

Analyse factorielle d'un processus de dépendance entre les épaisseurs des anneaux ligneux d'accroissement annuel chez *Pinus halepensis* Mill.

BERNARD ANS

*Laboratoire de Botanique analytique et Structuralisme végétal
Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme, C.N.R.S. (E.R. n° 161)
rue Henri-Poincaré, 13397 Marseille Cedex 4*

(Manuscrit reçu le 16 avril 1976)

RÉSUMÉ

L'épaisseur des anneaux ligneux d'accroissement annuel présentés par la section transversale du tronc des arbres est en général le reflet de l'intensité des facteurs climatiques. Beaucoup de travaux dendroclimatologiques montrent que l'épaisseur de l'anneau annuel peut également être liée à l'épaisseur de l'anneau relatif à l'année précédente. Il est proposé ici une méthode originale d'analyse des séries d'épaisseurs d'anneaux, utilisant l'apport de récents travaux sur l'analyse factorielle des correspondances, et permettant de *visualiser* les dépendances entre les épaisseurs d'anneaux consécutifs; cette méthode est exposée sur la base d'une masse de données d'épaisseurs d'anneaux ligneux annuels récoltées sur un lot de Pins d'Alep de la région de Marseille (France). La mise en évidence de cette liaison intrinsèque entre les épaisseurs de cernes consécutifs est fondamentale pour le dendroclimatologiste car elle représente en fait une *inertie* sur la sensibilité de l'arbre dans sa réponse aux sollicitations extérieures et doit à ce titre faire l'objet de la plus grande vigilance dans l'étude de la capacité du système d'anneaux à reproduire fidèlement des variations climatiques.

SUMMARY

*Width of annual growth rings presented by the cross-section of the trunk of trees is in general the reflection of the intensity of climatic factors. Many dendroclimatologic works show that the annual ring-width can be dependent also on the ring-width of the preceding year. Here, a novel method of analysis of ring-width series is proposed, using the recent works on the factor analysis of correspondences, which enables visualizing the dependences between consecutive ring-widths; this method is explained on the basis of a mass of annual ring-width data collected in a batch of *Pinus halepensis* in the vicinity of Marseille (France). The evidences of this intrinsic dependence between consecutive ring-widths is fundamental for the dendroclimatologist because it represents in fact an "inertia" of the sensitivity of the tree in its response to external stimuli and must, on these grounds, be the subject of the greatest vigilance in the study of the capacity of the ring-system to reflect accurately climatic changes.*

INTRODUCTION

La section transversale du tronc d'un arbre a en général l'aspect d'une succession de cernes ligneux concentriques; l'épaisseur d'un cerne est, en tout cas sous nos climats tempérés, le résultat de la croissance secondaire en épaisseur au cours d'une année. La courbe de la variation des épaisseurs successives des cernes d'accrois-

B. ANS

sement annuel en fonction des années présente une forme chaotique, en *dents de scie*, bien connue des spécialistes, et il n'est en général pas possible d'y déceler un ordre particulier sans le secours de méthodes numériques appropriées. Cette forme chaotique est en grande partie le reflet des différences climatiques entre les années successives et la *Dendroclimatologie*, domaine de recherche très développé, a justement pour objet d'étalonner l'appareil de mesure que constitue l'arbre en fonction des données climatiques actuelles afin de retrouver le climat des temps révolus à l'aide de très vieux arbres ou de fragments fossilisés, véritables mémoires climatiques.

