



Paléontologie systématique (Micropaléontologie)

L'emploi des méthodes de la théorie des ensembles flous à l'étude biométrique de l'espèce *Nummulites millecaput* dans la partie occidentale de la Téthys

György Bárdossy ^{a,*}, Tibor Kecskeméti ^b, János Fodor ^c

^a Kossuth-tér 18, 1055 Budapest, Hongrie

^b Département de géologie et paléontologie, musée d'Histoire naturelle, POB 137, 1431 Budapest, Hongrie

^c Département « Biomathématique et Informatique », Univ. Szt. István, Budapest, István út 2, H-1078, Hongrie

Reçu le 1 avril 2003 ; accepté le 24 juin 2003

Présenté par Michel Durand-Delga

Résumé

L'objet de cet article est de démontrer que la théorie des ensembles flous peut contribuer à l'évaluation de problèmes paléontologiques. L'espèce *Nummulites millecaput*, Boubée a été choisie comme exemple d'étude. Cent spécimens, provenant de quatre localités (Arrimblar, Adelholzen, Dudar, Mont-Kotuc) ont été préparés (sections équatoriales) pour la mesure des caractères externes et internes de cette espèce. Une évaluation statistique des résultats a été réalisée, suivie par la construction des fonctions d'appartenance. Une représentation graphique de ces dernières a démontré les transitions des différents caractères d'une localité à l'autre. Les résultats de cette évaluation confirment que la même espèce – *Nummulites millecaput* – s'est propagée de l'Aquitaine jusqu'en Arménie au cours de l'Éocène. **Pour citer cet article : G. Bárdossy et al., C. R. Palevol 2 (2003).**

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés

Abstract

Application of the fuzzy set theory to the biometric evaluation of the species *Nummulites millecaput* in the western part of the Tethys. The goal of this paper is to demonstrate the ability of the fuzzy-set theory to contribute to the evaluation of paleontological problems. As an example, the species *Nummulites millecaput*, Boubée has been chosen. One hundred specimens of this species, collected from four localities (Arrimblar, Adelholzen, Dudar, and Mount-Kotuc) have been prepared (equatorial sections) for the biometric measurement of the external and internal characteristics. First a traditional statistical evaluation was performed, followed by the construction of membership functions, the latter ones expressing in the best way the transitions from

* Corresponding author.

Adresses e-mail : h4750bar@helka.iif.hu (G. Bárdossy), kecs@paleo.nhmus.hu (T. Kecskeméti), jfodor@univet.hu (J. Fodor).

one locality to the other. The results of this evaluation confirmed that from Aquitaine (France) to Armenia, the same species – *Nummulites millecaput* – was distributed during the Eocene. **To cite this article:** G. Bárdossy et al., C. R. Palevol 2 (2003). © 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Nummulites ; Biométrie ; Ensembles flous ; Incertitudes ; Méthodes statistiques ; Éocène

Keywords: Nummulites; Biometry; Fuzzy sets; Uncertainties; Statistical methods; Eocene

Abridged English version

The authors try in this article to show that the application of the fuzzy-set theory may contribute to the evaluation of biometric measurements. The species *Nummulites millecaput*, very common in the Middle Eocene sediments of the western part of the Tethys, has been chosen for the test calculations. Four localities have been selected for detailed sampling and biometric investigation: Arrimblar in southwestern France, Adelholzen in Bavaria, Germany, Dudar, in the Bakony Mts., Hungary, and the Mount-Kotuc, in Armenia, 35 km to the southeast of Jerevan. The geographic positions of these localities are shown in Fig. 1. A rich collection of *Nummulites* from these localities, preserved in the Museum of Natural Science, Budapest, served as a base to our investigations.

Altogether 100 specimens have been prepared for the following measurements (equatorial sections). External characteristics: diameter and thickness of the house. Internal characteristics: diameter of the protoconch, number of whorls in radial direction, number of separating lamellae in one quarter of the house, ratio of the spiral channels in two successive whorls of the house, height and length of the chambers, ratio of the height versus the length of the chambers. All measurements were carried out on the macrospheric generation of *N. millecaput*.

