltor n'est seul que parce qu'il présente des aberrations (on l'ajoute donc à son groupe naturel qui est celui du littoral; étape 35). Les 12 groupes se réduisent finalement à 10 (Fig. 1).

Si on pousse plus loin la classification en définissant finalement trois zones (étape 39), la Durance sert de limite principale séparant les stations d'influence Ouest prépondérante (Hautes Alpes, Vaucluse, Drome) des autres dans lesquelles on peut faire passer une frontière entre l'Est (Alpes Maritimes, Var) et l'Ouest (Bouches du Rhône). On voit donc que la Durance joue un rôle clé (exception faite pour Apt-Gordes rangés avec les stations du Sud de la Durance).

ANALYSE FRÉQUENTIELLE

Les études précédentes ont mis en rapport, d'une manière globale, deux domaines : le domaine temporel et le domaine spatial. L'analyse spectrale distingue différentes échelles de variations. L'échelle la plus marquante est celle qui correspond au cycle saisonnier, mais d'autres peuvent être reconnues. De plus, même si aucun cycle marquant n'est décelé, il est intéressant de vérifier si la variance des précipitations se caractérise principalement par des hautes ou des basses fréquences.

Soit T la longueur du cycle de w la fréquence circulaire qui lui correspond ($w = 2\pi/T$), une analyse spectrale permet d'analyser les fréquences de l'intervalle $[0, w_N]$ où w_N est la fréquence de Nyquist (correspondant ici à une période de 2 mois). Le lecteur peut trouver une bonne introduction à cette analyse dans Chatfield (1975) et des développements plus complets dans Priestley (1981).

Le spectre peut se calculer par transformée rapide de Fourier, bien que des méthodes plus performantes dans certains cas particuliers existent (PES-TIAUX *et al.*, 1982). Dans le cas qui nous préoccupe, cette méthode est amplement suffisante.

Le spectre de la variable x échantillonnée sur n intervalles de temps est estimé par

$$I_x(w) = \left| \sum_{t=1}^n x_t \exp(iwt) \right|^2 / (\pi n) \quad (2)$$

L'analyse spectrale va porter sur les 12 séries les plus longues après retrait d'Aubagne, Gardanne et Trets très corrélées aux autres stations des Bouches du Rhône.

Pour chacune des 12 séries composées de 960 observations (80 années $\times$ 12 mois), on distingue 32 bandes de fréquences plus la fréquence 0 représentant la tendance (cycles aussi longs que la longueur de la série). Pour chacune des 12 analyses, on remarque deux cycles principaux. Le cycle de 12 mois correspond évidemment au cycle saisonnier. Pour les stations méditerranéennes, l'été est sec et les autres saisons sont pluvieuses. Pour certaines stations comme Gap et Orange, le printemps est plus pluvieux que l'hiver, ce qui est appelé par Bénévnt (1926) une succession APHE (la première lettre des 4 saisons par ordre de plubiosité décroissante). Cette remontée au printemps induit un cycle supplémentaire de 6 mois. Pour les autres stations, principalement du littoral, le printemps est moins pluvieux que l'hiver, ce qui est appelé une succession AHPE. En fait l'automne est toujours plus pluvieux que l'hiver, c'est pourquoi, ce cycle de 6 mois est toujours présent. Il est plus marqué que celui de 12 mois quand le printemps est également plus pluvieux que l'hiver.

La matrice (12,12) de covariance des spectres est établie sur 33 observations (les 33 bandes spectrales); elle est traitée par une ACP. La première C.P. (Fig. 6) explique 90 % de la variance totale, elle montre une distribution surd-nord des stations, ce qui correspond à un gradient de la différence entre les précipitations d'été et celles d'automne. Pour ces stations (principalement du littoral), le cycle de 12 mois est beaucoup plus puissant que pour Gap ou Orange. Cette analyse permet donc de délimiter 2 zones (Fig. 6) dont l'une est caractérisée par une sécheresse estivale prononcée et l'autre moins.

La C.P. 2 (Fig. 7) présente également un gradient Sud-Nord, mais elle est liée à la prépondérance du cycle de 6 mois. Elle distingue les stations AHPE (Brignoles, Marseille, Nice, Gréasque, Réaltor) et les stations APHE (Aix, Salon, Avignon, St Rémy, Orange, Apt et Gap).