La Dendroclimatologie du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en région marseillaise a déjà été étudiée en détail (SERRE, 1964; SERRE, LÜCK et PONS, 1966; SERRE, 1973). Bien entendu, pour que l'appareil de mesure du climat que doit constituer l'arbre, soit le plus fidèle possible il faut distinguer les variations d'épaisseur d'origine *endogène* (par exemple, influence de l'âge de l'arbre) de celles d'origine *exogène* (par exemple, humidité, température). C'est ainsi que des travaux ont été effectués, sur la base du matériel et des mesures de SERRE, qui mettent en évidence l'influence de l'âge de l'arbre sur l'épaisseur des anneaux ligneux (LÜCK, SERRE, VIDAL et ANS, 1970; LÜCK et ANS, 1972; ANS, 1973). Motivés à la fois, par ce même souci de distinguer les variations d'épaisseur d'origine exogène de celles d'origine endogène, et par la préoccupation de bien isoler dans le temps l'influence du climat, beaucoup de travaux dendroclimatologiques montrent que l'épaisseur du cerne annuel est non seulement liée aux facteurs climatiques de l'année de sa formation mais aussi liée à l'épaisseur du cerne précédent (FRITTS, 1962, 1971, 1974; FRITTS, SMITH et STOKES, 1965; FRITTS, SMITH, CARDIS et BUDELSKY, 1965; FRITTS, BLASING, HAYDEN et KUTZBACH, 1971). En ce qui concerne plus particulièrement les travaux effectués sur le Pin d'Alep, SERRE (1973) montre aussi que les données météorologiques annuelles ne suffisent pas à expliquer à elles seules la variation des épaisseurs des anneaux ligneux et qu'il est nécessaire d'y incorporer la variable *épaisseur du cerne précédent*.

Le présent travail a un double objectif. Le premier est, sur la base des mesures d'épaisseur de SERRE, de montrer directement la liaison existant, chez les Pins d'Alep considérés, entre les épaisseurs de deux cernes consécutifs, et ceci au moyen d'une méthode d'analyse multidimensionnelle. Plusieurs méthodes numériques, souvent très élaborées, sont couramment employées dans ce sens, en particulier dans les travaux déjà cités de FRITTS *et al.*; ici, une méthode est présentée utilisant l'apport des récents travaux de BENZECRI *et al.* (1973) sur l'*analyse factorielle des correspondances*, qui a donné lieu ces dernières années à des applications remarquables dans des domaines très variés de la recherche. La présentation de la méthode d'analyse des séries d'épaisseurs d'anneaux ligneux, utilisée ici, est en elle-même le deuxième objectif de cette étude.

MATÉRIEL ET MESURES EFFECTUÉES (1)

24 Pins d'Alep, soumis à des conditions écologiques similaires, ont été choisis dans la région de Marseille (6 arbres de 140 ans, 6 arbres de 100 ans, 6 arbres de 80 ans et 6 arbres de 60 ans). Pour accéder, sans couper ces arbres, à l'image de la section transversale de leur tronc, des prélè-

(1) Le choix des arbres, les prélèvements, l'inter-datation et les mesures d'épaisseur des cernes, ont été effectués par F. SERRE, Chargé de Recherche au C.N.R.S., Laboratoire de Botanique historique et Palynologie, Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme, Marseille. Ce matériel utilisé pour ses propres travaux dendroclimatologiques nous a été très amicalement prêté par F. SERRE.

ANALYSE FACTORIELLE D'ÉPAISSEURS D'ANNEAUX LIGNEUX

vements sous forme de *carotte* ont dû être effectués, à la même hauteur pour chaque individu, et ceci suivant trois directions distantes angulairement de 120° , correspondant à peu près aux directions N, ESE et OSO. Sur chaque carotte les cernes ont été datés et leur épaisseur mesurée. La figure 1 montre un exemple de la variation d'épaisseur de 120 cernes ligneux d'une carotte.

Dans la présente étude, seuls les 40 derniers cernes (ceux relatifs aux années 1928 à 1967) ont été considérés sur chacune des 72 carottes (3 carottes sur 24 arbres) et dans ce qui suit le terme de carotte sera désormais entendu dans le sens de partie de carotte comprenant les 40 derniers cernes; d'autre part, une carotte, où beaucoup de cernes manquent du fait de la présence d'un nœud, a été rejetée. Les 2 840 mesures d'épaisseur (71 carottes de 40 cernes) ont été réparties dans un tableau de mesures à 40 lignes (les années de 1928 à 1967) et 71 colonnes (les carottes). Sur la totalité de ce tableau, noté tableau A, les épaisseurs varient sur un intervalle de variation allant de 0 à 9 mm environ.

