

## LES REMPLISSAGES DES GROTTES

### CONCRÉTIONS ET DÉPÔTS DÉTRITIQUES

#### APERÇU SYNTHÉTIQUE

par

Camille Ek

#### Résumé

Une revue synthétique des recherches des vingt dernières années (1965-1985) est ici l'occasion de dégager les tendances actuelles et les perspectives de l'étude des sédiments des cavités karstiques. Les remplissages des grottes comportent des matériaux d'origine chimique, détritique et organique. On ne considère ici que les dépôts de précipitation et les dépôts détritiques.

Parmi les dépôts de précipitation, on s'est limité aux concrétions les plus typiques: celles qui sont constituées de carbonates: composition, mode de formation, âge, implications paléoclimatiques.

Les sédiments détritiques peuvent provenir du massif même de la grotte, ou de l'extérieur. On passe en revue les études récentes se leurs modes de transport, leurs faciès, et les séquences sédimentaires.

L'approche énergétique de l'étude des sédiments de grottes apparaît comme un concept récent riche de promesses. Les remplissages de cavités ont d'autre part parfois une grande importance économique, et leur étude n'est pas sans utilité directe.

## Abstract

### CAVE FILLS: OVERVIEW

Cave fills include chemical, detrital, and organic materials (not to mention ice). The two first kinds will be considered here, in a synthetic overview of the scientific work over the last twenty years.

The most abundant and typical among precipitated materials are carbonate speleothems. Recent studies on their composition, growth, age, and palaeoclimatic environment are here reviewed.

Clastic sediments in caves may be autochthonous or allochthonous. The literature reviewed includes works on their origin, transportation, and sedimentary sequences.

A new approach to the study of cave fills is based on the notion of the energetic balance. This can give a new impulse to research on sediments, which are sometimes valuable in economic terms (phosphates, nitrates, oil, to say nothing of the touristic —thus economic— value of speleothems).

### INTRODUCTION

Les remplissages des grottes peuvent être chimiques, détritiques ou organiques. Ils occupent fréquemment une partie importante des cavités dont ils affectent la morphologie; leur existence influe souvent sur l'évolution ultérieure des parties de grotte qu'ils occupent. Parfois même ils comblent tout entière la cavité, la transformant alors en grotte fossile.

De nombreuses classifications ont été proposées pour les remplissages des grottes. Du fait de la nature de la roche encaissante, on peut diviser les dépôts en calcaires et non calcaires. On peut, dans le même esprit, les classer en autochtones et allochtones, suivant qu'ils proviennent ou non de matériaux pris dans la grotte et dans son massif; on a proposé aussi, ce qui est un peu différent, de les diviser en matériaux transportés et matériaux formés sur place.

Toute classification génétique, dans l'endokarst, est difficile et imparfaite à cause de la complexité des mécanismes mis en jeu: mouvements en masse, transport par l'eau, processus chimiques ou physico-chimiques de précipitation, action des organismes vivants...

En suivant J. N. Jennings (1971) et A. Bögli (1980), nous proposons de classer pragmatiquement les dépôts comme suit:

SEDIMENTS DETRITIQUES: blocs, graviers, sables, silts, argiles (au sens granulométrique), mis en place par des processus mécaniques le plus souvent avec l'action de l'eau, parfois par la seule action de la gravité (effondrements, éboulements,...).

DEPOTS DE PRECIPITATION: concrétions calcaires surtout; celles-ci constituent certainement l'élément le plus caractéristique des remplissages des grottes et l'élément le plus abondant parmi les dépôts de précipitation. Mais il faut y ajouter le gypse et tous les autres minéraux susceptibles de se former en grotte. On trouvera une revue très complète des minéraux des grottes dans A Bögli (1980), qui en énumère une centaine, et une étude remarquablement documentée dans C. A. Hill (1976).

