Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 71 (1978)

Heft: 3

Artikel: Traitement analytique "manuel" et algorithmique de problèmes complexes de corrélations biochronologiques

Autor: Davaud, Eric / Guex, Jean

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164746

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 71/3	Pages 581-610	6 figures et 2 tableaux dans le texte et 1 planche	Bâle, novembre 1978

Traitement analytique «manuel» et algorithmique de problèmes complexes de corrélations biochronologiques[1])

Par ERIC DAVAUD[2]) et JEAN GUEX[3])

RÉSUMÉ

Un aspect important du problème général posé par les corrélations biochronologiques réside dans la mise en évidence d'une image exacte des relations d'association et d'exclusion entre les espèces fossiles: on décrit ici une méthode qui permet de traiter ce problème avec ou sans l'aide d'un ordinateur pour un grand nombre d'espèces provenant de multiples localités. La zonation du Paléocène et de l'Eocène de Californie à l'aide du nannoplancton est étudiée ici à titre d'exemple.

PREMIÈRE PARTIE

La zonation du Paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen de Californie à l'aide du nannoplancton

Par JEAN GUEX

1. Introduction

Lorsqu'on cherche à établir une échelle de temps relative à l'aide du contenu fossile des roches sédimentaires, on se heurte à deux difficultés majeures: la première tient au caractère sporadique et fragmentaire de la documentation paléontologique et la deuxième est liée aux facteurs écologiques qui contrôlent la distribution des faunes.

L'interprétation des problèmes biostratigraphiques découlant des erreurs de nomenclature ou liés aux condensations, aux remaniements, à l'insuffisance documentaire, aux homéomorphies et au contrôle écologique sur la distribution des espèces a été discutée par GUEX 1977 (p. 319 et suiv.) et par GUEX 1978*a* et *b:* ces questions ne seront pas abordées ici.

La présente discussion sera limitée au problème suivant: comment établir une image correcte des relations de distribution spatiale des espèces fossiles dont on ne connaît pas les liens phylogénétiques lorsqu'on travaille sur un grand nombre de groupes?

---

[1]) Etude achevée dans le cadre des projets 2.766.077 et 2.024.078 du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

[2]) Laboratoire de Géologie, Maraîchers 13, CH-1211 Genève 4 (Suisse).

[3]) Institut de Géologie, Palais de Rumine, CH-1005 Lausanne (Suisse).

Avant de résumer la méthode proposée par GUEX 1977 pour un nombre réduit d'espèces, il est nécessaire de donner ici les principales définitions qui vont être utilisées.

2. Définitions

1. *Le spectre d'association d'une espèce «X»:* C'est l'ensemble des espèces qui ont été trouvées associées (en un endroit au moins) à l'espèce *X*. Cet ensemble inclut *X*.
2. *Le spectre d'exclusion d'une espèce «X»:* C'est l'ensemble des espèces qui n'ont nulle part été trouvées associées à l'espèce *X*.
3. *La compatibilité:* Deux espèces sont dites compatibles si elles ont coexisté. Un ensemble d'espèces est dit «compatible» si toutes les espèces qui appartiennent à cet ensemble ont coexisté (quelle que soit la paire considérée à l'intérieur de cet ensemble).
4. *L'association unitaire:* Une association unitaire est un ensemble maximum d'espèces compatibles.
5. *L'intervalle de coexistence:* C'est la durée de coexistence d'une association d'espèces. Il est trivial de noter que l'intervalle d'existence d'une espèce est plus grand que (ou égal à) l'intervalle de coexistence de deux ou plusieurs espèces.
6. *L'intervalle de séparation:* C'est l'intervalle qui sépare la disparition d'une espèce appartenant à une association unitaire de l'apparition d'une espèce nouvelle appartenant à l'association unitaire suivante.
7. *L'omni-association:* Si, dans le cadre d'un problème restreint, une espèce a été trouvée associée à toutes les autres, on dira qu'elle est omni-associée: une telle espèce n'apporte aucune information chronologique.
8. *L'horizon local:* Dans une coupe stratigraphique isolée, on dira qu'une faune (i.e. un assemblage d'espèces) caractérise un «horizon local» si, dans le cadre d'une étude limitée à cette coupe, elle satisfait la définition d'une association unitaire. L'horizon local est donc un niveau sédimentaire qui contient un ensemble maximum d'espèces compatibles (fig. 1).
9. *L'équivalent permutatoire:* Deux espèces sont dites équivalentes au plan permutatoire si elles ont le même spectre d'association et d'exclusion.
10. *L'échelle biochronologique:* C'est l'image indéfiniment perfectible d'une succession irréversible d'intervalles de coexistence d'espèces mutuellement exclusifs.

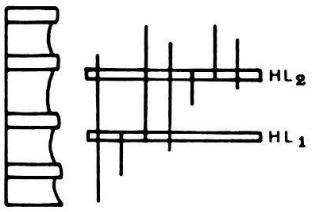


Fig. 1. Schéma montrant la distribution stratigraphique de 7 espèces dans un profil hypothétique. Toutes les espèces ont des distributions verticales différentes mais leurs relations d'association et d'exclusion n'engendrent que deux «horizons locaux» (HL_1 et HL_2).

3. Résumé de la méthode

Il découle des définitions 4 et 5 que:

a) une association unitaire contenant n espèces caractérise l'intervalle de coexistence de ces n espèces,
b) une association unitaire se distingue de toutes les autres par l'exclusion mutuelle de deux espèces au moins.

L'association unitaire peut donc correspondre à une «unité» de temps «relatif» (cf. annotation 1), conformément à la définition de l'échelle biochronologique (n° 10). Le problème que l'on cherche à résoudre peut donc être formulé ainsi: comment mettre en évidence ces petits intervalles de «temps relatif»?

a) Les spectres d'association et d'exclusion

Avant de pouvoir identifier une association unitaire, il est nécessaire de connaître la totalité des relations d'association et d'exclusion entre les espèces dont on veut établir les relations d'antériorité et de postériorité. On commencera donc par établir le spectre d'association et d'exclusion de chaque espèce. Cette première étape est fort simple.

On considère d'abord séparément chaque espèce en faisant l'inventaire de toutes les espèces avec lesquelles elle a été trouvée en association; on transcrit ensuite ces données dans une matrice carrée dont le nombre de lignes correspond au nombre d'espèces étudiées; chaque case de cette matrice correspond à une paire d'espèces.

Exemple: La figure 2 montre la distribution stratigraphique de 11 espèces (1, 3, 5, ..., 87) dans 10 coupes (*A* à *J*). On voit que l'espèce 1 a été trouvée associée aux espèces 6, 9, 25, 26, 29, 53, 59 et 87. Elle n'a en revanche pas été trouvée avec les espèces 3 et 5.

Les relations d'association et d'exclusion de l'espèce 1 peuvent ainsi être compilées dans la matrice illustrée à la figure 3*a* (en blanc: associations; en noir: exclusions): sur la première ligne on note que cette espèce est incompatible avec les espèces 3 et 5 (blocs noirs).

On procède ainsi pour toutes les espèces successivement.

b) Les associations unitaires

Il est évident que si une espèce X est trouvée associée à des espèces Y, Z et W, cela signifie qu'au cours de sa durée d'existence totale, X a coexisté avec Y, Z et W. Cela ne signifie pas que les espèces Y, Z et W ont coexisté entre elles. Dans notre exemple (fig. 2) on voit que l'espèce 1 a été trouvée associée aux espèces 6, 9 et 59 mais ni 6, ni 9 n'ont existé avec 59. Pour mettre en évidence des ensembles d'espèces totalement compatibles il est donc nécessaire de chercher, pour chaque spectre d'association, quelles sont les espèces qui ont effectivement coexisté entre elles.

Pour obtenir le résultat recherché, il suffit de permuter les lignes de la matrice a (fig. 3) en juxtaposant les spectres d'association (fig. 3, a_1) qui possèdent le plus d'espèces communes et en éloignant ceux qui contiennent le plus d'espèces mutuellement exclusives.

Dans l'exemple étudié ici, un examen sommaire du tableau de distribution stratigraphique des espèces (fig. 2) permet de constater que les espèces 3 et 5 se trouvent dans la partie inférieure des profils *A* à *J* alors que les espèces 1 et 6 se trouvent toujours dans leur partie supérieure. Au début du processus de permutation (fig. 3, $a_1 \rightarrow a_2$), on placera donc les spectres d'association des espèces 3 et 5 en bas et ceux des espèces 1 et 6 en haut. Ensuite on arrangera les spectres d'association des autres espèces de manière à ce que leurs connexions soient respectées au mieux.

Une bonne solution de permutation est illustrée dans la figure 3, a_2. Cette permutation donne la matrice carrée *b*. On voit que cette matrice est encore désor-

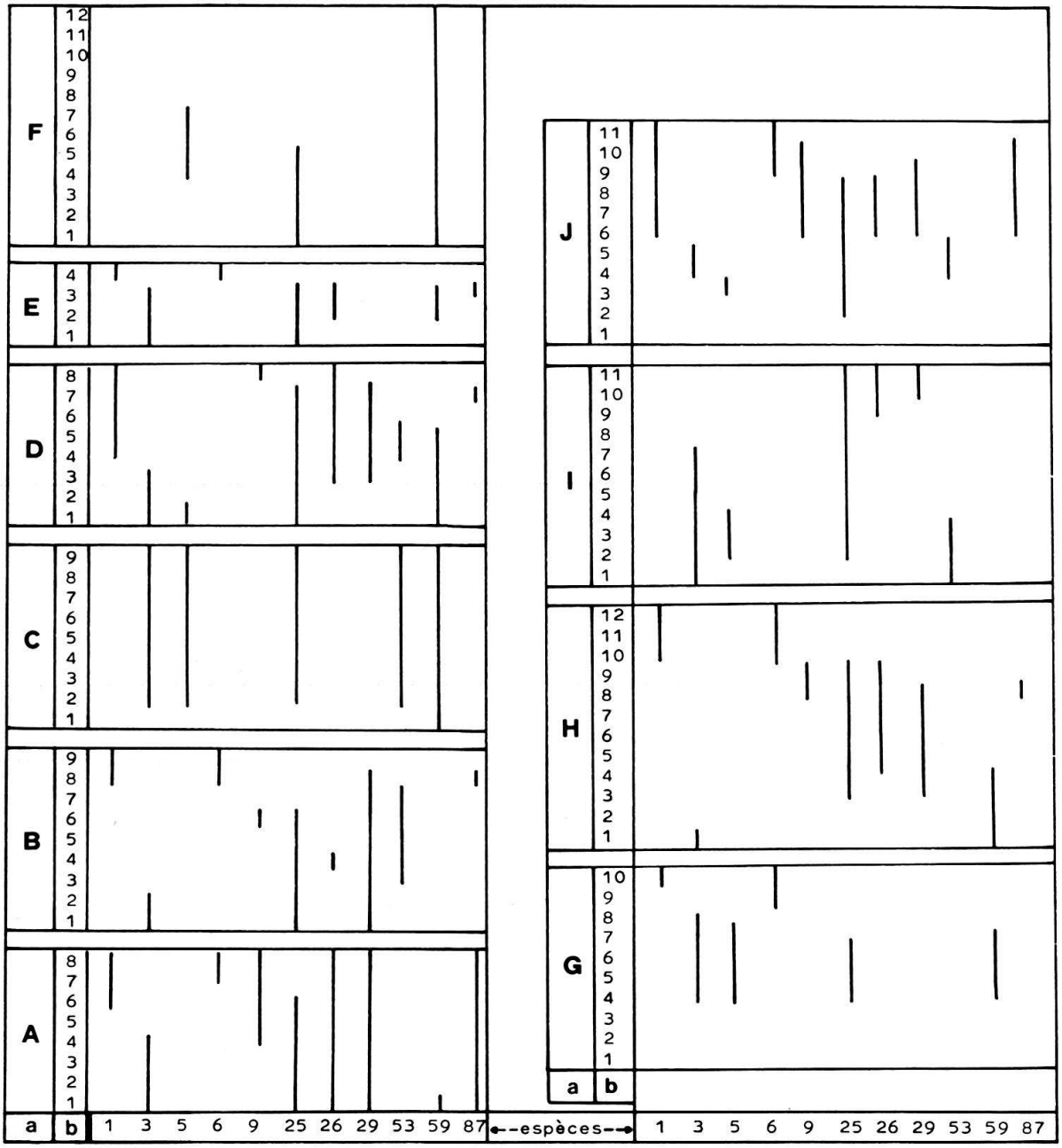


Fig. 2. Tableau montrant la distribution verticale de 11 espèces (1 à 87) dans 10 profils stratigraphiques. *a* = profils *A* à *J*; *b* = niveaux.