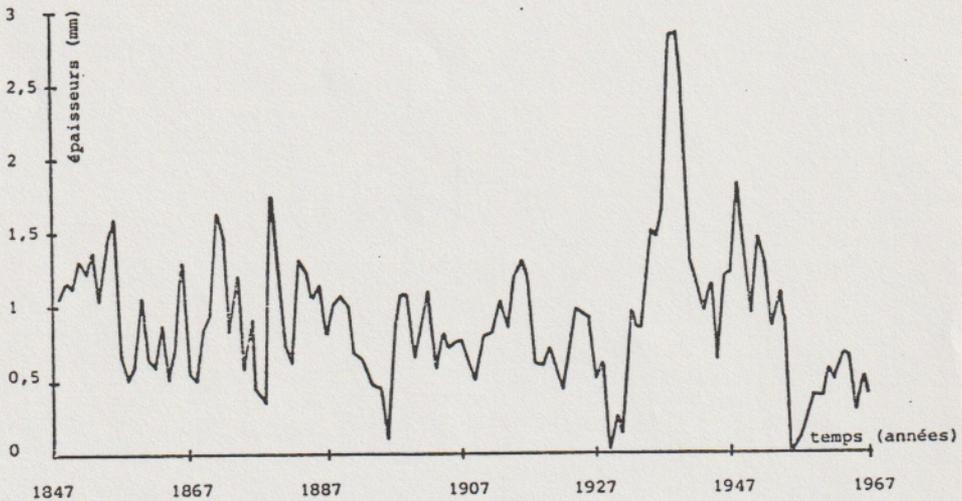


FIG. 1. — Variation annuelle de l'épaisseur des anneaux ligneux observée chez un Pin d'Alep de la région de Marseille (carotte Nord, 1848 à 1967).

ANALYSE ET RÉSULTATS

Comme annoncé dans l'introduction, le problème à traiter est la mise en évidence d'une liaison entre les épaisseurs de deux cernes consécutifs. Il est évidemment très difficile de faire apparaître cette liaison sur une seule carotte car dans nos échantillons 40 cernes ne suffisent pas à déceler un ordre moyen dans le caractère en apparence très chaotique de la succession des épaisseurs (même d'ailleurs dans le cas de la carotte de la figure 1 relative à 120 cernes). Aussi est-il souhaitable de travailler sur un très grand nombre de cernes en considérant un lot important de carottes prélevées sur des arbres distincts, ce qui est le cas pour les données consignées dans le tableau A.

Très schématiquement, le plan général de l'analyse qui va être effectuée est le suivant. Après avoir substitué dans le tableau A à chaque mesure d'épaisseur de cerne l'appartenance à une classe d'épaisseur ou note d'intensité (10 classes numérotées de 1 à 10 dans l'ordre croissant des épaisseurs), la méthodologie poursuivie

B. ANS

reviendra finalement à poser la question : est-ce qu'un cerne de telle classe est le plus fréquemment suivi par un cerne appartenant à la même classe ou à une classe très voisine ?

Un découpage en classes d'épaisseur a donc préalablement été effectué. Mais celui-ci n'a pas directement été effectué sur l'intervalle de variation (0 à 9 mm) du tableau *A* de données initiales mais sur l'intervalle de variation (0 à 6) d'un tableau *A'* obtenu en divisant chaque épaisseur de cerne du tableau *A* par la moyenne des épaisseurs de la carotte à laquelle ce cerne appartient, et ceci pour les raisons suivantes.

TABLEAU

Tableau de fréquences k_{ij} soumis à l'analyse

Le tableau k_{ij} se lit de la manière suivante : $k_{ij}(7,3^-) = 10$ [resp. $k_{ij} = (8,6^+) = 21$], est le nombre de fois qu'un cerne de classe 3 (respect. de classe 6) a été trouvé être prédécesseur immédiat (respect. successeur) d'un cerne de classe 7 (respect. de classe 8).