The results of the traditional statistical measurements are presented in Tables 1 and 2. They indicate gradual changes of the measured properties in the west–east direction. The most interesting in this respect is the ratio of the height versus the length of the chambers, as shown in Fig. 2. Each locality is represented separately and the averages of the successive whorls are numerated and connected by straight lines. This type of presentation depicts the evolution of the specimens at each locality. The diagram shows a surprisingly regular development. At Arrimblar first, only

the length of the chambers increases, but after the fourth whorl an abrupt change takes place: the height of the chambers rapidly decreases, accompanied by a slight increase of the length of the chambers. At the Dudar locality, the evolution is similar, but the change is less pronounced and the overall height of the chambers is a little larger. At the Adelholzen locality, both the height and length of the chambers increase, but after the fourth turn, the height remains constant. Finally, at Mount-Kotuc, the trend of the evolution is very similar to that of Adelholzen, but the averages of the height are again a little larger. Altogether, a clear west–east trend could be demonstrated. This trend is so regular that it cannot be considered as a random phenomenon. We interpret it as an evolution of the *N. millecaput* species, which occurred parallel to the eastward transgression of the Tethys.

For a better understanding of these gradual transitions, the so-called *membership functions* of the fuzzy-set theory were constructed by us for the averages of each locality. The limited extent of this article allowed only the presentation of one of these diagrams, that of the membership functions of the height of the house in the second whorl (Fig. 3). The averages of the localities are different, but in the same time, they overlap completely. This is an additional proof in favour of our opinion that the same species – *N. millecaput* – can be followed all over the western Tethys, from southwestern France to Armenia.

The results of this investigation confirmed that the traditional statistical evaluations and the methods of the fuzzy-set theory complete each other. Relationships could be detected this way, which would remain concealed without biometric measurements and without an up-to-date geomathematical evaluation. In our opinion, this methodology can be applied to other taxonomical problems of palaeontology as well.

1. Introduction

Les méthodes biométriques sont employées depuis longtemps en paléontologie pour la résolution de problèmes taxonomiques, biostratigraphiques et paléogéographiques. Dans cet article, nous essayons de démontrer que la théorie des ensembles flous peut contribuer à l'évaluation de ces problèmes. Les Nummulites ont été choisies pour cette démonstration, car elles sont très répandues dans les couches éocènes de la Téthys occidentale et ont été bien étudiées en France, en Hongrie et dans d'autres pays européens. Les Nummulites ont été le sujet d'une coopération scientifique remarquable au XIX^e siècle entre les géologues français et hongrois [2,7,8]. Une riche collection de Nummulites de la Téthys occidentale, conservée au musée d'Histoire naturelle de Budapest nous a offert la possibilité de les étudier au moyen des méthodes statistiques traditionnelles, puis par les méthodes issues de la théorie des ensembles flous. L'espèce *Nummulites millecaput* Boubée (1832), sujet de notre étude, est répandue à la bordure septentrionale de la Téthys à partir de la France (Aquitaine, Alpes-Maritimes), à savoir l'Espagne, l'Italie, puis l'Allemagne, la République tchèque, la Slovaquie, l'Autriche, la Hongrie, la Croatie, la Grèce et la Pologne, jusqu'en Arménie [9,10]. Apparaissant au Lutétien moyen en France, elle se développe au Lutétien supérieur en Europe centrale et est attribuée au Priabonien inférieur en Arménie où, selon Blondeau [3], c'est plutôt la biozone biarritzienne (Lutétien terminal). Une discussion existe aussi de nos jours pour savoir si *Nummulites maximus* D'Archiac et Haime (1853), décrite en Arménie [5], est vraiment une espèce indépendante, ou bien si elle doit être rapportée à l'espèce *N. millecaput*. Notre but est en particulier de contribuer par la méthode biométrique à la résolution de ce problème. Notre étude se limite aux spécimens de la génération macrosphérique.