DEPOTS D'ORIGINE ORGANIQUE; soit animale (guano, brèches ossifères, etc.), soit végétale (humus mêlé aux sédiments, feuilles mortes, troncs d'arbres...). Ces dépôts peuvent être très importants en volume, et tout autant sur le plan économique: de nombreuses grottes ont été le lieu d'exploitation de phosphates et de nitrates biogéniques, par exemple. On trouvera sur les dépôts organiques une vue d'ensemble et des références récentes dans A. Bögli (1980).

GLACE: le gel de l'eau ou la compaction de la neige peuvent former des dépôts de glace parfois importants dans les grottes, qu'on appelle alors des glacières. Pour une mise au point sur l'origine de ce terme, le mode de formation de la glace et l'évolution des glacières, on consultera J. N. Jennings (1971), M. M. Sweeting (1972), et surtout A. Bögli (1980). W. B. White (*in* T. D. Ford and C. H. D. Cullingford, 1976) discute brièvement la morphologie des dépôts de glace dans les grottes et C. A. Hill (1976) cite la littérature concernant la minéralogie de la glace.

La classification des dépôts des grottes que nous venons de proposer n'exclut évidemment pas les formations complexes dans lesquelles un dépôt d'un type contient des quantités (infimes ou importantes) d'un autre.

L'objet du présent travail étant l'étude des remplissages minéraux de l'endokarst, on n'y trouvera pas de référence aux dépôts d'entrée de grotte en tant que tels. Les entrées des grottes et les abris sous roche présentent en effet des faciès particuliers —souvent riches et complexes— liés à l'interaction du milieu endokarstique et du milieu extérieur. Les processus épigés y ont une telle importance que l'on ne peut considérer de tels faciès comme proprement spéléolo-

giques (J. N. Jennings, 1971, p. 177). Leur intérêt est grand, en particulier eu égard à leur fréquente richesse en vestiges paléontologiques et archéologiques. Mais leur examen sort du cadre du présent travail.

Les remplissages des paléokarsts ne seront pas non plus examinés en tant que tels. Ils se sont opérés par des processus probablement comparables à ceux qui sont étudiés ici; mais leur ancienneté généralement très grande, leur diagenèse liée à des climats anciens, leur caractère parfois particulier (bauxite...) les excluent en tant que tels du présent travail. Sur les remplissages des paléokarsts, on trouvera des informations et des revues partielles, par exemple dans T. D. Ford and C. H. D. Cullingford (1976), C. Ek et E. Poty (1982), E. Poty (1984), D. Bürger (1984), J. L. Guendon (1984), K.-H. Pfeffer (1984), etc.

Délaissant —à regret— ces sujets, de même que les remplissages d'origine organique, la glace, et les minéraux autres que les carbonates de calcium, cet exposé se consacrera tout entier aux deux types les plus caractéristiques des remplissages minéraux des grottes: les concrétions carbonatées et les sédiments détritiques.

Il ne pouvait être question, dans l'espace qui nous est imparti, de procéder à une revue historique complète de ces problèmes. Placé devant la nécessité d'un choix restreint, nous avons décidé de ne citer que les travaux publiés durant les vingt dernières années. On ne trouvera donc aucune référence antérieure à 1965: les travaux plus anciens se trouvent abondamment cités dans les ouvrages généraux de J. N. Jennings (1971), M. M. Sweeting (1972), T. D. Ford and C. H. D. Cullingford (1976), L. Jakucs (1977), A. Bögli (1980).

Encore, parmi les travaux plus récents avons-nous dû faire un tri sévère, et en partie arbitraire: dans l'espace imparti, il ne pouvait être question de faire une revue complète des études récentes sur le sujet. Nous prions donc le lecteur de nous pardonner les nombreuses omissions bibliographiques. On ne trouvera ici qu'un aperçu synthétique sur les concrétions carbonatées et les sédiments détritiques de grottes.