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1 ⁻	1 ⁺	2 ⁻	2 ⁺	3 ⁻	3 ⁺	4 ⁻	4 ⁺	5 ⁻	5 ⁺	6 ⁻	6 ⁺	7 ⁻	7 ⁺	8 ⁻	8 ⁺	9 ⁻	9 ⁺	10 ⁻	10 ⁺
1	95	95	90	58	57	64	29	42	12	14	3	12	4	2	1	2	1	1	0	3
2	58	90	114	114	127	113	66	64	18	31	14	16	5	3	6	5	4	1	0	2
3	64	57	113	127	147	147	111	120	59	51	25	29	10	10	3	5	3	2	3	0
4	42	29	64	66	120	111	131	131	66	97	42	44	28	19	6	1	5	3	2	0
5	14	12	31	18	51	59	97	66	76	76	46	64	28	30	10	12	2	5	2	2
6	12	3	16	14	29	25	44	42	64	46	67	67	27	41	21	24	7	7	3	4
7	2	4	3	5	10	10	19	28	30	28	41	27	27	27	22	19	12	19	7	3
8	2	1	5	6	5	3	1	6	12	10	24	21	19	22	7	7	12	10	3	3
9	1	1	1	4	2	3	3	5	5	2	7	7	19	12	10	12	22	22	6	9
10	3	0	2	0	0	3	0	2	2	2	4	3	3	7	3	3	9	6	9	9

Il y a des carottes où tous les cernes sont systématiquement épais et d'autres où tous les cernes sont systématiquement étroits (différence de vitesse de croissance entre les arbres jeunes et vieux, entre arbres de même âge, entre les trois directions de sondage sur le même individu); si un classement avait été effectué sur l'intervalle de variation des données brutes, certaines carottes auraient eu tous leurs cernes groupés dans une seule classe ou dans très peu de classes et dans la suite de l'analyse, telle qu'elle a été esquissée dans les premières lignes de ce paragraphe, nous aurions évidemment trouvé, au moins pour certaines carottes, qu'un cerne de classe donnée est pratiquement toujours suivi par un cerne de la même classe ou de la classe voisine, résultat issu d'un mauvais classement et non d'une liaison intrinsèque dans la succession temporelle des épaisseurs. Aussi, avant tout classement, il a donc fallu opérer dans chaque colonne du tableau *A* à une correction de niveau. Or, les moyennes et écarts-types relatifs aux colonnes du tableau *A* ont été trouvés vérifiant bien une loi de proportionnalité, c'est-à-dire que si $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \dots, \mu_{71}$ et $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n, \dots, \sigma_{71}$ sont respectivement les 71 moyennes et écarts-types des 40 épaisseurs

ANALYSE FACTORIELLE D'ÉPAISSEURS D'ANNEAUX LIGNEUX

pour chacune des 71 carottes, alors $\sigma_n \approx 2/3 \mu_n$ (proportionnalité entre la vitesse moyenne de croissance en épaisseur et la sensibilité aux fluctuations climatiques). Quelques chiffres pour donner une idée de l'ordre de grandeur des moyennes et écarts-types : $\mu \approx 0,4$ mm et $\sigma \approx 0,25$ pour les plus petites carottes, $\mu \approx 3$ mm et $\sigma \approx 2$ pour les plus grandes. Sous ces conditions, si la correction de niveau consiste à diviser chaque épaisseur de cerne de la colonne n du tableau A par μ_n , et ceci pour tout n , alors les colonnes du nouveau tableau A' de données corrigées ont toutes une moyenne égale à 1 et un écart-type voisin de $2/3$. Le découpage en classes a donc été effectué sur ce tableau A' dont l'intervalle de variation totale a été divisé en 10 classes numérotées de 1 à 10 dans l'ordre croissant des épaisseurs corrigées; ensuite chaque donnée numérique de ce tableau a été remplacée par le numéro de la classe à laquelle elle appartient. Ainsi, un nouveau tableau a été obtenu, le tableau T , ne comportant que les nombres entiers de 1 à 10. Il a été vérifié que tous les numéros de classe étaient bien représentés dans chacune des colonnes de T , ce qui est une conséquence de la correction de niveau et de dispersion effectuée⁽²⁾; dans ces conditions, dans chacune des colonnes du tableau T un cerne de classe donnée peut être *a priori* suivi d'un cerne appartenant à n'importe quelle classe, sauf bien sûr, et c'est l'objet de ce travail, s'il y a effectivement une liaison intrinsèque entre les anneaux ligneux consécutifs.