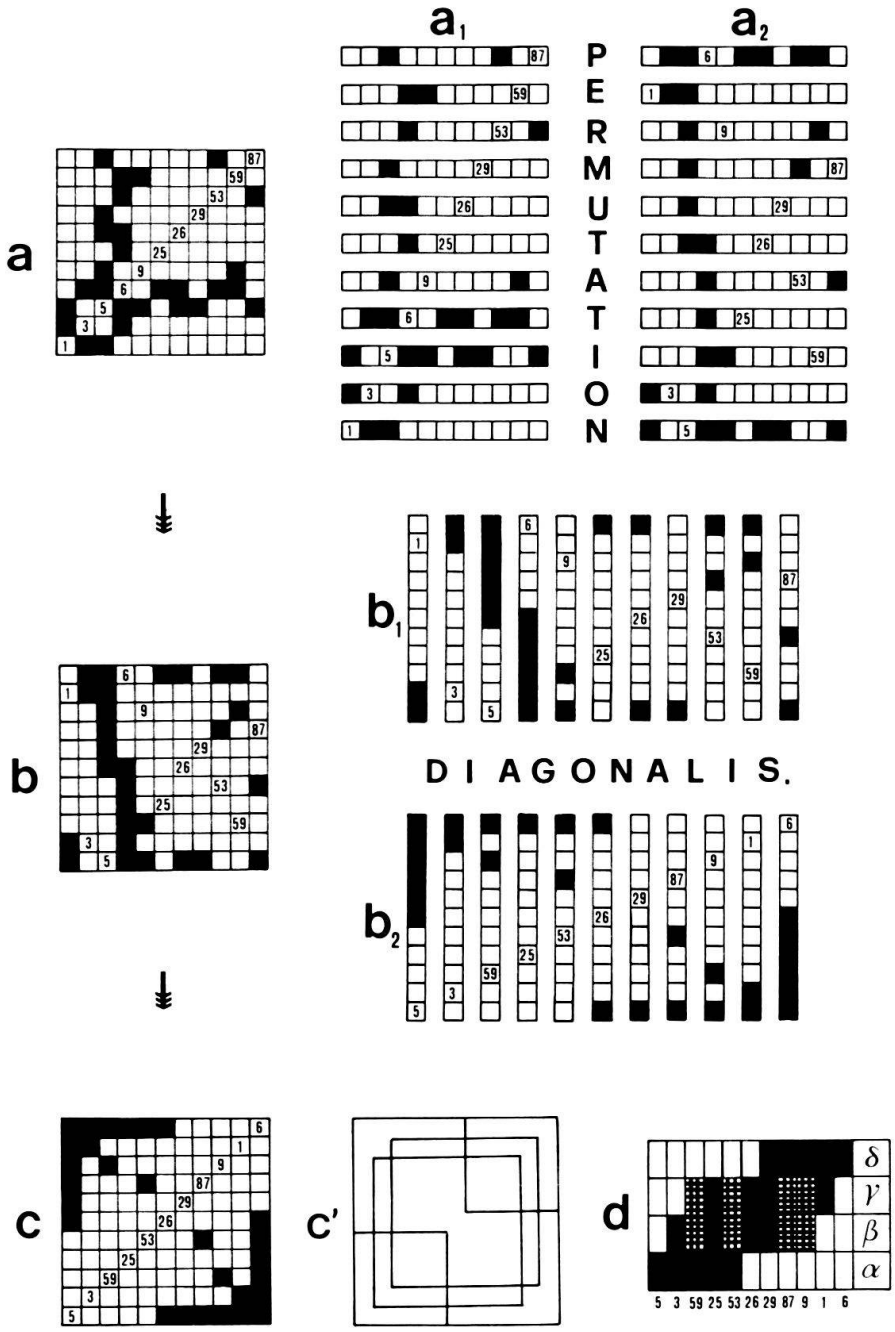


Fig. 3. Mise en évidence des associations unitaires.

a = Spectres d'association (en blanc) et d'exclusion (en noir) des espèces 1 à 87 (cf. fig. 2).
b = Permutation des lignes de la matrice *a*.
c = Permutation des colonnes de la matrice *b*.
c' = Schéma montrant les quatre sous-matrices carrées imbriquées qui sont identifiables dans la matrice *c*.
d = Tableau des relations stratigraphiques entre les espèces 1 à 87.
En noir: associations intégralement compatibles.
En quadrillé: associations qui ne sont pas intégralement compatibles.

Ce tableau montre que, sur la base des espèces dont la distribution est schématisée dans la figure 2, on peut reconnaître quatre intervalles de coexistence mutuellement exclusifs (α à δ). Discussion cf. texte.

donnée et pour l'interpréter il est préférable de lui rendre sa symétrie en la «diagonalisant». Pour cela on considère maintenant chaque colonne séparément (fig. 3, b_1) et on les permute de manière à ce que les cases de coordonnée de chaque espèce soient situées le long de la diagonale principale. On obtient ainsi la matrice c qui est une permutation de a.

Cette matrice c peut maintenant être interprétée en termes d'associations unitaires. On voit qu'elle est constituée de quatre sous-matrices carrées imbriquées (fig. 3, c') qui admettent la diagonale pour axe de symétrie:

1. La première sous-matrice contient les espèces 5, 3, 25, 59 et 53. Toutes ces espèces ont coexisté entre elles; elles constituent donc un ensemble compatible. Cet ensemble est maximum car on ne peut y ajouter aucune autre espèce (l'espèce 5 est incompatible avec les espèces 26 à 6): c'est donc une association unitaire.
2. La deuxième sous-matrice contient les espèces 3 à 9. Elle ne représente pas un ensemble intégralement compatible car les espèces 59 et 9 ainsi que les espèces 53 et 87 sont mutuellement exclusives.
3. La troisième sous-matrice contient les espèces 59 à 1. Elle ne représente pas non plus un ensemble intégralement compatible (mêmes raisons que pour la précédente).
4. La quatrième sous-matrice contient les espèces 29 à 6: toutes ces espèces ont coexisté entre elles. Elles constituent un ensemble compatible maximum car l'espèce 6 n'a pas existé avec les espèces 5 à 26.

Cette première analyse permet ainsi de mettre en évidence deux associations unitaires qui ne posent pas de problèmes ($1^{re} = \alpha$ et $4^{e} = \delta$). Les deux sous-matrices intermédiaires doivent être discutées plus avant. Pour les interpréter exactement il suffit d'éliminer par la pensée les espèces incompatibles qui s'y trouvent: on fera ainsi abstraction (provisoirement) des espèces 59 et 53. Ceci étant fait on voit que la deuxième sous-matrice carrée contient les espèces 3, 25, 26, 29, 87 et 9: ces espèces constituent un ensemble compatible maximum. La troisième sous-matrice contient les espèces 25, 26, 29, 87, 9 et 1 qui constituent également un ensemble compatible maximum.

On obtient ainsi une séquence de quatre associations unitaires (α à δ) caractérisées respectivement par les intervalles mutuellement exclusifs suivants:

α: espèce 5
β: coexistence des espèces 3 et 26 ou 29
γ: coexistence des espèces 1 et 25 ou 26
δ: espèce 6

Dans la figure 3d, ces intervalles sont schématisés par des barres verticales noires (attention au changement de figuré!).

Les espèces 59 et 53 peuvent être intégrées sans difficultés à la solution de ce petit problème:

a) intégralement compatibles avec les espèces caractéristiques de l'intervalle α elles existent nécessairement dans cet intervalle,

b) elles coexistent avec l'espèce 1 mais sont exclusives de l'espèce 6: elles existent donc nécessairement dans l'intervalle γ. Leur «incompatibilité» apparente avec les espèces 87 et 9 a sans doute une origine documentaire (échantillonage insuffisant).

On voit ainsi qu'il est très facile de trouver l'image exacte des relations d'association entre un petit nombre d'espèces dont on connaît la distribution stratigraphique dans un certain nombre de coupes: la permutation d'une matrice de 10×10 prend quelques minutes: une paire de ciseaux pour séparer les spectres d'association (fig. 3, a_1) et un peu de patience pour les ordonner (fig. 3, a_2) conduisent vite au résultat recherché (fig. 3, *d*). Permuter à la main des matrices de 30×30 ou 40×40 prend beaucoup plus de temps (1 ou 2 heures) et l'opération devient irréalisable dès que l'on envisage d'appliquer cette méthode à un grand nombre d'espèces (plus de 50 pour fixer un ordre de grandeur). Le but du présent travail est précisément d'étudier le problème posé par l'analyse d'un grand nombre de données.

Pour cela nous avons pris en exemple les données biostratigraphiques très précises fournies par BRAMLETTE & SULLIVAN (1961) et SULLIVAN (1965) sur la distribution du nannoplancton calcaire dans le Paléocène et l'Eocène de Californie.

4. La zonation du Paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen californien à l'aide du nannoplancton (planche hors-texte)

SULLIVAN (1965) et BRAMLETTE & SULLIVAN (1961) ont présenté leurs résultats bruts sous forme de tables dans lesquelles le contenu spécifique de chaque échantillon nannoplanctonifère est consigné et où les échantillons sont ordonnés stratigraphiquement.

Plusieurs centaines d'échantillons ont été prélevés dans les 10 principales coupes (planche hors-texte, *A* à *J*; noms des localités: cf. annotation 3) étudiées par ces auteurs. Ces échantillons ont livré plus de 100 espèces morphologiques distinctes (planche hors-texte: espèces 1 à 104; nomenclature: cf. annotation 2).

Pour simplifier ce problème complexe sans perdre d'information, nous avons opéré une première simplification en ne prenant en considération que les «horizons locaux» (définition 8, p. 582; correspondance entre horizons locaux et échantillons de BRAMLETTE & SULLIVAN: cf. annotation 3). On préserve ainsi toutes les informations sur les relations stratigraphiques entre les faunes et toutes celles qui concernent les relations d'association entre les espèces; on diminue cependant de plus de 70% le nombre de niveaux à illustrer dans les «Range Charts» locales (planche hors-texte, *A* à *J*).

Les observations brutes de BRAMLETTE & SULLIVAN ont ainsi été compilées dans la planche hors-texte. Ce tableau montre les relations stratigraphiques locales des espèces (horizon par horizon) et il fait bien apparaître la complexité du problème posé par la recherche d'un ajustement correct de l'ensemble des relations d'association et d'exclusion entre les espèces.

On a dit plus haut qu'il était quasiment impossible de chercher à effectuer manuellement la permutation d'une matrice de 100×100. Si l'on veut traiter ce problème à l'aide de la méthode résumée précédemment, on doit nécessairement réduire la taille de la matrice en éliminant une partie des espèces.

a) Critères d'élimination des espèces

1° *Fréquence de distribution géographique*

Il est évident qu'une espèce présente dans une coupe unique n'offre aucun intérêt pour corréler des coupes entre elles: les espèces solitaires peuvent donc être éliminées d'emblée.

Il est également trivial de remarquer que ce sont les espèces à grande extension géographique qui sont en même temps les plus intéressantes pour faire des corrélations biochronologiques, dans la mesure où leur durée d'existence relative n'est pas trop longue. L'analyse de plusieurs problèmes conduite à l'aide de notre méthode nous a amené à constater empiriquement que l'élimination d'espèces présentes dans moins de 50% des profils à corréler est fructueuse: non seulement elle ne nuit pas à la justesse des corrélations mais encore elle permet d'éviter certaines erreurs (cf. GUEX 1978*b* et annotation 1, p. 595). Ceci bien entendu à condition de travailler sur un intervalle stratigraphiquement restreint: il est clair que certaines espèces peuvent être géographiquement «rares» (i.e. présentes dans un petit nombre de coupes) simplement parce que les coupes qui les contiennent se situent aux limites (sup. ou inf.) de l'intervalle stratigraphique global considéré et que ces coupes sont peu nombreuses. Lorsque de telles espèces sont éliminées au départ (selon le critère «rareté» discuté ici), il est facile de les réintégrer après coup: une fois qu'une échelle biochronologique partielle (i.e. fondée sur les espèces qui présentent la plus large distribution géographique) est établie, on l'utilise pour corréler les profils stratigraphiques et on constate immédiatement que certaines espèces situées aux extrémités de l'intervalle stratigraphique étudié ont été éliminées injustement: on les situera donc dans l'échelle en fonction de leur position (plus ancienne ou plus récente) dans ces coupes.

2° *L'équivalence permutatoire*

L'ensemble des espèces qui ont un spectre d'association et d'exclusion identique sont équivalentes dans le problème posé par la permutation de la matrice. Au sein d'un ensemble d'espèces équivalentes, on peut n'en considérer qu'une seule et éliminer toutes les autres (elles seront réintégrées après) avant d'effectuer la permutation de la matrice des spectres d'association.