## REMERCIEMENTS

Notre reconnaissance va à MM. M. Gewalt et Y. Quinif, qui ont bien voulu relire notre manuscrit, et y proposer plus d'un complément indispensable. Nous sommes en particulier redevable à M.

Gewelt de revues bibliographiques remarquables, encore inédites, tirées de sa thèse de doctorat en cours de rédaction, et comportant 220 références sur les datations radiométriques des concrétions. Nous l'en remercions très vivement.

## 1.—LES CONCRETIONS CARBONATEES

Les concrétions carbonatées sont certes les dépôts chimiques les plus abondants et les formes les plus célèbres des remplissages des grottes. Avec W. H. Monroe (1970), C. A. Hill (1976) et W. B. White (*in* T. D. Ford and C. H. D. Cullingford, 1976), nous pouvons définir les concrétions comme des dépôts minéraux secondaires formés en grotte.

La composition chimique et la nature minéralogique des concrétions des grottes sont extrêmement variables. On trouvera une liste de 69 minéraux dans G. W. Moore (1970), une liste de 76 minéraux dans C. A. Hill (1976), tandis que A. Bögli (1980) en cite 102. Mais ces listes incluent des chlorures, des oxydes et hydroxydes, des nitrates, des phosphates, des silicates, des sulfates, etc. Ces minéraux sont en général beaucoup moins abondants que les carbonates, dont C. A. Hill (1976) cite 9 variétés (plus la carbonate-apatite) et A. Bögli (1980), 18 variétés (voir tableau I). Parmi toutes ces variétés, cependant, la calcite (dans la plupart des formations) puis les hydrocalcites (dans les laits de lune, mondmilch) et l'aragonite (souvent sous forme de minces aiguilles) sont les minéraux carbonatés les plus abondants dans les grottes. Ces minéraux sont les carbonates de calcium, et il n'est pas étonnant qu'ils soient les plus représentés, la roche calcaire ayant essentiellement la même composition en général.

Toutefois, les causes qui font que le carbonate de calcium précipite sous l'une ou l'autre forme ne sont pas définitivement établies. Ainsi, par exemple, on a cru successivement que la précipitation d'aragonite au lieu de calcite était liée au degré d'alcalinité du milieu, puis à la température plus élevée, ensuite à la présence de certains oligo-éléments, et R. L. Folk et R. Assereto (1976) attribuent enfin, probablement dans tous les cas, disent-ils, la précipitation d'aragonite à la présence dans l'eau de magnésium en si grande abondance que le rapport Mg/Ca serait toujours supérieur à 2.

Le mode de formation des concrétions carbonatées est directement lié au processus de la dissolution. Les eaux de percolation corrodent le calcaire de la roche encaissante, généralement dans des