Le tableau T se présente donc sous la forme de 71 suites, chacune de ces suites représentant la succession dans le temps de 40 épaisseurs de cernes consécutifs, épaisseurs notées en terme de classe (ou note d'intensité). Soit I l'ensemble des classes d'épaisseur ($i = 1, 2, \dots, 10$); chaque élément du tableau T appartient à I . Nous nous sommes intéressés dans le tableau T à tous les couples de 2 éléments consécutifs (i, i') rencontrés en parcourant toutes les colonnes de ce tableau de haut en bas (couples de 2 cernes consécutifs). Un tableau de fréquences, noté k_{II} , a été construit; ce tableau de dimension 10×10 a pour terme général, $k_{II}(i, i')$, nombre de fois que i' a été trouvé être *successeur* immédiat de i . A partir de k_{II} a été formé un deuxième tableau, le tableau k_{IJ} , où l'ensemble J est défini comme suit : $J = I^+ \cup I^- =$ ensemble I dédoublé ou ensemble des i considérés, soit comme *successeurs* (i^+), soit comme *prédécesseurs* (i^-). Le tableau k_{IJ} de dimension 10×20 (voir tableau) a pour terme général,

$$k_{IJ}(i, i'^+) = k_{II}(i, i'); \quad k_{IJ}(i, i'^-) = k_{II}(i', i).$$

Pour plus de clarté, $k_{IJ}(i, i'^+)$ est le nombre de fois que i' a été trouvé être successeur immédiat de i et $k_{IJ}(i, i'^-)$ est le nombre de fois que i' a été trouvé être prédécesseur immédiat de i . La construction du tableau k_{IJ} a été inspirée par une étude faite par BENZECRI *et al.* (1973, t. I, page 45, § 5) sur l'analyse factorielle d'un processus aléatoire.

Le tableau k_{IJ} a été soumis à une analyse factorielle des correspondances. La figure 2 donne l'image de la représentation simultanée des ensembles I et J mis en correspondance, représentation limitée aux deux premiers facteurs qui extraient

(2) Il aurait été équivalent d'adopter comme correction des données du tableau A l'écart à la moyenne de la colonne rapporté à l'écart-type de cette colonne, ou écart-réduit, ce qui aurait conduit à un tableau A' avec des moyennes et écarts-types de colonne égaux respectivement à 0 et 1. Mais la relation de proportionnalité qui a été utilisée entre moyennes et écarts-types ayant été établie par nous avant même d'aborder la présente étude, il a été jugé plus commode de choisir dans nos programmes de calcul de simples rapports à la moyenne connaissant à l'avance l'équivalence des deux modes de transformation.

B. ANS

à eux seuls 85% de l'inertie totale. L'observation des proximités entre les points appartenant aux deux ensembles I et J présente un grand intérêt. En effet, les points des ensembles I , I^+ , I^- relatifs à la même classe (le même i) sont remarquablement groupés en îlots bien séparés. Ce type de correspondance s'interprète aisément de