Cette analyse fournit ainsi deux groupes : d'une part le Nord de la Durance (Gap, St Rémy, Apt, Avignon, Orange) et d'autre part le Sud de la Durance (Réaltor, Marseille, Gréasque, Brignoles, Nice). Aix et Salon consti-

tuent la frontière entre ces deux groupes. Cette étude, malgré le faible nombre de stations incluses, reproduit la classification en deux groupes de la section précédente. Cette similarité permet de mieux comprendre la structure essentielle du réseau. Un plus grand nombre de stations permettrait d'approfondir l'interprétation.

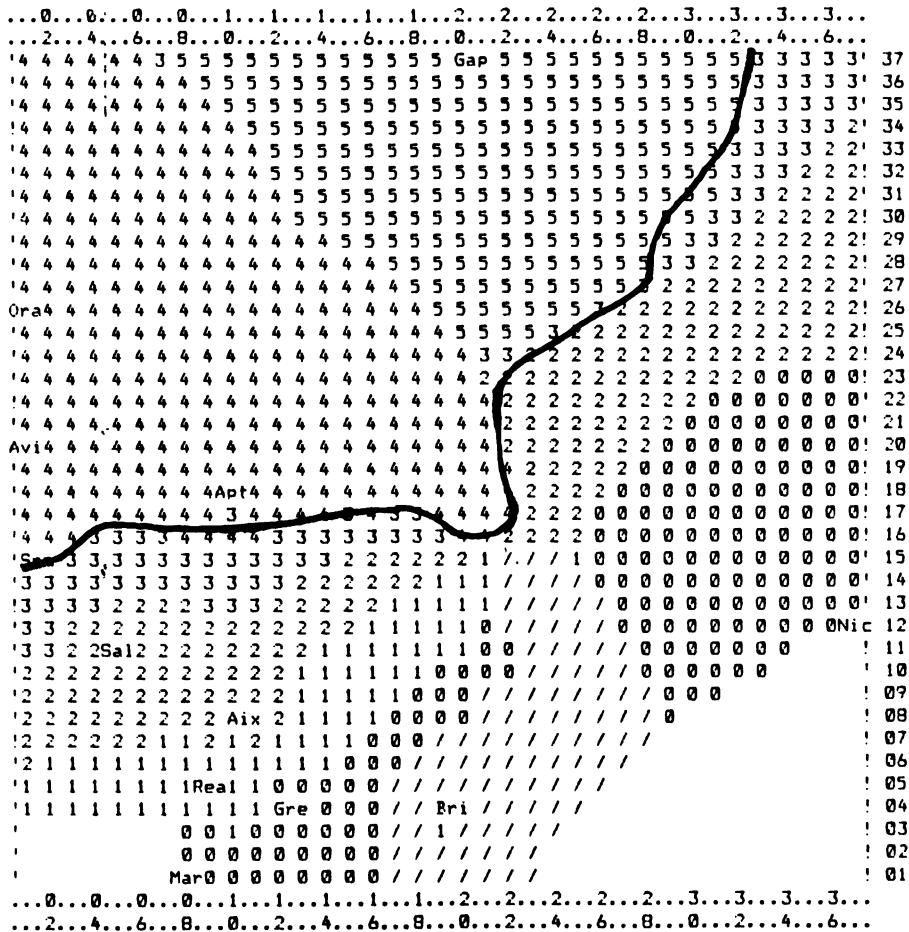


Figure 6. — C.P. 1 de la matrice de covariance des spectres de 12 séries mensuelles de précipitations.

$$(1 - B - B^{12} + B^{13})T_t = (1 - \theta B - \theta_{12}B^{12} + \theta\theta_{12}B^{13})a_t$$

soit

$$T_t = T_{t-1} + T_{t-12} - T_{t-13} + a_t - \theta a_{t-1} - \theta_{12} a_{t-12} + \theta\theta_{12} a_{t-13}$$

ce qui revient à exprimer la température en fonction de son propre passé, en fonction d'une variable aléatoire simple et de son passé également. Le décalage 12 est bien sûr relié au cycle saisonnier.