3° *L'omni-association*

Les espèces omni-associées (définition 7, p. 582) n'apportent aucune information chronologique et elles peuvent être éliminées sans autre, comme celles qui se trouvent dans une coupe unique.

b) Première phase d'analyse: réduction + permutation

1° *Matrice des spectres d'association et d'exclusion après élimination des espèces rares* (fig. 4)

En décidant d'éliminer à priori les espèces qui montrent une faible distribution géographique (présentes dans moins de 50% des profils: cf. discussion ci-dessus), on

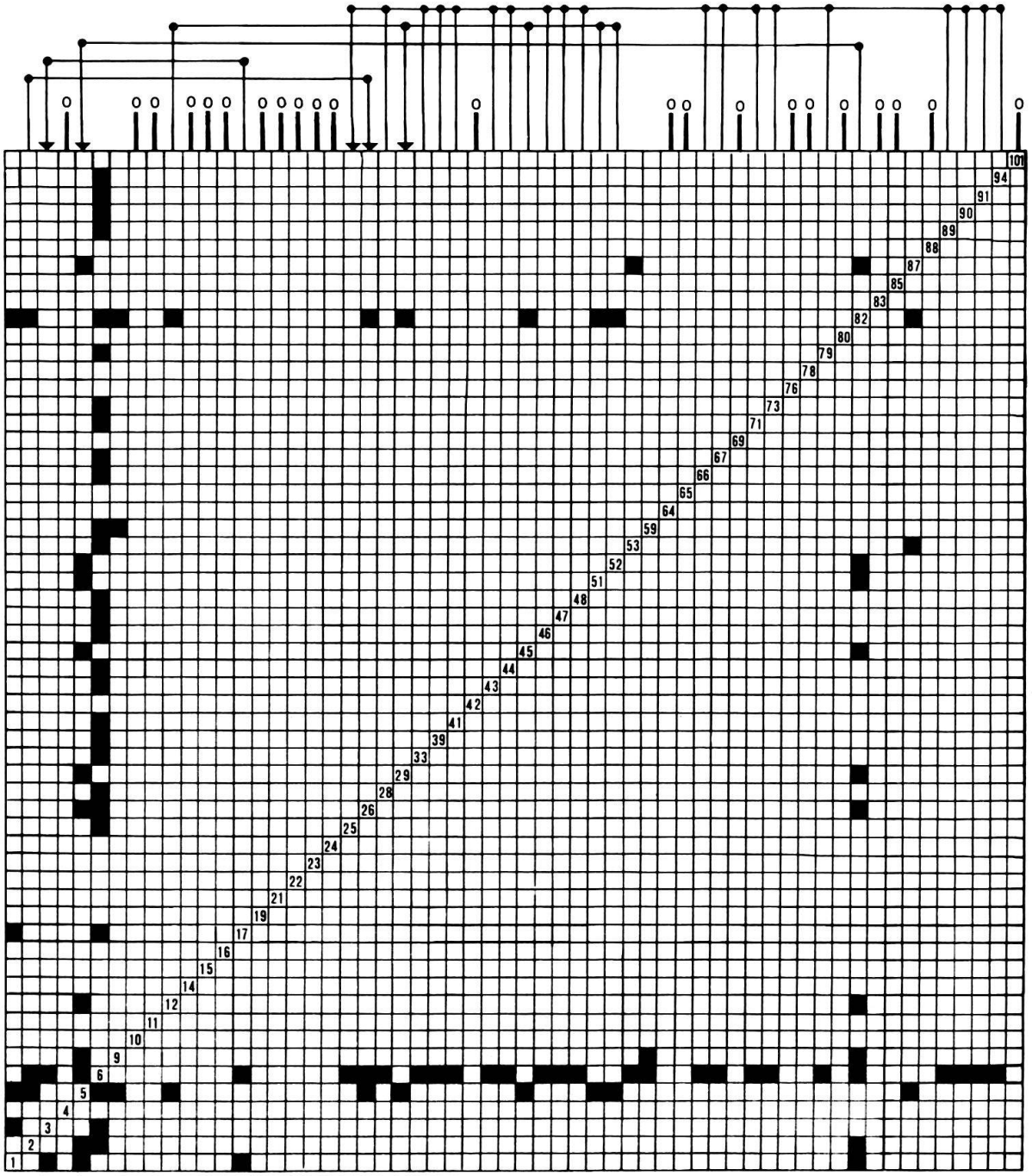


Fig. 4. Matrice des spectres d'association (en blanc) et d'exclusion (en noir) entre les espèces qui montrent une vaste distribution géographique: ces relations sont déduites de la planche hors-texte *(A* à *J)*.

Remarque: Toutes les espèces dont les relations sont compilées dans cette matrice sont indiquées par des barres noires dans la planche, figure *K*.

O = espèces omni-associées. *Crochets* = liaisons entre les équivalents permutatoires. *Flèches* = équivalents permutatoires conservés (cf. texte).

diminue de plus de 40% le nombre d'espèces impliquées dans l'exemple étudié. Les relations d'association et d'exclusion entre ces espèces sont compilées dans la matrice ci-dessus (fig. 4) à partir des données de base synthétisées dans la planche hors-texte (profils *A* à *J*) et en suivant le procédé décrit au début de cette note.

2° *Matrice des spectres d'association et d'exclusion après élimination des «équivalents permutatoires» et des espèces «omni-associées»*

Une observation rapide de la matrice illustrée à la figure 4 permet de déceler sans peine les espèces omni-associées (notées *O* sur la figure) et les espèces dont les spectres d'association sont identiques (liées par des «crochets» sur la figure). Les omni-associées sont éliminées d'emblée et parmi les équivalentes on n'en conserve qu'une de chaque sorte. Les espèces qui n'ont pas d'équivalent sont naturellement maintenues. On conserve ainsi les espèces suivantes: 1, 3, 5, 6, 9, 25, 26, 29, 53, 59 et 87. Ce qui nous ramène au problème élémentaire utilisé comme exemple dans le résumé méthodologique du début de cette note (fig. 2 et 3):

L'espèce 3 a pour équivalent 17
L'espèce 5 a pour équivalent 82
L'espèce 25 a pour équivalents 28, 33, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 66, 67, 71, 73, 79, 89, 90, 91 et 94
L'espèce 26 a pour équivalent 2
L'espèce 29 a pour équivalent 12, 45, 51 et 52

Les relations stratigraphiques entre les 11 espèces conservées (1 à 87) sont données dans la figure 2. La séquence d'associations unitaires qu'on en déduit est donnée dans la figure 3*d* (intervalles α à δ)

c) Deuxième phase d'analyse: construction de la «Range Chart» (planche hors-texte, fig. *K*)

1° *Réintégration des espèces équivalentes et omni-associées*

Aux espèces 3, 5, 25, 26 et 29 correspondent 25 équivalents permutatoires (cf. ci-dessus). On les intègre donc dans la «Range Chart» en leur attribuant la même extension relative que leurs équivalents respectifs.

Exemple: L'espèce 29 a pour équivalents les espèces 12, 45, 51, 52: on va donc attribuer à 12, 45, 51, 52 la même extension relative que celle qui a été établie pour 29, i.e. on va les situer dans les intervalles β à δ mis en évidence dans la figure 3*d*.

Les espèces omni-associées appartiennent évidemment aux intervalles α à δ de cette même figure.

2° *Réintégration des espèces éliminées en raison de leur distribution géographique restreinte*

Un examen rapide du tableau de distribution stratigraphique locale des espèces (planche hors-texte, profils *A* à *J*) permet de constater que certains groupes totalement exclusifs de ceux qui apparaissent dans l'intervalle α ont été éliminés: ce sont

les espèces 7, 8, 18, 38, 57, 62 et 103 (= ensemble I) exclusives (et toujours situées au-dessous) des espèces 3, 10, 11, 16, 17, 19, 21, 23, 28, 33, 41, 42, 46, 47, 48, 53, 69, 71, 76, 79, 80, 82, 83, 85, 88, 89, 90, 91, 94 et 101 (= ensemble II). L'élimination de ces espèces (i.e. 7, 8, 18, ..., 103) découle de notre première hypothèse de réduction de la dimension de la matrice des spectres d'association: ces espèces n'existent que dans quatre coupes *(C, F, G* et *J)* pour la simple raison que seules ces quatre coupes contiennent des sédiments plus anciens que ceux qui se sont déposés au cours de l'intervalle α.

On est donc conduit à compléter l'échelle de base établie dans la figure 3*d* en ajoutant une «zone» I qui est caractérisée par les espèces appartenant à l'ensemble I (la distribution de ces espèces est figurée par un quadrillage dans la planche hors-texte, fig. *K*). Il suffit de faire ensuite l'inventaire des espèces de l'intervalle α qui existent également dans la «zone» (= intervalle) I. Ce sont les espèces 4, 5, 14, 15, 22, 24, 25, 39, 43, 59, 64, 65, 66, 67, 73 et 78. On obtient ainsi la solution recherchée: planche hors-texte, figure *K*.

Cette «Range Chart» est un ajustement exact des relations de distribution stratigraphique entre les espèces dont les extensions relatives sont données sous forme de blocs noirs et quadrillés. Les espèces éliminées en raison de leur «rareté» géographique sont intégrées dans ce tableau en fonction de la position qu'elles occupent au sein des cinq intervalles établis précédemment (I, II = α, III = β, IV = γ, V = δ): la distribution de ces espèces est illustrée par des échelons horizontaux dans la planche hors-texte, figure *K*.

Remarque: Dans la synthèse de ses données, SULLIVAN (1965, p. 14–15) met en évidence quatre faunizones. La présente analyse en fait ressortir cinq. Il faut néanmoins noter que, pour l'essentiel, notre résultat est pratiquement identique à celui de cet auteur: les faunizones 1 et 2 de SULLIVAN correspondent aux intervalles I et II du présent schéma (planche hors-texte, fig. *K*); ses faunizones 3 et 4 correspondent aux intervalles III à V. L'association caractéristique de l'intervalle III mis en évidence ici (coexistence des espèces 3 + 17 + 2 + 12 + 26 + 29 + 51 + 52) recouvre une tranche de sédiment peu épaisse située à la base de la faunizone 4 de cet auteur.

A quelques détails mineurs près, les relations d'association et d'exclusion synthétisées dans la planche hors-texte, figure *K*, sont identiques à celles que SULLIVAN a mises en évidence dans son travail. Pour la discussion qui suit (cf. point *e*, ci-dessous, p. 593) il est cependant nécessaire de relever que les espèces *H. riedeli* (104), *Z. sigmoides* (55) et *E. distichus* (40) existent non seulement dans la faunizone 1 de SULLIVAN, mais également dans sa faunizone 2 (i.e. à Lodo = coupe *J*).

d) Comparaison avec les résultats obtenus à l'aide de l'ordinateur (tabl. 2)

Le programme d'ordinateur élaboré par DAVAUD (cf. 2e partie) permet de mettre en évidence une séquence de 15 associations unitaires (tabl. 2) pour le problème étudié ici (planche hors-texte, fig. *A* à *J*). Dans le diagramme ci-dessous (fig. 5) on montre dans quelles localités les associations d'espèces caractéristiques de ces 15 intervalles ont été observées.

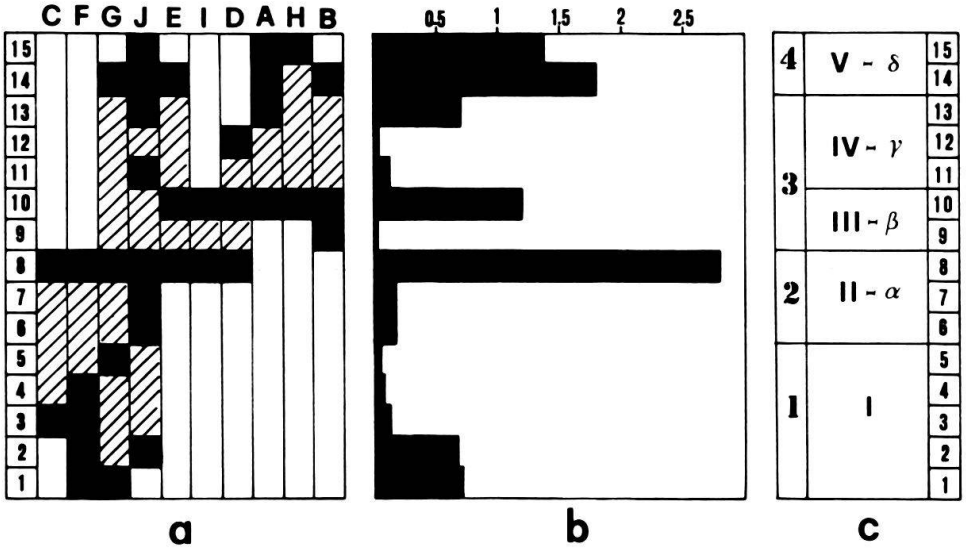


Fig. 5. Corrélation des intervalles I à V avec les faunizones 1 à 4 de SULLIVAN (1965) et avec les associations 1 à 15 mises en évidence à l'aide de l'ordinateur.

a = Les blocs noirs indiquent dans quels profils *(C, F, ..., B)* les associations unitaires (1 à 15: cf. tabl. 2) obtenues à l'aide de l'ordinateur peuvent être identifiées.
Les traits obliques indiquent que ces associations pourraient théoriquement être reconnues dans ces profils mais qu'elles ne l'ont pas été.

b = Variation du coefficient de contrôle superpositionnel des associations 1 à 15 (cf. texte).

c = Correspondance entre les faunizones 1 à 4 de SULLIVAN (1965), les intervalles I à V (resp. α à δ) découlant de la présente analyse et les 15 associations unitaires découlant de l'algorithme de DAVAUD (tabl. 2).