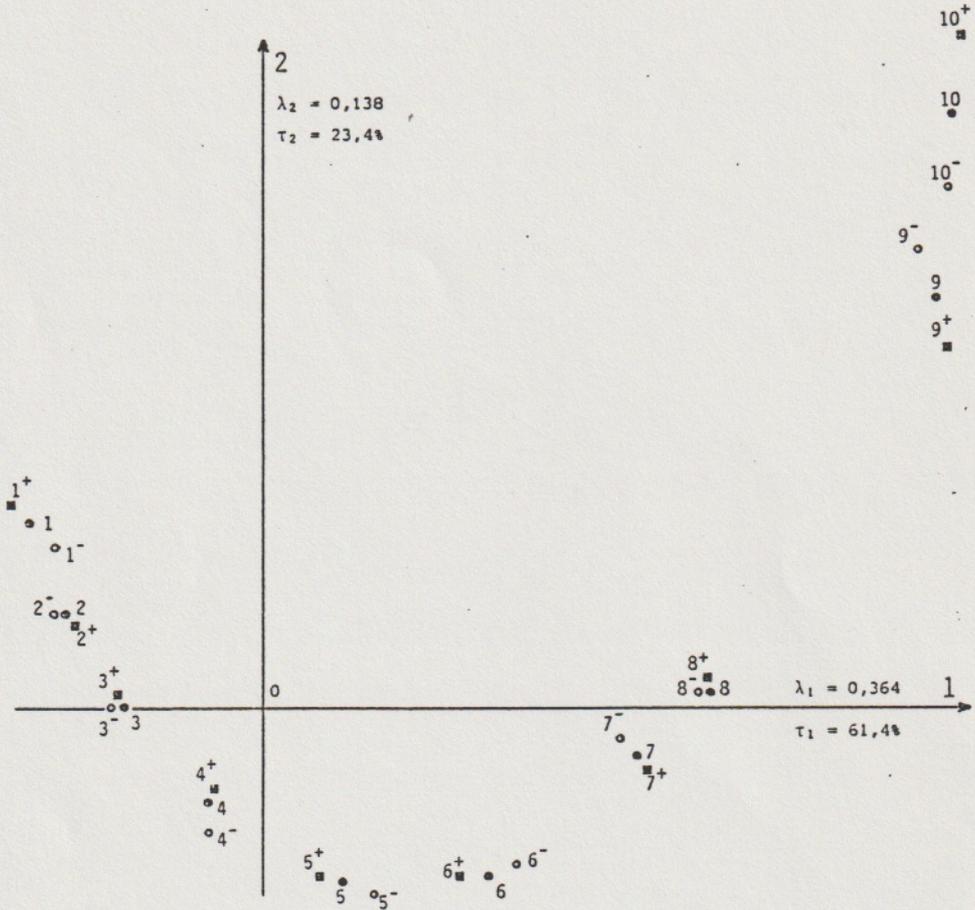


FIG. 2. — Représentation simultanée des ensembles I et J (avec $J = I^+ \cup I^-$) dans le plan rapporté aux deux premiers axes factoriels (facteurs 1 et 2), où, $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, 10\}$ ensemble des classes d'épaisseur i (\blacksquare); $I^+ = \{1^+, 2^+, \dots, i^+, \dots, 10^+\}$ ensemble des i considérés comme *successeurs* (\circ); $I^- = \{1^-, 2^-, \dots, i^-, \dots, 10^-\}$ ensemble des i considérés comme *prédécesseurs* (\circ).

la manière suivante : un cerne de classe donnée i_0 est le plus souvent suivi par un cerne de classe i_0 et précédé d'un cerne de cette même classe i_0 , ou en d'autres termes, l'épaisseur du cerne de l'année $n + 1$ a en moyenne tendance à être voisine de celle du cerne précédent relatif à l'année n .

Que dire au sujet de l'interprétation des facteurs extraits ? Sûrement pas grand chose de plus que ce qui est contenu dans le résultat principal qui vient d'être énoncé puisque nous travaillons finalement sur une seule variable biologique : l'épaisseur