On ne dispose pas de 42 séries de températures suffisamment longues. Se basant sur les 10 groupes délimités à la section 1, on sélectionne 1 série de températures par groupe en y ajoutant quelques autres, soit 14 séries. Les coefficients θ et θ_{12} sont estimés pour chacune de ces 14 séries par filtrage adaptatif généralisé (Makridakis et Wheelwright, 1977). Cette méthode, bien que contestée (Chatfield, 1978), est d'un accès facile et d'une précision suffisante dans une optique descriptive. θ varie peu d'une série à l'autre, tandis que θ_{12} semble avoir une certaine répartition géographique. Relié à l'amplitude saisonnière de la température, il est retenu comme représentatif de la distribution spatiale de la température.

Les précipitations se modélisent un peu différemment, car le cycle saisonnier y est moins important et est doublé d'un cycle de 6 mois, comme cela a été vu à la section précédente. L'équation suivante (notée ARIMA(6, 1, 0) $\times$ ARIMA(0, 1, 0)₁₂)₁₂ est ajustée :

$$\left(1 - \sum_{k=1}^6 \phi_k B^k\right) (1 - B) (1 - B^{12})P_t = b_t \quad (4)$$

où b_t est un bruit blanc. Le calcul est fait comme précédemment pour les mêmes 14 stations. Les coefficients $\phi_1, \phi_2, \phi_4, \phi_5$ sont trouvés non significatifs; ϕ_3 l'est mais ne varie guère d'une série à l'autre (de -0.6 à -0.7); ϕ_6 est également significatif et varie de manière structurée entre -0.22 et -0.46 . Ce coefficient est conservé comme représentatif de la distribution spatiale des précipitations.

D'autres paramètres représentent la pluviosité et la température et sont utiles d'un point de vue bioclimatique : la température moyenne annuelle (T_a), les précipitations totales annuelles (P_a), la température minimale moyenne du mois le plus froid (T_m) et la température maximale moyenne du mois le plus chaud (T_M). D'autres paramètres devraient aussi être utilisés, mais ils ne nous sont pas disponibles à grande échelle et pour une longue durée : rayonnement, vent, humidité,... On pourrait utiliser des valeurs journalières : cela donnerait des coefficients de persistance de la pluie, de la température etc.

Tous les paramètres disponibles ($T_a, P_a, P\phi_6, T\theta_{12}, T_M, T_m$) — avec la notation $P\phi_6$ pour le coefficient ϕ_6 de l'équation (4) et la notation $T\theta_{12}$ pour le coefficient θ_{12} de l'équation (3) — sont maintenant utilisés dans une ACP sur matrice de corrélation. Le tableau 3 donne quelques résultats de cette analyse.

Les deux premières C.P. expliquent 83.7 % de la variance totale. La première (Fig. 8) met en opposition les stations de montagne et les stations du littoral. Elle est liée aux paramètres de position (T_a, P_a, T_m, T_M). La seconde (Fig. 8) met en opposition les stations de la Durance et celle du littoral (principalement Nice). On retrouve le pôle de Forcalquier de la figure 2. Cette C.P. est liée aux coefficients $P\phi_6$ et $T\theta_{12}$. Elle met en opposition les séries au

$T\theta_{12}$ élevé (Forcalquier) et les séries au $P\phi_6$ élevé en valeur absolue (Nice). Par cette composante, on voit que l'influence méditerranéenne remonte jusque Gap, tandis que l'influence océanique descend jusque Forcalquier. C'est le profil intraannuel du climat qui est le plus marqué par cette situation particulière de la Durance.

TABLEAU 3
Valeurs propres, % variance expliquée

No	V.P.	% simples	% cumulés
1	3.47	57.9	57.9
2	1.55	25.8	83.7
3	0.42	6.9	90.6
4	0.25	4.1	94.8
5	0.21	3.5	98.2
6	0.10	1.7	100.0