2. Échantillonnage, méthodes d'étude, incertitudes

Les spécimens de *N. millecaput* se trouvent surtout dans les calcaires épicontinentaux de bordure de la Téthys. Selon Blondeau [3], l'espèce se développe le mieux dans un milieu ouvert et aéré, chaud et peu profond. Notre collection provient de quatre localités

où la composition de la roche encaissante a permis la séparation et la préparation des tests (calcaires marneux, argileux, sableux) :

- *Arrimblar*, près de Bastennes, Aquitaine, localité type de *N. millecaput* [3], coll. : De Zanche, Pavlovic 1967 et Schaub 1969 [13] ;
- *Adelholzen*, Höll-Graben, Bavière, Allemagne [6], coll. : Kecskeméti 1980 ;
- *Dudar*, montagne Bakony, Hongrie [11], coll. : Kecskeméti 1989 ;
- *Mont-Kotuc*, près de Tchimankend (35 km au sud-est d'Erevan), Arménie [5], coll. : Kecskeméti 1986.

Ces localités (Fig. 1) se situent sur une distance totale, ouest-est, de 3800 km. Du fait des difficultés de préparation, nous n'avons réussi à effectuer de sections équatoriales que pour 100 spécimens sur les 303 retenus. Nous avons relevé les mensurations morphologiques sur les caractères décrits par Blondeau dans sa monographie sur les Nummulites [3].

- *Caractères externes* : diamètre et épaisseur du test (mesuré par palmer à vis micrométrique, erreur des mesures $\pm 0,1$ mm).
- *Caractères internes* : nombre de tours, diamètre de la protoconque, nombre de cloisons vues sur les coupes équatoriales en direction radiale, « pas de la spire » (rapport de deux tours de spires successifs – selon Rozlozsnik [12]), hauteur des loges, longueur des loges et rapport hauteur-longueur (mesuré par microscope optique, erreur des mesures $\pm 0,01$ mm).

Les *incertitudes* suivantes peuvent être attribuées à notre étude biométrique.

1. Les quatre localités choisies sont-elles représentatives de la région étudiée ? Selon nos études comparatives avec les autres localités connues, il s'agit de spécimens typiques de *N. millecaput*. Arrimblar est même la localité type de l'espèce. Celle-ci est accompagnée dans toutes les localités étudiées par les mêmes autres espèces de Nummulites, ce qui confirme la représentativité des localités choisies.
2. Le nombre de spécimens préparés et étudiés permet-il une étude biométrique ? Cent spécimens sont suffisants selon les traités de statistique. Le nombre des spécimens dans chacune des localités varie entre 17 et 33, ce qui permet aussi une évaluation statistique.