ANALYSE FACTORIELLE D'ÉPAISSEURS D'ANNEAUX LIGNEUX

de l'anneau ligneux. Examinons cependant de plus près ces deux facteurs pour au moins tenter d'expliquer l'allure remarquable, en croissant parabolique, du graphique plan de la figure 2. Les nuages des points des ensembles I et J se projettent d'une manière ordonnée sur le premier axe factoriel (classe 1, classe 2, ..., classe 10). Tenant compte de ce qui vient d'être déduit dans la représentation simultanée, ce facteur peut s'interpréter comme exprimant de la manière la plus simple les rapports moyens de voisinage entre cernes successifs : un cerne de classe i est suivi ou précédé le plus fréquemment par un cerne de classe i ou $i + 1$ ou $i - 1$. Il exprime d'une certaine manière une *gradation* générale. Le deuxième facteur oppose les classes moyennes aux classes extrêmes; il exprime lui aussi cette même gradation mais d'une manière différente : un cerne d'une certaine classe est suivi ou précédé par un cerne appartenant soit à la même classe soit à une classe un peu plus « moyenne » ou un peu plus « extrême ». L'allure en croissant parabolique dans les deux représentations des nuages des points indique que le deuxième facteur est fonction quadratique du premier facteur. Nous touchons là au phénomène général de l'effet Guttman qui survient souvent quand le phénomène sous-jacent à un tableau de données multidimensionnelles est essentiellement monodimensionnel (dans le cas de notre étude la variable monodimensionnelle sous-jacente est la gradation temporelle des épaisseurs déjà évoquée). Les facteurs étant forcément fonctions de l'unique variable (dans le cas présent, les deux premiers facteurs expriment de deux manières différentes la même gradation générale) sont de ce fait liés fonctionnellement entre eux. Comme en analyse factorielle deux facteurs ne peuvent pas être liés linéairement il reste qu'ils peuvent être liés d'une manière quadratique, cubique, etc. Ainsi est-il fréquent dans les cas semblables à celui étudié ici de voir le deuxième facteur fonction du second degré du premier facteur (parabole), le troisième facteur fonction du troisième degré du premier, etc.

CONCLUSION ET DISCUSSION

La mise en évidence de cette liaison entre les épaisseurs des cernes successifs (liaison qui semble remarquablement forte chez les Pins d'Alep étudiés) est fondamentale pour le dendroclimatologiste car celle-ci représente en fait une sorte d'inertie sur la sensibilité de l'arbre dans sa réponse aux sollicitations extérieures et doit à ce titre faire l'objet de la plus grande vigilance dans l'étude de la capacité du système d'anneaux ligneux à reproduire fidèlement des variations climatiques. Ce type de liaison a déjà été mis en évidence sur d'autres espèces par les auteurs déjà cités et en particulier sur le Pin d'Alep par SERRE (1973). Dans le présent travail, le premier objectif poursuivi était de faire apparaître directement cette liaison chez les Pins d'Alep sur la seule base des données d'épaisseur, sans considération préalable du facteur *année* (facteur climatique). Le deuxième objectif était de proposer pour les travaux dendroclimatologiques une méthode originale d'analyse de séries d'épaisseurs d'anneaux ligneux permettant de mettre clairement et directement en évidence ce type de liaison. D'autres méthodes existent permettant de mettre en évidence des liaisons dans les séries temporelles et sont d'ailleurs largement utilisées (par exemple autocorrélation). Mais dans ce travail le but poursuivi n'était pas tellement de chiffrer des degrés de liaison en effectuant des calculs de coefficients accompagnés de tests (tests dont la validité est le plus souvent soumise à des hypothèses fortes devant être vérifiées par les données), mais plutôt de proposer d'utiliser des méthodes d'analyse à fort pouvoir descriptif permettant à l'utilisateur, en s'en servant comme d'un véritable instrument d'observation, d'avoir d'une manière aisément observable,

B. ANS

visualisable, une idée assez précise du phénomène sous-jacent de la liaison intrinsèque entre épaisseurs d'anneaux consécutifs, afin d'en être immédiatement alerté avant toute recherche dendroclimatologique ultérieure plus fine et quantitative. Bien entendu, le choix de l'analyse des correspondances comme algorithme privilégié est justifié par certaines de ses propriétés remarquables :

- rôles symétriques affectés à chacun des deux ensembles analysés permettant d'avoir des règles d'interprétation des proximités identiques pour les deux ensembles;
- équivalence distributionnelle permettant d'avoir des résultats les plus intrinsèques possible, c'est-à-dire les plus indépendants possible du choix des nomenclatures arbitraires choisies pour caractériser les deux ensembles;
- méthode d'analyse pouvant être considérée comme la recherche de la meilleure représentation simultanée de deux ensembles, rendant plus aisée l'interprétation des résultats et la lecture directe;
- hypothèses d'application faibles, permettant parfois d'avoir des résultats meilleurs que ceux fournis par des méthodes apparemment mieux adaptées aux données initiales mais faisant appel à des hypothèses plus fortes.