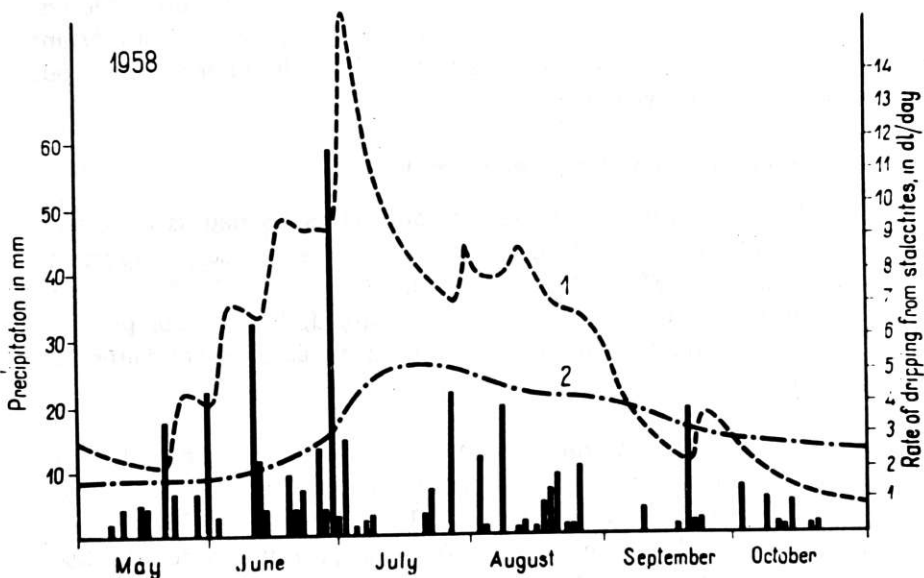


FIG. 1.—Typical differences in water runoff from stalactites underlying a completely barren karst (graph. 1) and a karst covered with a thick humus-rich soil under a forest (graph. 2). The histogram shows the rainfall in the region during six months of 1958.

1.—stalactite 3 in the Hall of Columns of the Baradla;

2.—stalactite 4 in the Béke Cavern.

FIG. 1.—Différences entre le débit de stalactites sous-jacentes à un karst dénudé (trait 1) et un karst couvert d'un sol épais et riche en humus, sous forêt (trait 2). L'histogramme montre les précipitations durant six mois de 1958.

1.—stalactite 3 de la Salle des Colonnes, grotte de Baradla;

2.—stalactite 4 de la grotte Béke.

D'après L. Jakucs, 1977, p. 204.

fissures et conduits situées entre le point de pénétration de l'eau et les cavités calcaires développées. Le carbonate de calcium passé en solution reprécipite parfois lorsque l'eau arrive dans une cavité calcaire un peu importante. Cette précipitation peut être due parfois à l'évaporation, mais le plus souvent à l'évasion de CO<sub>2</sub> des solutions contenant les sels dissous (H. Roques, 1967; A. Girou, 1970; J. Thrailkill, 1970; C. Ek, 1973). La variation des pressions de CO<sub>2</sub> qui engendre la précipitation a parfois un caractère saisonnier. La couverture végétale et ses variations a aussi une influence: L. Jakucs (1977) a montré que sous un sol déboisé et, à la suite de cela, dénudé par l'érosion, le débit des stalactites est beaucoup plus irrégulier que dans une grotte située sous un terrain à sol humique riche et épais (fig. 1).

La cinétique de la précipitation a été récemment étudiée par W. Dreybrodt (1981), qui a calculé des vitesses de croissance théoriques des stalagmites, tandis que A. C. Kendall et P. L. Broughton (1978) ont tenté d'expliquer pourquoi la calcite colonnaire des concrétions aurait remplacé une calcite aciculaire originelle, plus favorable à l'écoulement de l'eau à la surface des concrétions en train de croître.

Enfin, récemment, W. Dreybrodt (1982), par le calcul, et T. C. Atkinson (1983), par des observations et des mesures, ont établi et affirmé catégoriquement que les concrétions peuvent croître de façon notable sans intervention de CO<sub>2</sub> d'origine organique, donc durant les périodes glaciaires ou dans des régions sans végétation.

Les formes des concrétions ont été beaucoup étudiées dans des travaux déjà anciens. On trouvera d'intéressantes mises au point récentes entre autres dans H. W. Franke (1965, en anglais, republié en 1971 en allemand), I. Gams (1968), R. L. Curl (1972, 1973), A. Bögli (1980), M. Bleahu (1982). Ces deux derniers auteurs classent les concrétions comme suit:

- concrétions liées à la percolation, "dripstones" (stalactites, draperies, stalagmites...);
- concrétions liées à l'écoulement, "flowstones" (planchers coulées...);
- dépôts de gours (barrages et fonds de gours);

- excentriques et autres formations liées à la capillarité;
- perles des cavernes;
- lait de lune, "mondmilch".

C. A. Hill (1976), qui donne un catalogue alphabétique de 28 formes, ne les classe pas, mais illustre son catalogue de 60 photographies.