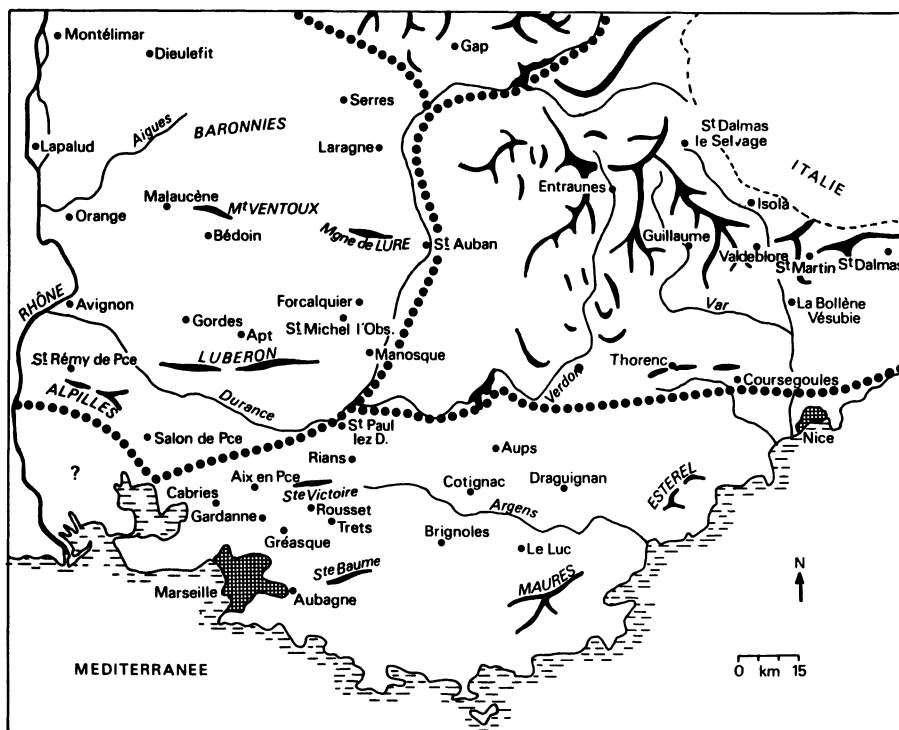


Figure 9. — Délimitation de 4 zones basées sur les 6 variables synthétiques.

REMARQUES ET CONCLUSIONS

Dans la classification hiérarchique sur composantes principales (première section), les paramètres de position, c'est-à-dire les moyennes, ne sont pas pris en compte, puisqu'on travaille en terme de déviations autour de ces moyennes. Le régime principal des variations de la pluviosité tel que présenté par la C.P. 1 de la figure 2 est synthétisé valablement, dans l'analyse chronologique, par le coefficient $P\phi_k$ (ce qui montre la puissance de cette analyse). Grâce à ce pouvoir synthétique, il est possible d'inclure d'autres variables climatiques et donc de faire reposer la classification sur des bases plus complètes.

La figure 9 présente cette dernière classification basée sur l'ACP de la section précédente. La première délimitation est située à la médiane des projections des stations sur la première C.P., comme le montre la partie gauche de la figure 8. La seconde délimitation est donnée de la même manière par la deuxième C.P. (partie droite de la figure 8). Cela fournit 4 groupes : (1) Gap, soit les Hautes Alpes [figure 1 : C4]; (2) Guillaume, Thorenc, soit les montagnes des Alpes Maritimes [A1-A2]; (3) Nice, Le Luc, Aix, Marseille, soit le littoral [A2-A3-B1-B2-B3]; (4) Montélimar, Lapalud, Orange, Avignon, Gordes, Apt, Forcalquier, soit le Nord de la Basse Durance [C1-C2-C3].

La comparaison de ces résultats avec ceux de la figure 1, montre que les paramètres de position ont pour effet de séparer du reste, les stations de montagne et de rassembler celles du littoral, ce qui est assez logique. Bien sûr, un plus grand nombre de stations permettrait une classification plus fine équivalente à celle de la classification ascendante hiérarchique de la première section.

Ceci montre que l'on peut résumer une série climatique par quelques paramètres de structure temporelle bien choisis, ce qui permet d'inclure dans une classification un grand nombre de variables climatiques et d'appréhender d'une façon à la fois exhaustive et dynamique le climat d'une région.

REMERCIEMENTS

M. G. Der MEGREDITCHIAN m'a encouragé à faire cet article et M. A. PONS m'a aidé à l'améliorer par ses commentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- E. BÉNÉVENT (1926). — Le climat des Alpes françaises. *Mémorial de l'Office National Météorologique de France*, 14.
- G.E.P. BOX, G.H. JENKINS (1970). — Time-Series Analysis, Forecasting and Control, Holden-Day, San Fransisco. (rééd. 1976), 575 pp.