Il faut en outre remarquer que l'analyse telle qu'elle a été menée au cours de ce travail ne peut s'employer telle quelle dans tous les cas d'application. En effet, il est connu que l'épaisseur des cernes annuels a en moyenne tendance à décroître au fur et à mesure que l'arbre vieillit; c'est en particulier le cas pour le Pin d'Alep (LÜCK, SERRE, VIDAL et ANS, 1970; LÜCK et ANS, 1972; ANS, 1973). Dans le présent travail ont été considérées des portions de carotte de 40 cernes prélevées sur des arbres de 60, 80, 100 et 140 ans; mais sur 40 cernes, cette décroissance est chez le Pin d'Alep très faible et le rapport de l'épaisseur brute à la moyenne des épaisseurs des 40 cernes de la carotte suffit amplement à tenir compte de cet effet d'âge quand on passe, par exemple, d'une carotte prélevée sur un arbre de 60 ans à un autre prélevée sur un arbre de 140 ans. Par contre, dans le cas éventuel de l'application de cette méthode à, par exemple, une seule carotte comportant plusieurs centaines d'anneaux ligneux, il serait recommandé de considérer des données corrigées obtenues en effectuant le rapport de chaque épaisseur brute avec la valeur théorique correspondante donnée par une ligne moyenne marquant la décroissance globale progressive des épaisseurs des cernes au cours du temps (ajustement obtenu par la méthode des moindres carrés, par exemple).

BIBLIOGRAPHIE

- ANS B., 1973. — Recherche de la forme de la variation endogène annuelle de l'épaisseur des anneaux ligneux chez *Pinus halepensis* Mill. *Flora*, 162, 335-351.
- BENZECRI J.-P. (ouvrage collectif), 1973. — *L'Analyse des données*, 2 vol., Dunod éd., Paris.
- FRITTS H. C., 1962. — An approach to dendroclimatology: screening by means of multiple regression techniques. *J. Geophys. Res.*, 67, 1413-1420.
- FRITTS H. C., SMITH D. G., CARDIS J. W. et BUDELSKY A., 1965. — Tree-ring characteristic along a vegetation gradient in northern Arizona. *Ecology*, 46, 393-401.
- FRITTS H. C., SMITH D. G. et STOKES M. A., 1965. — The biological model for paleoclimatic interpretation of Mesa Verde tree-ring series. *Antiquity*, 31, 101-121.
- FRITTS H. C., 1971. — Dendroclimatology and Dendroecology. *Quaternary Research*, 1, 419-449.

ANALYSE FACTORIELLE D'ÉPAISSEURS D'ANNEAUX LIGNEUX

- FRITTS H. C., BLASING T. J., HAYDEN B. P. et KUTZBACH J. E., 1971. — Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate. *J. applied Met.*, 10, 845-864.
- FRITTS H. C., 1974. — Relationships of ring widths in arid-site conifers to variations in monthly temperature and precipitation. *Ecolog. Monogr.*, 44, 411-440.
- LÜCK H. B., SERRE F., VIDAL B. et ANS B., 1970. — A propos d'un modèle sur la croissance en épaisseur des arbres. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 270, 1966-1999.
- LÜCK H. B. et ANS B., 1972. — Sur les variations de l'épaisseur des cernes d'accroissement annuel de *Pinus halepensis* Mill. *Bull. Groupe d'Étude Rythm. Biol.*, 4, 43-51.
- SERRE F., 1964. — Une nouvelle méthode d'interdatation des anneaux ligneux. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 259, 3603-3606.
- SERRE F., LÜCK H. B. et PONS A., 1966. — Premières recherches sur les relations entre les variations des anneaux ligneux chez *Pinus halepensis* Mill. et les variations annuelles du climat. *Œcol. Plant.*, 1, 117-136.
- SERRE F., 1973. — Contribution à l'étude Dendroclimatologique du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). *Thèse Doct. d'État Sc. Nat.*, Université d'Aix-Marseille III, n° C.N.R.S. A.O. 7298.