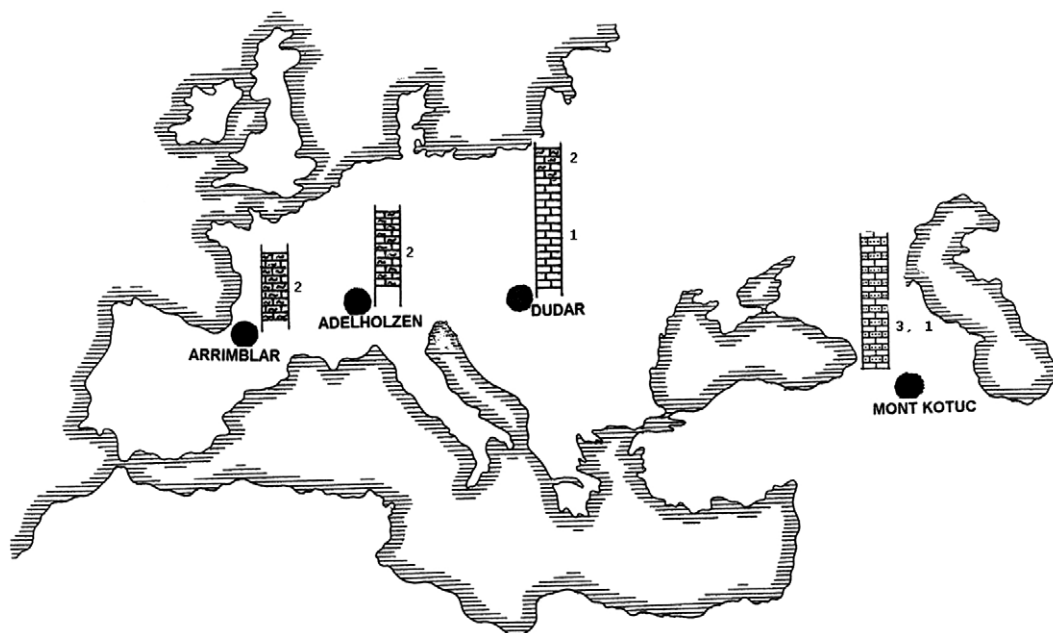


Fig. 1. Position géographique des localités étudiées. Les colonnes montrent la composition des roches encaissantes. Légende : 1, calcaire argileux ; 2, calcaire marneux, 3, calcaire gréseux.

Fig. 1. Geographic position of the studied localities. The columns show the lithology of the host rocks. Legend: 1, clayey limestone; 2, marly limestone; 3, sandy limestone.

3. Quelle est l'ampleur des erreurs de mesure ? Les valeurs d'erreurs indiquées ci-dessus ont été contrôlées par des mesures répétées sur le même spécimen. Pour le microscope optique, une erreur relative de $\pm 21\%$ a été déterminée après 10 mesures répétées, ce qui est acceptable pour une évaluation statistique.
4. Quelle est la subjectivité des mesures ? Il est bien connu que toutes les mesures biométriques contiennent des éléments subjectifs, surtout pour les caractères internes des Nummulites. Il est impossible d'exécuter ces mesures exactement de la même façon. Dans notre étude, nous avons essayé de minimaliser cette erreur, un seul d'entre nous, T. Kecskeméti, d'ailleurs spécialiste des Nummulites, ayant réalisé la préparation des échantillons et toutes les mesures avec le même microscope, dans un intervalle de temps de quelques mois. De cette façon, les résultats sont comparables entre eux. Bien entendu, on ne peut pas éliminer les incertitudes de ces études, mais on peut en tenir compte, en employant des méthodes statistiques et des ensembles flous.

3. Les résultats de l'évaluation statistique

Les résultats de l'étude statistique des *caractères externes* sont présentés dans le [Tableau 1](#). On constate une diminution graduelle du diamètre du test de l'ouest vers l'est. Ceci est confirmé par les valeurs de l'intervalle de confiance, pris au seuil de confiance de 95%. Ce paramètre représente la population entière de la localité donnée. La distribution est partout presque normale ; ainsi, les moyennes obtenues sont valables.

La variabilité du diamètre montre également un changement graduel, de l'ouest vers l'est, attesté par le coefficient de variation. En somme, parallèlement à la diminution du diamètre, la variabilité (hétérogénéité) des populations diminue de l'ouest vers l'est.

L'épaisseur du test ne suit pas les changements présentés ci-dessus. Les épaisseurs moyennes sont presque partout les mêmes, à l'exception de la localité de Dudar, où les spécimens sont nettement moins épais et leur variabilité est plus grande que dans les trois autres localités. Ceci est confirmé par le « domaine » (maximum moins minimum) plus long dans la localité de Dudar.

Tableau 1
Évaluation statistique des caractères externes
Table 1. Statistical evaluation of the external characteristics

Diamètre du test							
Localité	Moyenne (mm)	Intervalle de confiance (seuil de confiance : 95%) (mm)	Écart type (mm)	Coefficient de variation (%)	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Domaine (mm)
Arrimblar	5,5	5,1–5,9 (0,8)	±0,8	±14,3	4,6	7,1	2,5
Adelholzen	5,1	4,9–5,3 (0,4)	±0,5	±10,7	4,3	6,7	2,4
Dudar	5,0	4,7–5,2 (0,5)	±0,6	±12,5	3,9	6,7	2,8
Mont-Kotuc	4,6	4,4–4,8 (0,4)	±0,4	±9,1	3,9	5,6	1,7
Épaisseur du test							
Arrimblar	2,7	2,5–2,9 (0,4)	±0,4	±14,2	2,0	3,4	1,4
Adelholzen	2,8	2,6–2,9 (0,3)	±0,4	±14,9	2,3	4,2	1,9
Dudar	2,1	2,0–2,3 (0,3)	±0,5	±24,7	1,4	3,8	2,4
Mont-Kotuc	2,9	2,6–3,2 (0,6)	±0,6	±19,9	2,2	4,2	2,0