Ce diagramme est divisé en trois parties *(a, b, c)* et il doit être lu de la manière suivante:

— L'association 15 (générée par l'espèce 13: cf. tabl. 2) existe dans les coupes *J*, *A* et *H*. L'association 12 (générée par l'intervalle de coexistence des espèces 66, 53, 79, 89, 44 et 54) est identifiable dans la coupe *D* uniquement, etc. ...
Les blocs noirs de la figure 5*a* indiquent les localités *(C, F, ..., B)* où les différentes associations unitaires (1 à 15) peuvent être reconnues (i.e.: à l'aide des espèces ou des paires d'espèces qui les caractérisent ...).
Les barres obliques de cette même figure mettent en évidence les nombreuses discontinuités qui existent dans la distribution de ces associations au sein des différents profils. Par exemple: on peut reconnaître les associations 3 et 8 dans le profil *C* mais les associations 4 à 7 y sont absentes. Ceci peut signifier deux choses:

1. Les associations 4 à 7 sont significatives au plan chronologique mais l'enregistrement biostratigraphique et l'échantillonnage sont incomplets (= lacunes de documentation).
2. L'enregistrement biostratigraphique et l'échantillonnage sont satisfaisants mais les associations 4 à 7 n'ont pas de signification chronologique ...

Pour distinguer les associations unitaires significatives au plan temporel de celles qui ne le sont pas, on peut appliquer le test ci-dessous:

— La figure 5*b* (déduite de la fig. 5*a*) montre la variation du coefficient de contrôle superpositionnel *(C_s)* entre les différentes associations unitaires. Ce coefficient est défini ainsi:

$$C_s = n_i \times \frac{S}{S'}$$

n_i = nombre de profils dans lesquels une association *i* est identifiée;
S = nombre de fois où cette association *i* a été observée en séquence avec les autres associations;
S' = nombre de fois où l'association *i* pourrait théoriquement être observée en séquence avec les autres associations (i.e. si cette association *i* est significative au plan chronologique et si l'échantillonnage et l'enregistrement biostratigraphique sont parfaits).

Deux exemples:

1. L'association 1 peut être reconnue dans deux coupes: $n_i = 2$.
   Elle est identifiable une fois au-dessous des associations 2, 3, 4 et 5, deux fois au-dessous de l'association 8 et une fois au-dessous de la 14: $S = 7$.
   Si la documentation était parfaite et si les autres associations étaient toutes significatives au plan temporel (cf. fig. 5*a:* figuré oblique) on aurait cependant pu l'identifier deux fois au-dessous des associations 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 et une fois au-dessous des associations 9, 10, 11, 12, 13 et 14: $S' = 20$.
   Le coefficient de contrôle superpositionnel de l'association 1 est donc égal à 0,7.
2. L'association 8 peut être reconnue dans sept coupes: $n_i = 7$.
   Elle est identifiable deux fois au-dessus des associations 1, 2 et 3, une fois au-dessus des associations 4, 5, 6 et 7, une fois au-dessous des associations 11, 12, 13 et 15 et trois fois au-dessous des associations 10 et 14: $S = 20$.
   Cette même association 8 aurait en fait théoriquement (fig. 5*a:* barres obliques) pu être observée deux fois au-dessus de l'association 1, trois fois au-dessus de l'association 2, quatre fois au-dessus des associations 3, 4, 5, 6 et 7, cinq fois au-dessous de 9 et de 10, quatre fois au-dessous de 11 et 12, trois fois au-dessous de 13 et 14 et une fois au-dessous de 15: $S' = 50$.
   Le coefficient de contrôle superpositionnel de cette association 8 est donc égal à 2,8, etc. ...

— Dans la figure 5*c* on montre la correspondance entre les faunizones 1 à 4 de SULLIVAN (1965), les intervalles I à V qui découlent de notre analyse (planche hors-texte, fig. *K*) et ceux qui découlent de l'algorithme de DAVAUD (tabl. 2, associations 1 à 15). La figure 5*b* met en relief le fait que l'analyse empirique de SULLIVAN (op. cit.) a conduit cet auteur à une excellente synthèse de ses observations de base (planche hors-texte, *A* à *J*) puisque ses faunizones se calquent exactement sur les associations les plus significatives au plan chronologique (1 + 2, 8, 10 et 14) mises en évidence à l'aide de l'ordinateur (tabl. 2).

e) La «zonation standard» proposée par MARTINI (1971) *pour le Paléocène supérieur et pour l'Eocène inférieur et moyen*

Il est impossible de ne pas discuter ici les «zones standard» NP-8 à NP-15 proposées par MARTINI (1971) et ceci pour deux raisons:

La première est que la synthèse de cet auteur, pour l'intervalle de temps considéré, est fondée sur les mêmes données que celles qui ont été utilisées en exemple dans la présente étude: le stratotype de NP-8 correspond à l'horizon local n° 1 de la coupe de Lodo (= coupe *J*) et le stratotype de NP-15 correspond à l'horizon local n° 11 de Media Aqua Creek (coupe *H*) (annotation 3).

La deuxième raison est que les résultats synthétiques qui apparaissent ici sont en contradiction flagrante avec ceux de MARTINI (op. cit.). Dans la figure 6*A* ci-dessous on reproduit la distribution des espèces caractéristiques des zones NP-8 à NP-15 selon cet auteur (op. cit., p. 741–743). Les relations d'association et d'exclusion entre ces espèces correspondent assez mal avec les observations de SULLIVAN (1965) que MARTINI a utilisées pour faire sa synthèse. Ces relations sont données dans la figure 6*B*. Cette figure montre que, sur la base des espèces concernées (i.e. utilisées par MARTINI pour définir ses «zones standard»), on peut reconnaître trois associations unitaires (fig. 5*B: a, b, c*) correspondant aux faunizones 2, 3 et 4 de SULLIVAN (op. cit.) (distribution des espèces 40, 55 et 104: cf. remarque ci-dessus, p. 591).

Pour terminer il est encore nécessaire de noter que les définitions de «zones standard» utilisées par MARTINI (op. cit.) sont inapplicables. Par exemple:

a) La zone NP-12 est définie par l'intervalle de coexistence des espèces *D. lodoensis* (85) et *M. tribrachiatus* (89).
b) La zone NP-13 est définie par l'intervalle qui sépare la disparition de *M. tribrachiatus* (89) de l'apparition de *D. sublodoensis* (96).
c) La zone NP-14 est définie par l'intervalle qui sépare l'apparition de *D. sublodoensis* (96) de l'apparition de *C. alatus* (6).

Ceci amène les remarques suivantes:

a) Les espèces 89 et 96 coexistent dans les coupes de Vaca Valley *(B)*, Santa Anita *(D)* et Las Cruces *(E)*: la zone NP-13 n'existe donc pas.

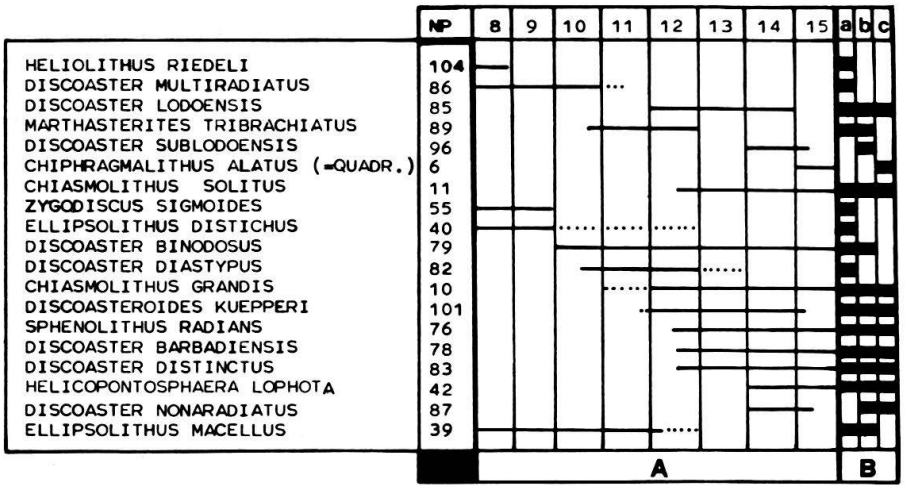


Fig. 6. Comparaison entre la synthèse de MARTINI (1971) et les résultats obtenus dans la présente étude.

A = Tableau montrant la distribution verticale des espèces «caractéristiques» des zones NP-8 à NP-15 (d'après MARTINI 1971, p. 741–743: «Range Chart»).

B = Relations d'association et d'exclusion observées entre ces mêmes espèces (cf. texte).

b) Dans la Vaca Valley (coupe *B*) on constate que NP-12, selon la définition originale, recouvre complètement NP-13 et NP-14.
c) A Las Cruces (coupe *E*) NP-12 recouvre complètement NP-13 et partiellement NP-14, etc. ...

ANNOTATION 1

Il est évident que des ensembles d'espèces synchrones peuvent être mutuellement exclusifs pour des raisons écologiques, biogéographiques ou documentaires (échantillonnage insuffisant). En construisant un tableau des relations d'association et d'exclusion entre les espèces à l'aide de la méthode décrite ici on ne s'occupe pas, en première analyse, de savoir si deux associations unitaires successives sont significatives ou non au plan strictement chronologique. Ce problème doit être analysé dans une deuxième phase: seules les espèces qui montrent une bonne distribution géographique sont valables pour faire des corrélations biochronologiques à grande échelle car elles engendrent des associations unitaires qui se retrouvent en séquence d'une localité à l'autre («principe de réplicabilité»: cf. GUEX 1978*b*). Les espèces géographiquement confinées engendrent une multiplication du nombre d'associations unitaires sans signification chronologique et une interprétation directe de ces associations en termes de «zones» peut conduire à des corrélations temporelles complètement fausses (discussion détaillée de ce problème: cf. GUEX 1978*b*).