- F. BRIATTE (1982). — Traitement et analyse des relevés météorologiques utilisés par la dendroclimatologie en région méditerranéenne française, *rapport D.E.A.*, Lab. Bot. Hist. Paly., Marseille, 50 pp.
- C. CHATFIELD (1975). — *The Analysis of Time Series : Theory and Practice*. London. Chapman and Hall, 263 pp.
- C. CHATFIELD (1978). — Adaptive filtering : a critical assessment. *J. Oper. Res. Soc.*, 29, 891-896.
- PH. DAGET (1977). — Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio*, 34, 1-20.
- A. DOUGEDROIT, P. DELANNOY (1983). — Colloque *Eau Verte, Eau Bleue*, Marseille, septembre 1983.
- T.G.J. DYER (1975). — Assignment of stations into homogeneous groups. *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, 101, 1005-1012.
- T.G.J. DYER (1982). — On the intra-annual variation in rainfall over the subcontinent of Southern Africa. *Journal of Climatology*, 2, 47-64.
- J.P. FORTIN, G. MORIN, L. DUPONT (1982). — Variation saisonnière de l'homogénéité spatiale et de la structure régionale du Québec. *Océan et Atmosphère*, 227-241.
- S. GADGIL, N.V. JOSHI (1983). — Climatic clusters of the Indian region. *Journal of Climatology*, 3, 47-63;
- M. GARNIER (1974). — Longues séries de mesures de précipitations en France. *Mémorial de la Météorologie Nationale*, fascicule 4, Paris.
- C. GOOSSENS (1985). — Principal component analysis of mediterranean rainfall, *Journal of Climatology*, 5, 379-388.
- S. GREGORY (1975). — On the determination of regional patterns of recent climatic fluctuations. *Weather* 30, (9), pp. 276-288.
- J. GUIOT (1981). — Analyse mathématique de données géophysiques, application à la dendroclimatologie. *Thèse, Inst. Astr. Géoph.*, UCL, Louvain-La-Neuve, 170 pp. + 58 fig. h.t.
- J. GUIOT (1984). — *La mise en forme de séries climatiques : un procédé de vérification et de comblement de lacunes*. (En préparation).
- M. JAMBU, M.O. LEBEAUX (1978). — Classification automatique pour l'analyse des données (2 tonnes), Dunod, Paris.
- R.J. JOHNSTON (1981). — Regarding the delimitation of regions according to climatic fluctuations. *Arch. Met. Geoph. Biokl. B*, 29, 215-228.
- L. LEBART, A. MORINEAU, J.P. FENELON (1979). — Traitement des données statistiques, *méthodes et programmes*, Dunod, Paris, 510 pp.
- H. L'HERMIER DES PLANTES, B. THIEBAUT (1977). — Etude de la pluviosité au moyen de la méthode STATIS. *Revue de Statistiques Appliquées*, 25, 57-81.
- P. MAHERAS (1981). — La variabilité des précipitations dans la Mer Egée. *Arch. Met. Geoph. Biokl., B*, 29, 157-166.

- S. MAKRIDAKIS, S.C. WHEELWRIGHT (1977). — *Forecasting, Methods and Applications*. Wiley, Santa Barbara, 713 pp.
- J.P. MARCHAND (1979). — L'analyse d'un réseau pluviométrique dense par la méthode des nuées dynamiques, l'exemple irlandais. *Brouillons Dupont*, 4/1979, 47-57.
- S.E. NICHOLSON (1981). — Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Monthly Weather Review*, 109, 2191-2208.
- A. PERRY (1970). — Filtering climatic anomaly fields using principal component analysis. *Transaction Institute of British Geographers*, 50, 55-72.
- P. PESTIAUX, A.L. BERGER (1982). — Numerical methods in the search for periodicities and quasi-periodicities. *Institut d'Astronomie et de Géophysique, UCL, Louvain-La-Neuve, contribution 34*, 80 pp.
- M.B. PRIESTLEY (1981). — Spectral Analysis and Time Series. *Academic Press*, London, 890 pp.
- M.J. SALINGER (1980). — New Zealand Climate : I. Precipitation patterns. II. Temperature patterns. *Monthly Weather Review*, 108, 174-193.
- D. STEINER (1965). — A multivariate statistical approach to climatic regionalisation and classification. *Tijdschrift van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, 82, 329-347.
- R.C. TABONY (1981). — A principal component and spectral analysis of European rainfall. *Journal of Climatology*, 1, 238-294.
- T.M.L. WIGLEY, J.M. LOUGH, P.D. JONES (1984). — Spatial patterns of precipitation in England and Wales and a revised, homogeneous England and Wales precipitation series. *Journal of Climatology*, 4, 1-25.