Parmi les *caractères internes*, le nombre de tours est le plus stable : les moyennes « arrondies » sont de 6, à l'exception de la localité d'Arrimblar, avec 5 tours.

La *protoconque* présente une importance taxonomique particulière [3]. Les résultats de l'évaluation statistique de ce paramètre sont présentés dans le **Tableau 2**. La moyenne du diamètre de la protoconque montre une légère augmentation de l'ouest vers l'est, confirmée par les intervalles de confiance des populations. Notons que cette augmentation est parallèle à la diminution du diamètre du test, indiquée ci-dessus. La variabilité de ce paramètre a la même importance que celle des caractères externes.

Le nombre de cloisons vues sur les coupes équatoriales augmente régulièrement en direction radiale, sans différences significatives entre les quatre localités étudiées.

Les rapports de deux tours de spire successifs (le « pas ») augmentent régulièrement à Adelholzen et au Mont-Kotuc. Contrairement à cette tendance, nous avons d'abord constaté à Arrimblar et à Dudar une augmentation (rapports 1/2 et 2/3), puis une diminu-

tion graduelle (rapports 3/4, 4/5 et 5/6). La même évolution a été constatée quant à la hauteur des loges, par le calcul des moyennes des localités. La longueur des loges augmente plus ou moins régulièrement, en passant du premier tour vers l'extérieur. Tout cela nous a paru d'abord énigmatique et nous ne pouvions pas expliquer les tendances constatées.

Une régularité surprenante s'est présentée quand nous avons étudié le rapport de la hauteur des loges à leur longueur (**Fig. 2**). Chaque localité est représentée séparément. En reliant les moyennes des tours successifs, des « courbes » ont été obtenues, représentant les changements d'évolution des loges d'un tour à l'autre. Ce changement se fait graduellement de l'ouest vers l'est : on voit les courbes s'ouvrir dans cette direction. La tendance générale à Arrimblar est d'abord une augmentation nette de la longueur des loges, accompagnée par une augmentation très limitée de la hauteur. Puis, après le quatrième tour, il se produit un changement de tendance : la hauteur moyenne diminue nettement, avec une très légère augmentation de la longueur. À Dudar, on observe la même tendance, mais

Tableau 2
Évaluation statistique de la protoconque
Table 2. Statistical evaluation of the protoconch

Localité	Moyenne (mm)	Intervalle de confiance (seuil de confiance : 95%) (mm)	Écart type (mm)	Coefficient de variation (%)	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Domaine (mm)
Arrimblar	0,89	0,84–0,94 (0,10)	±0,10	±11,2	0,74	1,11	0,37
Adelholzen	1,10	1,00–1,18 (0,18)	±0,23	±20,7	0,81	1,70	0,89
Dudar	1,05	0,98–1,12 (0,14)	±0,20	±19,3	0,71	1,68	0,97
Mont-Kotuc	1,14	1,05–1,23 (0,18)	±0,19	±16,5	0,87	1,51	0,64