ANNOTATION 2: Liste des espèces

1. *Chiphragmalithus cristatus*
2. *Chiphragmalithus acanthodes*
3. *Chiphragmalithus calatus*
4. *Chiphragmalithus dubius*
5. *Chiphragmalithus protenus*
6. *Chiphragmalithus quadratus*
7. *Coccolithus bidens*
8. *Coccolithus californicus*
9. *Coccolithus expansus*
10. *Coccolithus grandis*
11. *Coccolithus solitus*
12. *Coccolithus staurion*
13. *Coccolithus gigas*
14. *Coccolithus delus*
15. *Coccolithus consuetus*
16. *Coccolithus crassus*
17. *Coccolithus cribellum*
18. *Coccolithus eminens*
19. *Cyclococcolithus gammation*
20. *Cyclococcolithus luminis*
21. *Discolithus pectinatus*
22. *Discolithus planus*
23. *Discolithus pulcher*
24. *Discolithus pulcheroides*
25. *Discolithus rimosus*
26. *Discolithus distinctus*
27. *Discolithus fimbriatus*
28. *Discolithus ocellatus*
29. *Discolithus panarium*
30. *Discolithus punctosus*
31. *Discolithus solidus*
32. *Discolithus vescus*
33. *Discolithus versus*
34. *Discolithus pertusus*
35. *Discolithus exilis*
36. *Discolithus duocavus*
37. *Discolithus inconspicuus*
38. *Cyclolithus robustus*
39. *Ellipsolithus macellus*
40. *Ellipsolithus distichus*
41. *Helicosphaera semilunum*
42. *Helicosphaera lophota*
43. *Lophodolithus nascens*
44. *Lophodolithus reniformis*
45. *Lophodolithus mocholophorus*
46. *Rhabdosphaera crebra*
47. *Rhabdosphaera morionum*
48. *Rhabdosphaera perlonga*
49. *Rhabdosphaera rudis*
50. *Rhabdosphaera scabrosa*
51. *Rhabdosphaera semiformis*
52. *Rhabdosphaera tenuis*
53. *Rhabdosphaera truncata*
54. *Rhabdosphaera inflata*
55. *Zygodiscus sigmoides*
56. *Zygodiscus adamas*
57. *Zygodiscus herlyni*
58. *Zygodiscus plectopons*
59. *Zygolithus concinnus*
60. *Zygolithus crux*
61. *Zygolithus distentus*
62. *Zygolithus junctus*
63. *Zygrhablithus simplex*
64. *Zygrhablithus bijugatus*

65. *Baarudosphaera bigelowi*
66. *Baarudosphaera discula*
67. *Micrantholithus flos*
68. *Micrantholithus inaequalis*
69. *Micrantholithus vesper*
70. *Micrantholithus basquensis*
71. *Micrantholithus crenulatus*
72. *Micrantholithus aequalis*
73. *Clathrolithus ellipticus*
74. *Rhomboaster cuspis*
75. *Polycladolithus operosus*
76. *Sphenolithus radians*
77. *Fasciculolithus involutus*
78. *Discoaster barbadiensis*
79. *Discoaster binodosus*
80. *Discoaster deflandrei*
81. *Discoaster delicatus*
82. *Discoaster diastypus*
83. *Discoaster distinctus*
84. *Discoaster falcatus*
85. *Discoaster lodoensis*
86. *Discoaster multiradiatus*
87. *Discoaster nonaradiatus*
88. *Discoaster stradneri*
89. *Discoaster tribrachiatus*
90. *Discoaster cruciformis*
91. *Discoaster germanicus*
92. *Discoaster lenticularis*
93. *Discoaster martinii*
94. *Discoaster minimus*
95. *Discoaster septemradiatus*
96. *Discoaster sublodoensis*
97. *Discoaster helianthus*
98. *Discoaster limbatus*
99. *Discoaster mediosus*
100. *Discoaster perpolitus*
101. *Discoasteroides kuepperi*
102. *Discoasteroides megastypus*
103. *Heliolithus kleinpelli*
104. *Heliolithus riedeli*

ANNOTATION 3: Localités, horizons locaux, corrélations avec la planche hors-texte, figure *K*

Localité A: Pacheco

Horizon 1 = niveau A-6666	Horizons 1-4: intervalle III
Horizon 2 = niveau A-6665	Horizons 5-6: intervalle IV
Horizon 3 = niveau A-6667	Horizons 7-8: intervalle V
Horizon 4 = niveau A-6668	
Horizon 5 = niveau A-6671	
Horizon 6 = niveau A-6685	
Horizon 7 = niveau A-6688	
Horizon 8 = niveau A-6689	

Localité B: Vaca Valley

Horizon 1 = niveau A-4781 A	Horizons 1-7: intervalle III
Horizon 2 = niveau A-4781 B	Horizons 8-9: intervalle V
Horizon 3 = niveau A-4781 J	
Horizon 4 = niveau A-4781 O	
Horizon 5 = niveau A-4782 L	
Horizon 6 = niveau A-4782 N	
Horizon 7 = niveau A-4782 S	
Horizon 8 = niveau A-4783 A	
Horizon 9 = niveau A-4783 E	

Localité C: New Idria

Horizon 1 = niveau B-4861 A	Horizon 1: intervalle I
Horizon 2 = niveau B-4868	Horizons 2-9: intervalle II
Horizon 3 = niveau B-4869	
Horizon 4 = niveau B-4872	
Horizon 5 = niveau B-4877	
Horizon 6 = niveau B-4884	
Horizon 7 = niveau B-4894	
Horizon 8 = niveau B-4897	
Horizon 9 = niveau B-4898	

Localité D: Upper Canada de Santa Anita

Horizon 1 = niveau A-8945	Horizon 1: intervalle II
Horizon 2 = niveau A-8946	Horizons 2-3: intervalle III
Horizon 3 = niveau A-8947	Horizons 4-8: intervalle IV
Horizon 4 = niveau A-8948	
Horizon 5 = niveau A-8950	
Horizon 6 = niveau A-8951	
Horizon 7 = niveau A-8952	
Horizon 8 = niveau A-8953	

Localité E: Las Cruces

Horizon 1 = niveau A-8855	Horizon 1: intervalle II
Horizon 2 = niveau D-1017	Horizons 2-3: intervalle III
Horizon 3 = niveau A-8857	Horizon 4: intervalle V
Horizon 4 = niveau A-8862	

Localité F: Simi Valley

Horizon 1 = niveau A-7617	Horizons 1-7: intervalle I
Horizon 2 = niveau A-7628	Horizons 8-12: intervalle II
Horizon 3 = niveau A-7629	
Horizon 4 = niveau A-7634	
Horizon 5 = niveau A-7636	
Horizon 6 = niveau A-7639	
Horizon 7 = niveau A-7641	
Horizon 8 = niveau A-7642	
Horizon 9 = niveau A-7643	
Horizon 10 = niveau A-7644	
Horizon 11 = niveau A-7648	
Horizon 12 = niveau A-7652	

Localité G: Tres Pinos

Horizon 1 = niveau B-7239	Horizons 1-2: intervalle I
Horizon 2 = niveau B-7202	Horizons 3-7: intervalle II
Horizon 3 = niveau B-7204	Horizon 8: intervalle IV
Horizon 4 = niveau B-7215	Horizons 9-10: intervalle V
Horizon 5 = niveau B-7217	
Horizon 6 = niveau B-7226	
Horizon 7 = niveau B-7231	
Horizon 8 = niveau B-7242	
Horizon 9 = niveau B-7246	
Horizon 10 = niveau B-7235	

Localité H: Media Aqua Creek

Horizon 1 = niveau A-7089	Horizons 1-3: intervalle II
Horizon 2 = niveau A-7088	Horizons 4-8: intervalle III
Horizon 3 = niveau A-7057	Horizon 9: ?
Horizon 4 = niveau A-7052	Horizons 10-12: intervalle V
Horizon 5 = niveau A-7051	
Horizon 6 = niveau A-7050	
Horizon 7 = niveau A-7049	
Horizon 8 = niveau A-7048	
Horizon 9 = niveau A-7046	
Horizon 10 = niveau A-7009	
Horizon 11 = niveau A-7020	
Horizon 12 = niveau A-7025	

Localité I: Upper Reliz Creek

Horizon 1 = niveau B-2769	Horizons 1-4: intervalle II
Horizon 2 = niveau B-2771	Horizons 5-8: ?

Horizon 3 = niveau B-2772	Horizons 9–11: intervalle III
Horizon 4 = niveau B-2773	
Horizon 5 = niveau B-2775	
Horizon 6 = niveau B-2779	
Horizon 7 = niveau B-2780	
Horizon 8 = niveau B-2782	
Horizon 9 = niveau B-2784	
Horizon 10 = niveau B-2786	
Horizon 11 = niveau B-2788	
Localité J: Lodo	
Horizon 1 = niveau 6 + 1	Horizons 1–2: intervalle I
Horizon 2 = niveau 7	Horizons 3–5: intervalle II
Horizon 3 = niveau 32	Horizons 6–8: intervalle IV
Horizon 4 = niveau 36	Horizons 9–11: intervalle V
Horizon 5 = niveau 70	
Horizon 6 = niveau OC-2	
Horizon 7 = niveau OC-3	
Horizon 8 = niveau OC-4	
Horizon 9 = niveau GC-1	
Horizon 10 = niveau GC-2	
Horizon 11 = niveau GC-3	

DEUXIÈME PARTIE

Un algorithme facilitant l'élaboration d'échelles biochronologiques fondées sur un grand nombre d'espèces

Par Eric Davaud

1. Introduction

Le problème abordé dans la première partie de ce travail montre que sa résolution entraîne de nombreuses manipulations dont la plupart peuvent être effectuées par un ordinateur. En suivant d'assez près la démarche sur laquelle se fonde le traitement manuel, nous avons donc développé un algorithme qui élabore automatiquement, à partir des observations de terrain, un tableau synthétique des relations d'association et d'exclusion entre les espèces identifiées.

Formulé de manière simple et géométrique, le problème revient à échelonner les espèces étudiées le long d'un axe en les représentant par des segments dont l'extension et la position relative rendent compte de toutes les associations observées entre espèces. Cette condition équivaut à trouver un ensemble d'associations unitaires (cf. p. 582) puis à les ordonner de manière à respecter toutes les relations stratigraphiques locales.

2. Recherche des associations unitaires

La première étape consiste à rassembler les informations biostratigraphiques provenant de plusieurs coupes dans une matrice carrée *(R)* dont les lignes et les colonnes correspondent aux différentes espèces identifiées. Les éléments de cette

matrice (r_{ij}) expriment les relations stratigraphiques entre les espèces prises deux à deux. Par convention l'élément r_{ij} prendra les valeurs suivantes:

$+2$ si l'espèce i a toujours été observée au-dessus de l'espèce j,

-2 si l'espèce i a toujours été observée en-dessous de l'espèce j,

1 si les deux espèces i et j ont été trouvées au moins une fois dans un même niveau ou si elles coexistent virtuellement (voir plus bas),

0 si les espèces i et j n'ont jamais été observées dans une même coupe.

De cette définition il ressort que la matrice R est antisymétrique pour les éléments r_{ij} différant de 0 et de 1, et que les informations contenues dans la demi-matrice située sous la diagonale principale sont redondantes.

L'établissement de la matrice R se fait en initialisant tous les éléments r_{ij} à zéro et en insérant successivement les informations provenant des différentes coupes étudiées. Il est fréquent qu'au cours de cette opération on rencontre des couples d'espèces dont les relations diffèrent d'une coupe à l'autre. Cette apparente incohérence est due à une lacune documentaire et signifie que les espèces sont virtuellement associées: ainsi, si r_{ij}^k représente la relation entre les espèces i et j dans la k^e localité, et r_{ij}^n la relation entre ces mêmes espèces dans la n^e localité, l'inégalité $r_{ij}^k \neq r_{ij}^n$ implique que $r_{ij} = 1$.

Au terme de ces opérations, la matrice R exprime toutes les associations entre espèces et toutes leurs relations stratigraphiques observées sur l'ensemble des localités. Il subsiste cependant un certain nombre d'indéterminations ($r_{ij} = 0$) provenant du fait que certaines espèces n'ont jamais été observées simultanément dans une même coupe. Par une série de déductions il est évidemment possible de lever la plupart de ces indéterminations. Pour illustrer la logique de cette démarche déductive, imaginons deux espèces i et j dont la relation stratigraphique est indéterminée ($r_{ij} = 0$). S'il existe au moins une autre espèce (k, par exemple) dont les relations stratigraphiques avec les deux espèces considérées sont connues, l'indétermination peut être levée à condition que l'espèce intermédiaire (k) se situe stratigraphiquement entre les deux autres et qu'elle n'ait coexisté avec aucune d'entre elles. Cette double condition se formule de la manière suivante:

Si $r_{ij} = 0$ mais qu'il existe au moins une espèce k telle que $r_{ik} \neq 0$ et $r_{kj} \neq 0$ alors $r_{ij} = r_{ik}$ si et seulement si $r_{ik} = r_{kj} \neq 1$.

L'algorithme établi pour lever les indéterminations opère de manière itérative: dans un premier temps toutes les relations indéterminées sont passées en revue et modifiées s'il y a lieu (l'ensemble des espèces intermédiaires doit indiquer la même relation stratigraphique entre les deux espèces considérées). Dans une seconde phase les indéterminations qui subsistent sont à nouveau examinées et modifiées à l'aide des relations stratigraphiques déduites lors du cycle précédent. Cette procédure se répète tant que des améliorations apparaissent d'un cycle à l'autre. Lorsque les indéterminations résiduelles ne peuvent plus être levées, cette procédure itérative s'interrompt. L'espèce dont les relations stratigraphiques présentent le plus grand nombre d'indéterminations est alors éliminée et la matrice R compactée. Cette épuration sélective se répète jusqu'à disparition de toutes les indéterminations.

On notera que les espèces éliminées à ce stade correspondent à celles qui ne sont apparues que très rarement dans les différentes localités prises en considération. Leur intérêt stratigraphique est donc limité.

Au terme de ces opérations préliminaires, la matrice R exprime de manière condensée l'ensemble des informations stratigraphiques contenues dans les données de départ. Ces informations vont permettre de délimiter des groupes d'espèces ayant coexisté réellement ou virtuellement et de les ordonner dans un tableau synthétique. La configuration de ce dernier ne sera optimale que si les regroupements d'espèces ayant coexisté répondent aux trois conditions suivantes:

— le nombre de groupes doit être minimal;
— toutes les coexistences entre espèces prises deux à deux doivent y être exprimées;
— les espèces appartenant à un groupe doivent avoir toutes coexisté à un moment donné.