En ce qui concerne la couleur des concrétions, celle-ci a souvent été liée à la présence de cations déterminés. Mais L. Jakucs (1977, p. 206) insiste sur l'influence du sol et de son érosion sur la couleur des concrétions: en Hongrie, le déboisement tend à colorer les stalactites en rouge (érosion et transport de terra rossa).

Mais les découvertes récentes les plus importantes concernant les concrétions sont relatives à leur âge et aux climats sous lesquels elles se sont formées; ces progrès remarquables sont dus essentiellement à l'apport des méthodes isotopiques.

Parmi ces méthodes, la première à se développer (depuis 1951 environ) fut celle du  $^{14}\text{C}$ . Après plusieurs travaux de pionniers durant les années 50, la méthode prit son essor en 1966 avec la publication par Gehy et Schillat de 23 analyses d'une grotte allemande. L'année suivante, Franke (1967) présente 29 datations (réalisées par les laboratoires de Hanovre et de Heidelberg) et Labeyrie *et al.* (1967) en publient 5, faites dans une même concrétion de l'Aven d'Ornac (Ardèche, France). Ces trois travaux montrent déjà combien l'Holocène est favorable à la croissance des concrétions. Ceci se confirme rapidement et bientôt 54 datations permettent à Geyh et Franke (1970) de préciser la quasi-absence de concrétionnement en Europe centrale entre 12.600 et 20.000 ans B. P. et la lenteur du concrétionnement entre 20.000 et 35.000 ans B. P. La même année, paraît un remarquable travail de Hendy (1970), proposant une méthode originale d'estimation de l'activité initiale du  $^{14}\text{C}$  et fournissant 21 datations dans des concrétions.

A partir de ce moment, les travaux se multiplient sur tous les continents: de 1971 à 1982, vingt-cinq publications ont été recensées par M. Gewalt (communication personnelle, inédite).



**NOM, FORMULE CHIMIQUE, GISEMENT**

Aragonite, $\text{CaCO}_3$ , répandu.
Ázurite, $2 \text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ , Cooper Queen Cave, AZ, USA.
Calcite, $\text{CaCO}_3$ , commun en grotte.
Carbonate apatite, $3 \text{CaCO}(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , Cueva El Capote, Mexico.
Cérusite, $\text{PbCO}_3$ , Herman Smith Cave, IL, USA.
Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , Lehman Cave, NV, USA.
Giobertite, $\text{MgCO}_3$ , gel, grottes dolomitiques, Sud de la France.
Huntite, $3 \text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ , fréquent dans le mondmilch.
Hydrocalcite, $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , commun dans le mondmilch sous $5^\circ\text{C}$ .
Hydromagnésite, $4 \text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , mondmilch en grottes dolomitiques.
Hydrozincite, $2 \text{ZnCO}_3 \cdot 3 \text{Zn}(\text{OH})_2$ , Island Ford Cave, VA, USA.
Magnésite, $\text{MgCO}_3$ , Titus Canyon Cave, CA, USA.
Malachite, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ , Lilburn's Cave, CA, USA.
Martinite, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ , Cueva Negra, Puerto Rico.
Monohydrocalcite, $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , dans mondmilch, rare; Suisse, Allemagne.
Nesquehonite, $\text{MgCO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ , Moulis, France.
Smithsonite, $\text{ZnCO}_3$ , Herman Smith Cave, IL, USA.
Trihydrocalcite, $\text{CaCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , dans le mondmilch.

*TABLEAU 1.—Minéraux secondaires de grottes constitués de carbonate ou comportant des molécules de carbonate.*

*(extrait d'une liste de 102 minéraux secondaires de grottes, de A. Bögli, 1980).*

En 1983, un travail de Gascoyne et Nelson donne six datations de concrétions par  $^{14}\text{C}$  comparées aux âges  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . Il s'agit de concrétions formées dans une grotte sous un glacier et cette situation spéciale donne lieu à des problèmes particuliers —notamment en ce qui concerne l'origine du  $\text{CO}_2$ . A peu près simultanément, Vogel (1983) compare des datations  $^{14}\text{C}$  et  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dans une stalagmite d'Afrique du Sud, en calibrant les âges  $^{14}\text{C}$  avec la courbe de Suess.