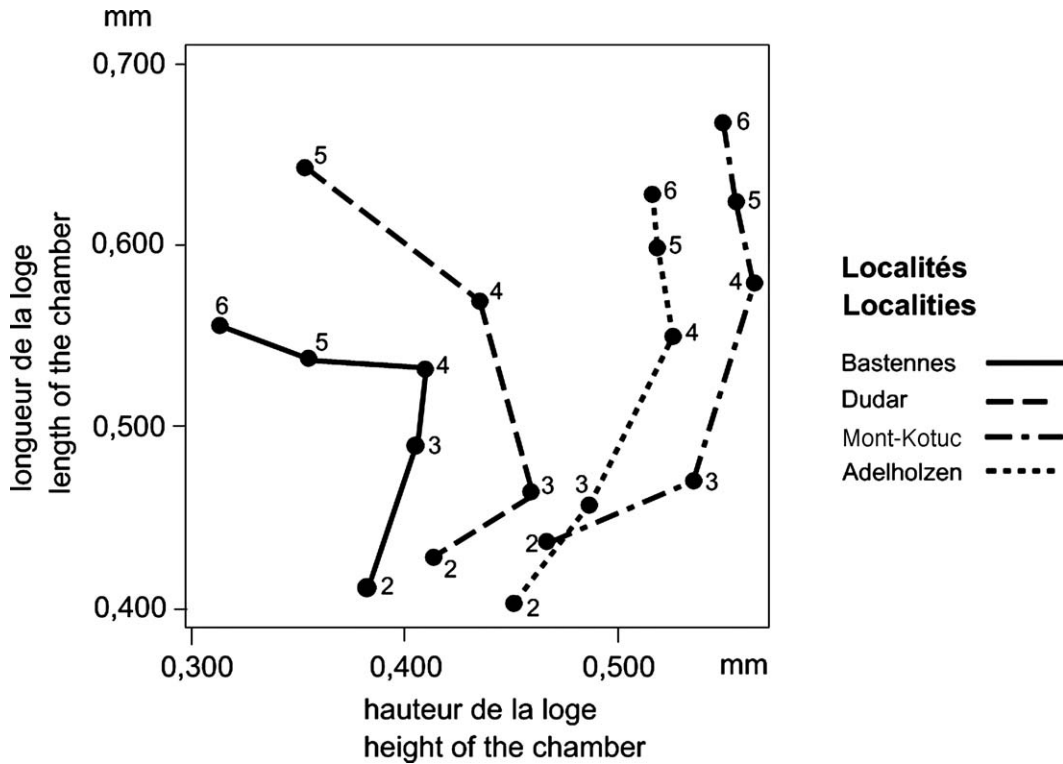


Fig. 2. Rapport des moyennes de la hauteur des loges à celles des longueurs. Les nombres indiquent l'ordre des tours successifs.
Fig. 2. Relation of the height of the chambers to their length (mean values). The numbers indicate the order of the whorls.

qui s'exprime moins nettement, tandis que la courbe « glisse » vers des valeurs plus larges de la hauteur des loges. Cette même tendance se développe à Adelholzen, et la courbe est devenue presque ouverte. Enfin, en Arménie et au Mont-Kotuc la courbe glisse encore un peu plus vers de larges hauteurs de loges.

Nous ne connaissons pas les raisons paléontologiques de ce changement graduel dans l'évolution des loges. Mais une chose est certaine : ce changement est si régulier et graduel que nous devons accepter que, parallèlement à la transgression de la Téthys vers l'est, la même espèce *N. millecaput* ait évolué. Les raisons ont été certainement complexes : faciologiques, climatiques, etc.

4. Les résultats de l'évaluation par la méthode des ensembles flous

La théorie des ensembles flous, élaborée par Zadeh [14], permet, en abandonnant les axiomes de la théorie

des probabilités, l'évaluation quantitative des incertitudes et des transitions. On peut représenter graphiquement ces valeurs par l'emploi des *fonctions d'appartenance* et on peut faire avec celles-ci des calculs arithmétiques [4]. Ce sont surtout les problèmes d'évolution d'une espèce donnée qui nous ont amenés à appliquer cette méthodologie. D'ailleurs, la méthode a été employée avec succès par nous dans divers autres domaines de la géologie : estimation des ressources minérales, analyse quantitative de phases minéralogiques, calculs de sûreté des dépôts de déchets radioactifs, risques sismiques, etc. [1].