Les groupes d'espèces satisfaisant à ces conditions correspondent aux associations unitaires de GUEX (1977). De leur définition, il découle que chaque association unitaire est une sous-matrice carrée de la matrice R ne contenant que des 1 ($r_{ij} = 1$, quels que soient i et j).

La recherche des associations unitaires s'effectue en deux phases.

Dans un premier temps, le spectre d'association de chaque espèce est réduit à un ensemble d'espèces compatibles (cf. définitions GUEX). Cette réduction s'opère par l'élimination progressive des espèces présentant des incompatibilités à l'intérieur du spectre. Considérons par exemple le cas d'une espèce quelconque *(i)*. La i^e ligne ou colonne de la matrice R représente l'ensemble des relations stratigraphiques entretenues par cette espèce avec toutes les autres. Un certain nombre d'espèces seulement ont coexisté avec elle. Elles constituent ce que l'on convient d'appeller le spectre d'association de l'espèce i. Rassemblons-les, à la suite de l'espèce i, dans une matrice carrée B exprimant leurs relations stratigraphiques réciproques (b_{kl}). Deux cas peuvent alors se présenter:

— Toutes les espèces ont coexisté entre elles ($b_{kl} = 1$, quels que soient k et l). Nous sommes en présence d'un ensemble compatible et dans ce cas le spectre ne doit pas être modifié.
— Certaines espèces sont antérieures ou postérieures à d'autres, bien que toutes aient coexisté avec l'espèce i: l'association n'est pas compatible et il importe d'éliminer de cet ensemble un certain nombre d'espèces. Les critères d'élimination reposent à la fois sur la fréquence des incompatibilités ($b_{kl} \neq 1$) observées pour chaque espèce dans la matrice B et sur la nécessité d'exprimer dans l'ensemble des associations unitaires toutes les coexistences observées (voir condition 2). Ainsi l'espèce qui présente le plus d'incompatibilités sera éliminée en premier à moins que sa coexistence avec l'espèce i n'ait pas encore été exprimée dans les ensembles compatibles déterminés précédemment. Le processus d'élimination se poursuit selon les mêmes critères jusqu'à obtention d'un ensemble compatible dans lequel l'espèce i est nécessairement inclue.

Lorsque ces opérations ont été effectuées pour chaque spectre d'association, nous avons à disposition autant d'ensembles compatibles que d'espèces. Il est évident que

l'information contenue dans plusieurs d'entre eux est redondante et qu'ils peuvent être éliminés. Les groupes d'espèces qui subsistent une fois que toutes les redondances ont été supprimées correspondent aux associations unitaires. Leur nombre est minimal et toutes les coexistences entre espèces y sont exprimées.

3. Sériation des associations unitaires

La dernière étape qui précède l'établissement d'un tableau schématisant les associations et les exclusions entre espèces consiste à réordonner les associations unitaires à l'aide des relations stratigraphiques d'espèce à espèce observées localement (r_{ij}).

Pratiquement cette réorganisation s'effectue en établissant une nouvelle matrice D qui rend compte des relations stratigraphiques non plus entre les espèces mais entre les associations unitaires. La postériorité ou l'antériorité d'une association unitaire par rapport à une autre est déterminée par l'ensemble des relations stratigraphiques observées entre les espèces appartenant à ces deux associations. Si cet ensemble est cohérent, c'est-à-dire si toutes les espèces caractéristiques de la première association ont été rencontrées systématiquement au-dessus (ou au-dessous) des espèces caractéristiques de la seconde, la position stratigraphique relative des deux associations unitaires est déterminée sans équivoque.

En revanche, si les relations stratigraphiques entre les espèces de ces deux associations ne sont pas cohérentes (c'est-à-dire, si certaines indiquent une antériorité et d'autres une postériorité), la position relative des deux associations considérées reste indéterminée. Ces incohérences sont dues à la présence, dans l'une des deux associations unitaires, d'espèces pour lesquelles on ne possède qu'une documentation insuffisante et qu'il importe d'éliminer.

La détection des espèces les plus «perturbatrices» se fait en comptabilisant le nombre de fois que chaque espèce peut être tenue pour responsable d'une incohérence au cours de l'établissement de la matrice des relations entre associations unitaires (D). L'espèce la plus souvent impliquée dans ces indéterminations est alors éliminée et les associations unitaires auxquelles elle appartenait sont redéfinies par la réinsertion d'espèces qu'excluait sa présence. On notera que cette opération peut aboutir à la formation d'associations unitaires redondantes. Ces dernières sont évidemment détectées et écartées de la matrice D.

Ce processus se répète jusqu'à ce que toutes les relations entre les associations unitaires qui subsistent soient déterminées de façon univoque. Les informations contenues dans la matrice D permettent alors de réordonner les différentes associations unitaires de manière à ce que toutes les relations stratigraphiques observées localement entre les espèces soient respectées et de produire un tableau synthétique exprimant l'ensemble des relations d'association et d'exclusion entre les espèces (tabl. 2).

4. Conclusions

Nous voyons que la démarche suivie dans cet algorithme s'inspire de celle proposée pour le traitement manuel. Néanmoins elle s'en distingue par les points suivants:

— La matrice initiale *R* exprime non seulement les informations relatives aux associations observées mais encore les relations stratigraphiques entre les différentes espèces identifiées.

— Le critère d'élimination des espèces est fondé non pas sur leur rareté géographique mais sur leur caractère «perturbateur» (cf. p. 601) imputable à une documentation fragmentaire.

— Toutes les espèces observées sont donc prises en considération. L'élimination de certaines d'entre elles n'intervient que si cela s'avère nécessaire pour obtenir un tableau des relations d'association et d'exclusion qui ne présente pas de discontinuité.

— Les tableaux fournis par l'algorithme, dans le cas de problèmes complexes, sont plus exhaustifs que ceux obtenus par la démarche manuelle. Néanmoins leur interprétation en terme de zones et leur utilisation à des fins stratigraphiques exige un examen critique préalable de chaque association unitaire. Les principes de cet examen critique sont résumés dans l'annotation 1 du présent travail et discutés en détail dans GUEX 1978*b*.

Tableau 1: *Jeu d'essai*

I N P U T

— *TITRE*

— *NOMBRE DE COUPES (3), NOMBRE D'ESPECES (10)*

— *NOMBRE D'ESPECES DANS LA PREMIERE COUPE (10)*

— *EXTENSION STRATIGRAPHIQUE DES DIFFERENTES ESPECES DE LA PREMIERE COUPE (l'espèce 1 va du niveau 6 au niveau 7, l'espèce 2 du niveau 4 au niveau 5, etc.)*

— *NOMBRE D'ESPECES DANS LA DEUXIEME COUPE (10)*

etc...

```
Z O N A T I O N   D U   P A L E O C E N E
3,10
10
1,6,7,2,4,5,3,7,8,4,1,5,5,1,3,6,9,10,7,1,4,8,4,5,9,1,4,10,9,10
10
1,6,7,2,4,5,3,5,7,4,8,9,5,1,2,6,8,9,7,4,6,8,7,8,9,4,5,10,9,10
7
2,8,9,3,2,5,4,9,10,5,1,1,6,6,9,7,6,7,10,1,10
```

O U T P U T

```
Z O N A T I O N   D U   P A L E O C E N E

                        1  2  3  4
ESPECE    4 (100%)   **:**:**:**:
ESPECE    7 (100%)   **:**:**:**:
ESPECE    9 ( 66%)   **:**:  :  :
ESPECE    5 (100%)   **:  :  :  :
ESPECE    8 ( 66%)     :**:**:**:
ESPECE    3 (100%)     :**:**:  :
ESPECE    1 ( 66%)     :  :**:  :
ESPECE    6 (100%)     :  :  :**:
ESPECE    2 (100%)     :  :  :  :
ESPECE   10 (100%)     :  :  :  :
```

ANNEXE: Caractéristiques du programme et mode d'emploi

Le programme d'aide à l'élaboration d'échelles biochronologiques est écrit en FORTRAN IV et a été développé sur UNIVAC 1108. Il occupe environ 30 k-mots.

La version donnée en annexe permet d'établir des échelles biochronologiques basées sur des informations provenant d'un nombre illimité de coupes mais n'impliquant pas plus de 110 espèces différentes. Cette limite peut être repoussée en modifiant les dimensions des matrices et des vecteurs déclarés en début de programme.

Tableau 2: *Associations unitaires 1 à 15 mises en évidence à l'aide de l'ordinateur*
(Données de base: cf. planche hors-texte, profils *A* à *J*. – Les pourcentages entre parenthèse indiquent la fréquence de distribution géographique des espèces)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ESPECE	15 (100%)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	25 (100%)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
ESPECE	39 (90%)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**			
ESPECE	40 (30%)	**	**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	55 (40%)	**	**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	61 (20%)	**	**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	63 (20%)	**	**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	77 (40%)	**	**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	104 (30%)	**	**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	7 (30%)	**	**	**	**											
ESPECE	62 (20%)	**	**	**												
ESPECE	103 (20%)	**														
ESPECE	14 (100%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	22 (100%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	64 (100%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	65 (100%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	43 (100%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
ESPECE	66 (70%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**			
ESPECE	67 (70%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**				
ESPECE	73 (70%)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**				
ESPECE	92 (40%)		**	**	**	**	**	**	**	**						
ESPECE	5 (60%)		**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	56 (20%)		**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	58 (20%)		**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	81 (30%)		**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	84 (30%)		**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	102 (20%)		**	**	**	**	**	**	**							
ESPECE	98 (20%)		**	**	**	**	**									
ESPECE	18 (40%)		**	**	**	**										
ESPECE	38 (20%)		**													
ESPECE	99 (20%)			**	**	**	**	**	**							
ESPECE	4 (100%)				**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	78 (100%)				**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	86 (40%)					**	**	**	**	**						
ESPECE	23 (90%)						**	**	**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	71 (60%)						**	**	**	**	**	**	**	**		
ESPECE	10 (100%)							**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	21 (80%)							**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	76 (90%)							**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	80 (90%)							**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	83 (90%)							**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	85 (90%)							**	**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	101 (100%)							**	**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	33 (70%)							**	**	**	**	**	**	**		
ESPECE	48 (70%)							**	**	**	**	**	**	**		
ESPECE	91 (60%)							**	**	**	**	**	**	**		
ESPECE	53 (50%)							**	**	**	**	**	**			
ESPECE	79 (90%)							**	**	**	**	**	**			
ESPECE	89 (90%)							**	**	**	**	**	**			
ESPECE	3 (90%)							**	**	**	**					
ESPECE	17 (80%)							**	**	**	**					
ESPECE	30 (30%)							**	**							
ESPECE	36 (20%)							**	**							
ESPECE	82 (70%)							**	**							
ESPECE	11 (70%)								**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	16 (100%)								**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	42 (90%)								**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	69 (70%)								**	**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	19 (100%)								**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	95 (30%)								**	**	**	**	**	**	**	
ESPECE	28 (70%)								**	**	**	**	**	**		
ESPECE	41 (90%)								**	**	**	**	**	**		
ESPECE	46 (70%)								**	**	**	**	**	**		
ESPECE	47 (60%)								**	**	**	**	**	**		
ESPECE	44 (90%)								**	**	**	**	**			
ESPECE	50 (40%)								**	**	**	**				
ESPECE	90 (60%)								**	**	**	**				
ESPECE	49 (30%)								**							
ESPECE	29 (60%)									**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	52 (60%)									**	**	**	**	**	**	**
ESPECE	45 (60%)									**	**	**	**	**	**	
ESPECE	9 (50%)										**	**	**	**	**	**
ESPECE	26 (70%)										**	**	**	**	**	**
ESPECE	12 (50%)										**	**	**	**	**	
ESPECE	27 (40%)										**	**	**	**	**	
ESPECE	51 (60%)										**	**	**	**	**	
ESPECE	2 (50%)										**	**	**	**		
ESPECE	1 (70%)											**	**	**	**	**
ESPECE	54 (20%)												**	**	**	
ESPECE	35 (20%)													**		
ESPECE	6 (60%)														**	**
ESPECE	13 (30%)															**