Enfin, en 1984 et 1985, M. Gewalt fait les premières publications de ses datations dans des concrétions de grottes belges. Une soixantaine de datations, dont certaines sont comparées aux âges  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  obtenues par le même auteur, montrent la vigueur du concrétionnement postglaciaire holocène, mais aussi la grande variabilité des vitesses de croissance des concrétions.

Les déséquilibres isotopiques dans les familles de l'Uranium n'ont été utilisés, pour dater les concrétions de grottes, que bien après le  $^{14}\text{C}$ . Leur usage à cette fin a débuté dans les années soixante. Mais les travaux des pionniers furent consacrés à la difficile recherche des isotopes adéquats à une estimation d'âge, et divers rapports isotopiques furent essayés. En 1969, Nguyen et Lalou étudient le rapport  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  dans plusieurs échantillons d'eaux souterraines, s'en servent pour critiquer les travaux de leurs prédécesseurs et publient sur la base du rapport  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  trois datations dans une stalagmite de l'Aven d'Orgnac (Ardèche, France) Duplessy *et al.* (1970) ajoutent deux datations dans la même concrétion, et commentent les  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  calculés dans les mêmes échantillons.

Dès ce moment, les publications commencent à foisonner. Et, si M. Gewalt répertorie de 1971 à 1982 vingt-cinq travaux publiés sur les datations de concrétions par  $^{14}\text{C}$ , il en inventorie sur la même période plus de cent par  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . Faute de place, nous n'en citerons que quelques jalons.

On ne peut omettre, par exemple, le travail de Harmon *et al.* (1977), recueil de 54 datations de concrétions des Rocheuses et des Monts Mackenzie, présentées en termes de variations climatiques (glaciaires-interglaciaires). Un peu plus tard ATKINSON *et al.* (1978) présentent 28 dates dans des concrétions de grottes anglaises. Des périodes de concrétionnement s'avèrent ici encore séparées par des périodes d'inactivité.