Dans le cas présent, nous avons choisi comme « support » l'intervalle entre le minimum et le maximum de la localité donnée, par exemple le diamètre de la protoconque. La moyenne de la localité représente la valeur centrale du « noyau » de la fonction d'appartenance. Des deux côtés s'ajoutent d'abord l'erreur de mesure, puis l'intervalle de confiance au seuil de confiance de 95%. On obtient ainsi des formes trapézoïdales, comme on le voit sur la Fig. 3.

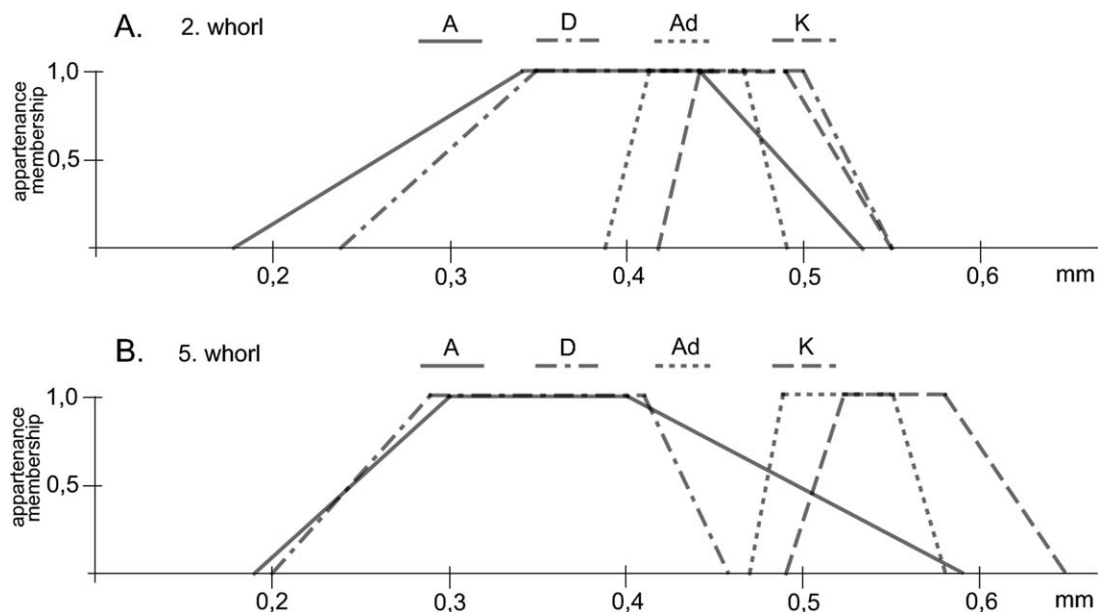


Fig. 3. Fonctions d'appartenance de la hauteur des loges. (A) Deuxième tour. (B) Cinquième tour. Légende: A = Arrimblar, Ad = Adelholzen, D = Dudar, K = Mont-Kotuc.

Fig. 3. Membership functions representing the height of the chambers. (A) Second whorl. (B) Fifth whorl. Legend: A = Arrimblar, Ad = Adelholzen, D = Dudar, K = Mont-Kotuc.

Nous avons construit des fonctions d'appartenance pratiquement pour tous les caractères externes et internes de *N. millecaput*, localité par localité. L'espace limité de cet article ne permet pas de les présenter ici, à l'exception de la hauteur et de la longueur des loges (Fig. 3). Les fonctions d'appartenance pour le diamètre et l'épaisseur du test ont montré une transition graduelle des moyennes et des spécimens individuels à partir d'Arrimblar jusqu'au Mont-Kotuc. Ceci est confirmé par le chevauchement des intervalles de support des quatre localités étudiées. La même chose a été trouvée pour le diamètre de la protoconque.