Programme permettant de construire automatiquement un tableau des relations d'association et d'exclusion entre des espèces fossiles provenant d'un nombre illimité de profils stratigraphiques

```
C      ALGORITHME FACILITANT L'ELABORATION D'ECHELLES BIOCHRONOLOGIQUES
C                              (DAVAUD E.,GUEX J. 1978)
C
       DIMENSION R(110,110),NE(110),LI(110),LS(110),NU(110),D(50,50)
      1,F(110),TITL(16),ER(110),V(6171),NA(110),NB(110)
       COMMON/A/V,M
       INTEGER R,S,V,SAT,ST,F,D,ER
C
C.....INTRODUCTION DU TITRE
       READ 197,TITL
  197  FORMAT(16A5)
C
C.....INTRODUCTION DU NOMBRE DE COUPES ET NOMBRE TOTAL D'ESPECES
       READ 100,NCOUP,M
       MST=M
       DO 4 I=1,M
       F(I)=0.
       DO 4 J=1,M
    4  R(I,J)=0
       DO 1 I=1,NCOUP
C
C.....INTRODUCTION DU NOMBRE D'ESPECES PRESENTES DANS LA I EME COUPE
       READ 100,MI
C
C.....INTRODUCTION DE L'EXTENSION RELATIVE DES ESPECES RECENSEES DANS
C                                LA I EME COUPE
       READ 100,(NE(K),LI(K),LS(K),K=1,MI)
  100  FORMAT()
C
C.....ETABLISSEMENT DE LA MATRICE DES RELATIONS STRATIGRAPHIQUES
C                           ENTRE ESPECES
       DO 2 J=1,MI
       NL=NE(J)
       F(NL)=F(NL)+1
       DO 2 L=1,J
       NC=NE(L)
       A=LS(J)-LI(L)
       B=LS(L)-LI(J)
       S=1
       IF(B.EQ.0)GO TO 3
       IF(A/B.GE.0.)GO TO 3
       S=2
       IF(A.LT.0.)S=-2
       IF(R(NL,NC).NE.0.AND.R(NL,NC).NE.S)S=1
    3  R(NL,NC)=S
       R(NC,NL)=S
       IF(IABS(S).GT.1)R(NC,NL)=-S
    2  CONTINUE
    1  CONTINUE
       DO 35 I=1,M
   35  NE(I)=I
   21  MO=M-1
C
C.....ELIMINATION DES RELATIONS STRATIGRAPHIQUES INDETERMINEES
       CALL INDET(R,M,NE,V,ER)
C.....SAUVETAGE DE LA DEMI MATRICE R
       K=0
       DO 30 I=1,M
       DO 30 J=I,M
       K=K+1
   30  V(K)=R(I,J)
C
C.....RECHERCHE DES ENSEMBLES D'ESPECES COMPATIBLES
       DO 5 L=1,M
       R(L,M+1)=1
       NU(1)=L
       N=1
       DO 6 K=1,M
       IF(R(L,K).NE.1.OR.K.EQ.L)GO TO 6
       N=N+1
       NU(N)=K
    6  R(L,K)=0
       R(L,L)=1
       DO 7 K=1,N
       ER(K)=0
       NK=NU(K)
       DO 7 I=1,N
       NT=NU(I)
    7  ER(K)=ER(K)+IABS(ISYM(NT,NK))
   53  IND=0
       NH=N
       NK=0
       LO=L-1
       CALL CLAS(NU,ER,N)
```

```
      DO 8 I=1,N
      IF(ER(I).EQ.N.OR.NU(I).EQ.L)GO TO 8
      NK=NU(I)
      IF(L.EQ.1)GO TO 8
      DO 70 K=1,LO
      IF(R(K,L)*R(K,NK))71,70,71
   71 IND=I
      GO TO 9
   70 CONTINUE
    8 CONTINUE
      IF(NK.EQ.0)GO TO 50
      IND=1
      IF(NU(1).EQ.L)IND=2
    9 DO 52 J=1,N
      NT=NU(J)
      NQ=NU(IND)
      ER(J)=ER(J)-1
      IF(ISYM(NT,NQ).NE.1)ER(J)=ER(J)-1
   52 CONTINUE
      N=N-1
      DO 51 I=IND,N
      ER(I)=ER(I+1)
   51 NU(I)=NU(I+1)
      GO TO 53
   50 DO 54 I=1,N
      NK=NU(I)
   54 R(L,NK)=1
    5 CONTINUE
      KEL=0
      IND=M+1
      N=M
C
C.....DETERMINATIONS DES ASSOCIATIONS UNITAIRES
   34 CALL ASBASE(N,M,R,LI,NU)
      IF(IND.EQ.M+1)CALL REDEF(R,V,N,M,1,IND)
      DO 37 J=1,N
      DO 37 I=1,N
   37 D(I,J)=0
      NO=N-1
      DO 33 I=1,MST
   33 ER(I)=0
      DO 10 L=1,NO
      LST=L+1
      DO 10 K=LST,N
C
C.....RELATION STRATIGRAPHIQUE ENTRE LA L IEME ET LA K IEME ASSOCIATION
C                 UNITAIRE : RECHERCHE DES ESPECES PRESENTES
      NL=0
      NK=0
      DO 11 I=1,M
      IF(R(L,I).NE.1)GO TO 12
      IF(R(K,I).EQ.1)GO TO 11
      NL=NL+1
      NA(NL)=I
      GO TO 11
   12 IF(R(K,I).NE.1)GO TO 11
      NK=NK+1
      NB(NK)=I
   11 CONTINUE
C
C.....ETABLISSEMENT DE LA MATRICE DES RELATIONS STRATIGRAPHIQUES
C     ENTRE LES ESPECES INVENTORIEES DANS LES DEUX ASSOCIATIONS
      CALL CHECK(V,NL,NK,NA,NB,ER,ST,SAT)
      IF(IABS(ST).NE.(NL*NK-SAT)*2)GO TO 10
      D(L,K)=1
      IF(ST.LE.0)GO TO 10
      D(K,L)=1
      D(L,K)=0
   10 CONTINUE
C
C.....REDEFINITION DES ASSOCIATIONS UNITAIRES APRES ELIMINATION
C               DE L'ESPECE LA PLUS PERTURBATRICE
      IND=MAXM(ER,M)
      IF(ER(IND).EQ.0)GO TO 20
   17 KEL=KEL+1
      CALL REDEF(R,V,N,M,KEL,IND)
      PRINT 701,NE(IND)
  701 FORMAT(//,1X'L ESPECE ',I3,' EST ELIMINEE')
      GO TO 34
C
C.....REARRANGEMENT DES LIGNES DE LA MATRICE R SELON L'ORDRE
C                   STRATIGRAPHIQUE
   20 MO=M+1
      DO 40 L=1,N
      R(L,MO)=1
      DO 40 K=1,N
   40 R(L,MO)=R(L,MO)+D(L,K)
      DO 42 L=1,N
      DO 43 J=L,N
      IF(R(J,MO).NE.L)GO TO 43
```

```
      DO 55 K=1,MO
   55 V(K)=R(L,K)
      DO 56 K=1,MO
      R(L,K)=R(J,K)
   56 R(J,K)=V(K)
      GO TO 42
   43 CONTINUE
   42 CONTINUE
C
C.....REARRANGEMENT DES COLONNES SELON L'ORDRE LEXICOGRAPHIQUE
      DO 45 K=1,M
      LI(K)=1
      LS(K)=0
      DO 46 I=1,N
      IF(R(N-I+1,K).EQ.1)GO TO 45
   46 LS(K)=LS(K)+1
   45 LS(K)=N-LS(K)
      CALL REORD(R,NE,LS,N,M)
      DO 47 K=1,M
      DO 44 I=1,N
      IF(R(I,K).EQ.1)GO TO 47
      LI(K)=LI(K)+1
   44 CONTINUE
   47 CONTINUE
      CALL REORD(R,NE,LI,N,M)
      DO 48 I=1,N
      DO 48 K=1,M
      NS=R(I,K)
      R(I,K)=3H  :
      IF(NS.EQ.1)R(I,K)=3H**:
   48 CONTINUE
      PRINT 198,TITL
  198 FORMAT(1H1,16A5,//,1X'(LA FREQUENCE GEOGRAPHIQUE DE CHAQUE ESPECE
     1 EST INDIQUEE ENTRE PARENTHESES)',//)
      PRINT 199,(K,K=1,N)
  199 FORMAT(20X,35I3)
      DO 49 K=1,M
      NL=NE(K)
      F(NL)=F(NL)*100/NCOUP
   49 PRINT 200,NE(K),F(NL),(R(J,K),J=1,N)
  200 FORMAT(2X,7HESPECE ,I3,1X,1H(,I3,2H%),2X,35A3)
      STOP
      END
      SUBROUTINE ASBASE(N,M,A,NA,NN)
C
C.....RECHERCHE DES ASSOCIATIONS UNITAIRES
      DIMENSION A(110,110),NA(110),NN(110)
      INTEGER A,S
      DO 85 I=1,N
      NA(I)=0
      DO 85 J=1,M
   85 NA(I)=NA(I)+A(I,J)
      NW=N-1
      DO 86 I=1,NW
C
C.....CLASSEMENT DES ENSEMBLES COMPATIBLES
      NV=I+1
      DO 86 L=NV,N
      IF(NA(L).LT.NA(I))GO TO 86
      NS=NA(I)
      DO 88 J=1,M
   88 NN(J)=A(I,J)
      NA(I)=NA(L)
      DO 89 J=1,M
   89 A(I,J)=A(L,J)
      NA(L)=NS
      DO 90 J=1,M
   90 A(L,J)=NN(J)
   86 CONTINUE
C
C.....ELIMINATION DES ENSEMBLES COMPATIBLES  REDONDANTS
      I=0
   91 I=I+1
      IF(I.GE.N)GO TO 99
      L=I
   92 L=L+1
      IF(L.GT.N)GO TO 91
      S=0
      DO 93 J=1,M
   93 S=S+A(I,J)*A(L,J)
      IF(S.NE.NA(L))GO TO 92
      N=N-1
      DO 94 K=L,N
      NA(K)=NA(K+1)
      DO 94 J=1,M
   94 A(K,J)=A(K+1,J)
      L=L-1
      GO TO 92
   99 RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE INDET(R,M,NE,V,ER)
C
C.....AMELIORATION DE LA MATRICE R PAR SUPPRESSION DES INDETERMINATIONS
C     ELIMINATIONS DES ESPECES POUR LESQUELLES LES INDETERMINATIONS
C                                   SUBSISTENT
C
      DIMENSION R(110,110),V(6171),NE(110),ER(110),NO(110)
      INTEGER R,V,ER
      MC=M-1
      KLAST=0
    6 KT=0
      DO 5 I=1,M
    5 ER(I)=0
      KEL=0
      DO 1 I=1,MC
      LT=I+1
      DO 1 J=LT,M
      KR=0
      IF(R(I,J).NE.0)GO TO 1
      KT=KT+1
      DO 3 K=1,M
      IF(R(I,K)*R(K,J).NE.4)GO TO 3
      KR=KR+1
      IF(KR.EQ.1)KFIRST=(R(I,K)+R(K,J))/2
      IF(KFIRST.NE.(R(I,K)+R(K,J))/2)GO TO 8
    3 CONTINUE
      IF(KR.EQ.0)GO TO 8
      KT=KT-1
      R(I,J)=KFIRST
      R(J,I)=-KFIRST
      GO TO 1
    8 ER(I)=ER(I)+1
      ER(J)=ER(J)+1
    1 CONTINUE
      IF(KT.EQ.KLAST)GO TO 13
      KLAST=KT
      GO TO 6
   13 IND=MAXM(ER,M)
      IF(ER(IND).EQ.0)GO TO 16
C
C.....ELIMINATION DE L'ESPECE PRESENTANT LE PLUS D'INDETERMINATIONS
C
      PRINT 100 ,IND,ER(IND)
  100 FORMAT(//,1X,'LES RELATIONS STRATIGRAPHIQUES DE L ESPECE ',I3,/
     11X,'SONT INDETERMINEES DANS 'I3,' CAS. CETTE ESPECE EST ELIMINEE')
      DO 11 I=1,M
      IF(R(IND,I).EQ.0)ER(I)=ER(I)-1
   11 R(IND,I)=0
      ER(IND)=0
      KEL=KEL+1
      NO(KEL)=IND
      GO TO 13
C
C.....COMPACTION DE LA MATRICE R
C
   16 IND=MAXM(NO,KEL)
      MO=M-1
      IF(NO(IND).EQ.0)RETURN
      IN=NO(IND)
      DO 14 I=IN,MO
      NE(I)=NE(I+1)
      DO 14 J=1,M
   14 R(I,J)=R(I+1,J)
      DO 15 J=IN,MO
      DO 15 I=1,MO
   15 R(I,J)=R(I,J+1)
      M=MO
      NO(IND)=0
      GO TO 16
      END



      FUNCTION MAXM(N,M)
C
C.....RECHERCHE DE L'INDICE DE L'ELEMENT MAXIMAL D'UN VECTEUR
      DIMENSION N(110)
      L=-10E+9
      DO 1 I=1,M
      IF(N(I).LT.L)GO TO 1
      MAXM=I
      L=N(I)
    1 CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE CLAS(NU,NR,N)
      DIMENSION NU(110),NR(110)
      NO=N-1
      DO 1 I=1,NO
      L=I+1
      DO 1 J=L,N
      IF(NR(J).LT.NR(I))GO TO 1
      NT=NR(I)
      NW=NU(I)
      NR(I)=NR(J)
      NU(I)=NU(J)
      NR(J)=NT
      NU(J)=NW
    1 CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE REDEF(R,V,N,M,KEL,IND)
C
C.....REDEFINITION DES ASSOCIATIONS UNITAIRES APRES L'ELIMINATION
C     D'UNE ESPECE 'PERTURBATRICE' :REINSERTION DES ESPECES
C                        QU'EXCLUAIT SA PRESENCE
      DIMENSION R(110,110),V(6171),NELIM(110)
      INTEGER R,V
      NELIM(KEL)=IND
      DO 18 L=1,N
C
C.....RECHERCHE DES ASSOCIATIONS CONTENANT L'ESPECE ELIMINEE
      IF(R(L,IND).EQ.0)GO TO 18
      R(L,IND)=0
      DO 80 ITER=1,2
      DO 80 I=1,M
      IF(R(L,I).EQ.1)GO TO 80
      DO 81 K=1,KEL
      IF(I.EQ.NELIM(K))GO TO 80
   81 CONTINUE
      DO 82 J=1,M
      IF(R(L,J).EQ.0)GO TO 82
      IF(ISYM(I,J).NE.1)GO TO 80
   82 CONTINUE
      IF(ITER.EQ.2)GO TO 86
      DO 85 J=1,M
      IF(R(L,J).EQ.0)GO TO 85
C
C.....LA COEXISTANCE ENTRE LES ESPECES I ET J EST-ELLE DEJA EXPRIMEE
C                        DANS UNE ASSOCIATION UNITAIRE
      DO 84 K=1,N
      IF(R(K,J)*R(K,I).EQ.1)GO TO 85
   84 CONTINUE
      R(L,I)=1
      GO TO 80
   85 CONTINUE
      GO TO 80
C....L'ESPECE NE(I) PEUT FAIRE PARTIE DE LA L IEME ASSOCIATION
   86 R(L,I)=1
   80 CONTINUE
   18 CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
      FUNCTION ISYM(L,K)
C
C.....STOCKAGE DE LA DEMI MATRICE R DANS UN VECTEUR V
      COMMON/A/V(6171),M
      INTEGER V
      IF(L.GT.K)GO TO 1
      KO=(L-1)*M-((L-1)*L)/2+K
      ISYM=V(KO)
      RETURN
    1 KO=(K-1)*M-((K-1)*K)/2+L
      ISYM=V(KO)
      IF(ABS(V(KO)).GT.1)ISYM=-1*V(KO)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE CHECK(V,NL,NK,NA,NB,ER,ST,SAT)
C
C.....VERIFICATION DE LA COHERENCE DES RELATIONS STRATIGRAPHIQUES
C     ENTRE LES ESPECES APPARTENANT A DEUX ASSOCIATIONS UNITAIRES
C          DONNEES ; DETECTION DES ESPECES 'PERTURBATRICES'
C
      DIMENSION NA(110),NB(110),ER(110),V(6171),SO(1000),ML(1000),MK(10
     100)
      INTEGER S,SA,ST,SAT,V,ER,SO
      SAT=0
      NR=0
      ST=0
      DO 14 I=1,NL
      S=0
      SA=0
      IL=NA(I)
      DO 15 J=1,NK
      IK=NB(J)
      ISY=ISYM(IK,IL)
      IF(ISY.EQ.1.OR.ISY.EQ.0)GO TO 16
      NR=NR+1
      SO(NR)=ISY
      ML(NR)=IL
      MK(NR)=IK
      S=S+SO(NR)
      GO TO 15
   16 SA=SA+1
   15 CONTINUE
      SAT=SAT+SA
      ST=ST+S
   14 CONTINUE
      IF(IABS(ST).EQ.(NL*NK-SAT)*2)RETURN
C
C.....DETECTION DES ESPECES PERTURBATRICES
      K=2
      IF(ST.GT.0)K=-2
      DO 13 I=1,NR
      IF(ST.EQ.0)GO TO 17
      IF(SO(I).NE.K)GO TO 13
   17 IL=ML(I)
      IK=MK(I)
      ER(IL)=ER(IL)+1
      ER(IK)=ER(IK)+1
   13 CONTINUE
      RETURN
      END


      SUBROUTINE REORD(R,NE,LI,N,M)
C
C.....REARRANGEMENT DES ESPECES DANS L'ORDRE LEXICOGRAPHIQUE
C
      DIMENSION R(110,110),NE(110),LI(110),NA(110)
      INTEGER R
      MO=M-1
      DO 1 I=1,MO
      KO=I+1
      DO 1 J=KO,M
      IF(LI(J).GT.LI(I))GO TO 1
      DO 3 L=1,N
    3 NA(L)=R(L,I)
      LT=LI(I)
      NT=NE(I)
      DO 4 L=1,N
    4 R(L,I)=R(L,J)
      NE(I)=NE(J)
      LI(I)=LI(J)
      DO 5 L=1,N
    5 R(L,J)=NA(L)
      NE(J)=NT
      LI(J)=LT
    1 CONTINUE
      RETURN
      END
```