En ce qui concerne la hauteur et la longueur des loges, nous avons effectué une évaluation par tours successifs, car l'évolution change selon les tours, comme notre évaluation statistique le prouve. Pour la longueur des loges, nous avons trouvé de nouveau des changements graduels, à partir d'Arrimblar jusqu'au Mont-Kotuc. Concernant la hauteur des loges, les résultats sont différents : jusqu'au quatrième tour, la transition graduelle se confirme de nouveau. Comme exemple, les fonctions d'appartenance des deuxième tours des diverses localités sont représentées sur la Fig. 3A. Les moyennes des localités sont presque les mêmes et les intervalles du support se recouvrent pres-

que complètement. Mais aux cinquième et sixième tours, les localités se séparent, surtout Arrimblar et Dudar ; leur variabilité est aussi très forte (Fig. 3B). On pourrait penser à l'individualisation d'une nouvelle espèce ou sous-espèce, surtout en Arménie. Nous rejetons cette supposition, car le changement d'évolution des tours est si graduel et régulier (Fig. 2) qu'il est beaucoup plus raisonnable de maintenir le même nom d'espèce. D'ailleurs, tous les autres caractères étudiés par nous confirment la présence d'une seule espèce.

5. Conclusions

- Les résultats de notre étude confirment que la même espèce – *N. millecaput* – est représentée pendant l'Éocène de l'Aquitaine, en France, jusqu'en Arménie.
- Les changements des caractères externes et internes sont en relation avec la transgression de la Téthys, qui s'avancait de l'ouest vers l'est à cette époque.
- On peut obtenir des informations complémentaires significatives en ajoutant à l'évaluation des mesures biométriques une étude statistique dé-

taillée et les fonctions d'appartenance de la théorie des ensembles flous. À notre avis, ces méthodes sont également applicables à d'autres problèmes paléontologiques.

Références

- [1] G. Bárdossy, J. Fodor, Traditional and new ways to handle uncertainty in geology, *Nat. Resour. Res.* (2001) 179–187.
- [2] G. Bárdossy, J. Dercourt, M. Durand-Delga, Rôle des géologues français dans l'essor de la géologie au XIX^e siècle en Europe centrale et spécialement en Hongrie, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 330 (2000) 585–594.
- [3] A. Blondeau, *Les Nummulites*, Vuibert, Paris, 1972.
- [4] D. Dubois, H. Prade, *Fundamentals of Fuzzy Sets*, Kluwer Academic Publishers, Boston, London, Dordrecht, 2000.
- [5] S.M. Grigorian, *Nummulites et Orbitoïdes de la république soviétique d'Arménie*, Erevan (1987) (en russe).
- [6] H. Hagn, H. Schaub, E. Martini, Höll-Graben südlich Bad Adelholzen, *Geol. Bavarica* 82 (1981) 130–132.
- [7] M. Hantken, Die Mitteilungen der Herren Edm. Hébert und Munier-Chalmas über die ungarischen alltertiären Bildungen, *Literarische Berichte aus Ungarn* 3 (1879) 719–787.
- [8] E. Hébert, E. Munier-Chalmas, Terrain tertiaire de la Hongrie, *C. R. Acad. Sci. Paris* (16 & 26 juillet 1877) 122–128 181–186.
- [9] L. Hottinger, H. Schaub, L. Vonderschmitt, Zur Stratigraphie des Lutétien im Adour-Becken, *Eclog. geol. Helv.* 49 (1956) 453–468.
- [10] T. Kecskeméti, Appréciation de quelques espèces de Nummulites par rapport à la valeur stratigraphique, avec la prise en considération des facteurs paléogéographiques, *Annales Inst. geol. publ. Hung.* 54 (1971) 187–199 (en français).
- [11] T. Kecskeméti, Bakony Mts, Dudar, Ördögárok valley head, *Basic geological sections of Hungary*, 1988, pp. 1–4.
- [12] P. Rozložník, Einleitung in das Studium der Nummulinen und Assilinen, *Mitteilungen aus dem Jahrb. der Kgl. Ung. Geol. Anstalt. Budapest* 26 (1927).
- [13] H. Schaub, Nummulites et Assilines de la Téthys paléogène. Taxonomie, phylogénèse et biostratigraphie, *Schweiz. Paleont. Abh.* 104 (1981) 1–236.
- [14] L. Zadeh, Fuzzy sets as a basis for the theory of possibility, *Fuzzy Set. Syst.* 1 (1978) 3–28.