Les temps d'exécution ne sont pas influencés par le nombre de coupes. Par contre, ils sont fonction directe du nombre total d'espèces utilisées et du nombre d'espèces «perturbatrices» (cf. p. 601). A titre indicatif, la résolution du problème complexe traité dans cet article a nécessité 80 secondes, tandis que celle du jeu d'essai (donné dans le tableau 1) n'a requis qu'un dixième de seconde.

Le mode de soumission des données est illustré par le jeu d'essai et brièvement commenté ici: Les espèces doivent être préalablement numérotées de 1 à *n*. On indique en premier lieu le titre du problème (80 caractères au maximum), le nombre total de coupes et le nombre total d'espèces. On introduit ensuite les informations biostratigraphiques relatives aux différentes coupes. L'ordre d'apparition des coupes peut être quelconque, de même que l'ordonnance des espèces à l'intérieur d'une coupe.

Pour chaque coupe on introduit le nombre d'espèces localement observées et l'extension relative de chacune d'entre elles en précisant les cotes (unités métriques ou arbitraires pouvant varier d'une coupe à l'autre) de sa première et de sa dernière apparition locale. Ainsi, dans une coupe donnée, si l'espèce 35 s'observe dès le niveau 2 mais n'apparaît pas au delà du niveau 7 son extension locale s'exprimera par le triplet 35, 2, 7. Toutes les données numériques sont introduites en format libre (séparées par une virgule ou un blanc). Pour plus de détail on se référera au listing du programme et au jeu d'essai (tabl. 1).

BIBLIOGRAPHIE

BRAMLETTE, M.N., & SULLIVAN, F.R. (1961): *Coccolithophorids and related Nannoplankton of the early Tertiary in California.* - Micropaleontology *7*/2.

GUEX, J. (1977): *Une nouvelle méthode d'analyse biochronologique. Note préliminaire.* - Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne *214.*

— (1978a): *Le Trias inférieur des Salt Ranges (Pakistan): problèmes biochronologiques.* - Eclogae geol. Helv. *71*/1.

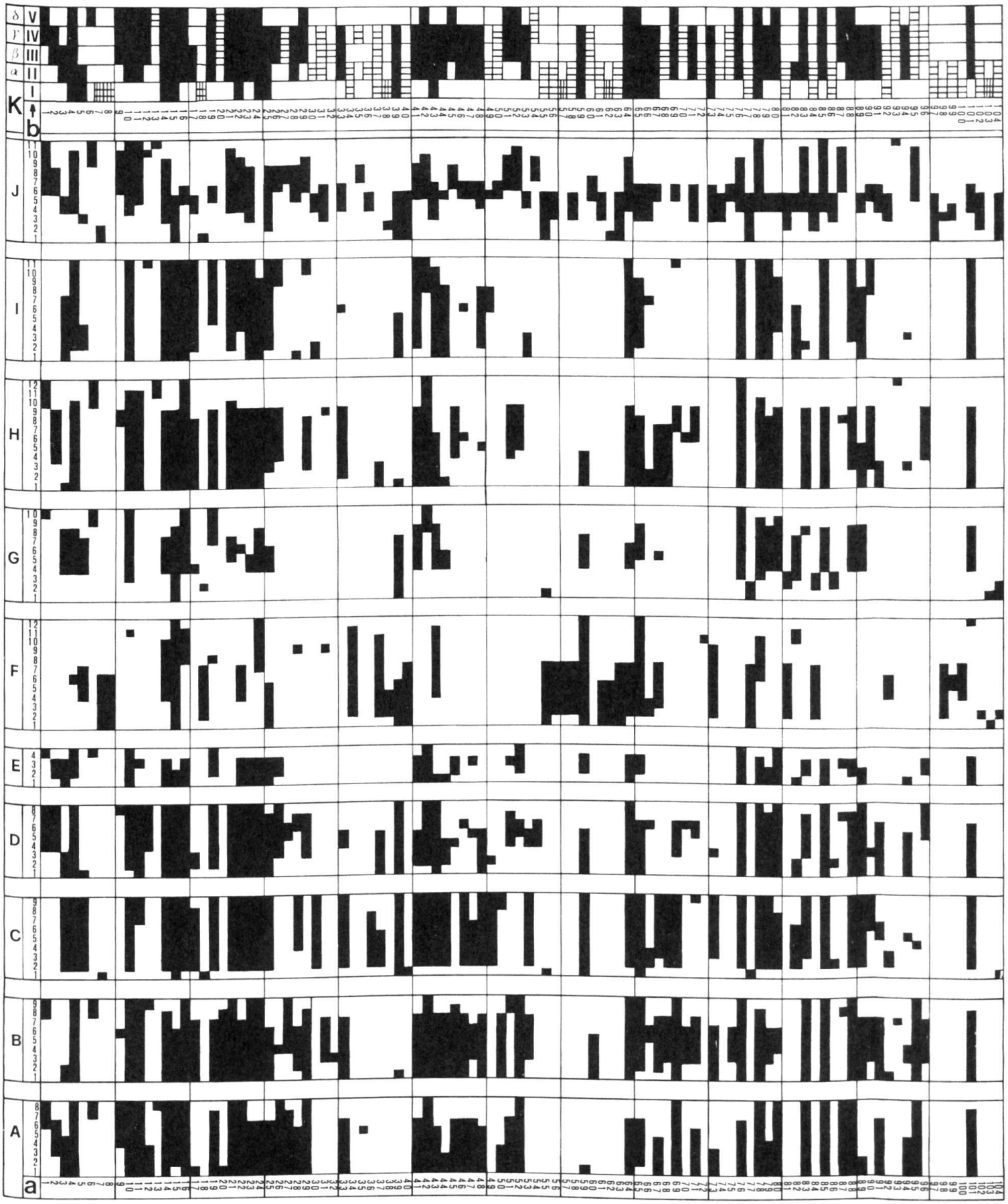
— (1978b): *Influence du confinement géographique des espèces fossiles sur l'élaboration d'échelles biochronologiques et sur les corrélations.* - Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne *230.*

MARTINI, E. (1971): *Standard Tertiary and Quaternary Calcareous Nannoplankton Zonation.* - Proc. II. plankt. Conf. Roma, 1970 (Tecnoscienza, Roma).

SULLIVAN, F.R. (1965): *Lower Tertiary Nannoplankton from the California Coast Ranges. II. Eocene.* - Univ. Calif. Publ. geol. Sci. *53.*

Légende de la planche hors-texte

A à *J*	= Profils stratigraphiques (noms des localités: cf. annotation 3, p. 596).
Colonne *a*	= Horizons locaux identifiables dans les profils *A* à *J* (correspondance avec les niveaux de BRAMLETTE & SULLIVAN 1961 et SULLIVAN 1965: cf. annotation 3).
1 à 104	= Espèces (nomenclature: cf. annotation 2, p. 595).
K	= Solution du problème étudié.
Colonne b	= Intervalles I à V engendrés par les espèces qui présentent une large distribution géographique.
Barres noires	= Distribution stratigraphique relative des espèces présentes dans plus de 50% des profils.
Barres quadrillées	= Espèces éliminées en raison de leur distribution géographique trop restreinte, mais totalement exclusives de celles qui apparaissent dans l'intervalle II (= *a*).
Echelons	= Espèces rares, réintégrées en fonction de la position qu'elles occupent au sein des intervalles I à V.



Distribution stratigraphique du nannoplancton dans le Paléocène supérieur et l'Eocène inférieur et moyen de Californie (légende en face)