Datations C-14 de concrétions  
Classes de 200 ans

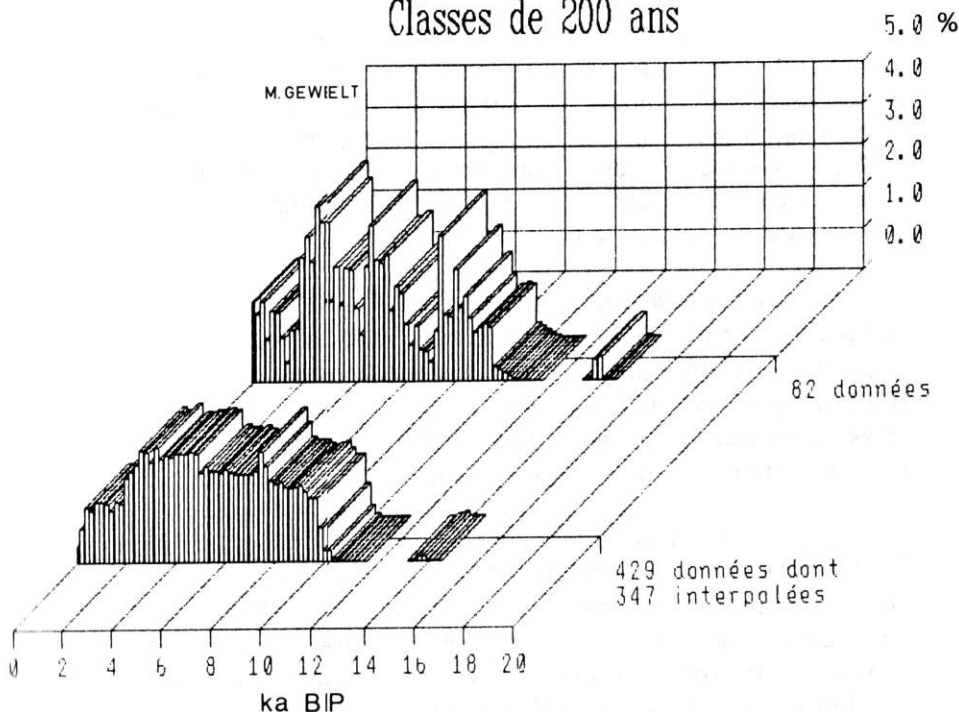


FIG. 2.— $^{14}\text{C}$  ages frequency distribution of speleothems from Belgian caves. Construction of histograms takes into account the error on each date.  $^{14}\text{C}$  ages are corrected with an initial  $^{14}\text{C}$  activity of 85 % modern carbon. In the background: plot of the raw data (82  $^{14}\text{C}$  ages). Foreground: 347 interpolated "ages" have been added to the plot. Growth hiatus and vertical growth rates have been used for the determination of interpolated ages (Gewelt, unpublished).

FIG. 2.—Distribution des âges  $^{14}\text{C}$  de concrétions de grottes belges. La construction des histogrammes intègre les erreurs associées aux datations  $^{14}\text{C}$  (corrigées par une activité initiale = 85 % de carbone moderne). A l'arrière-plan: données brutes, 85 datations  $^{14}\text{C}$ . A l'avant-plan: 347 "âges" interpolés ont été ajoutés en tenant compte des vitesses de croissance des concrétions et des arrêts de croissance éventuels (Gewelt, inédit).

Il faut citer aussi les 27 datations de Gascoyne *et al.* (1981) dans l'île de Vancouver; les  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  mesurés enrichissent le travail. Mais plus encore le travail de Gascoyne et Schwarcz (1982), revue des datations de concrétions stalagmitiques par des mesures de rapports isotopiques de divers membres des familles de l'Uranium, accompagnée d'une étude comparative de deux méthodes appliquées à 14 échantillons. Gascoyne *et al.* (1983) présentent et discutent les 183 datations de concrétions anglaises de la thèse de Gascoyne et comparent leur distribution à celle des concrétions des Rocheuses et des Monts Mackenzie (voir fig. 3).

Mais c'est 664 datations que collationnent Hennig *et al.* (1983). Les âges sont comparés aux enregistrements de  $\delta^{18}\text{O}$  des fonds océaniques: la corrélation de l'intensité du concrétionnement avec le climat est clairement établie. Lively (1983) observe que les données climatiques régionales ou locales, particulièrement aux marges glaciaires, peuvent oblitérer les influences du climat moyen général.

En 1985, Gewelt présente les 20 premières datations par  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  effectuées en Belgique. Elles mettent en évidence une période de concrétionnement intense entre 130 et 85 ka BP, soit dans l'Eemien au sens large; elles montrent aussi la grande variabilité des vitesses de croissance des concrétions et, dans deux d'entre elles, des interruptions de croissance de plus de 100 ka.

Outre les datations par le  $^{14}\text{C}$  et par les descendants des familles de l'uranium, d'autres méthodes d'étude ont été essayées avec des succès variables sur les concrétions: la thermoluminescence (Wintle, 1978), le paléo-magnétisme (Latham, 1977 et 1981), la résonance paramagnétique électronique (Ikeya, 1975; Hennig et Grun, 1983). Enfin, on n'oubliera pas l'importance, dans la recherche des paléotempératures et de l'évolution de l'activité végétale, de l'étude des isotopes stables, en particulier du  $^{18}\text{O}$  et du  $^{13}\text{C}$  (Harmon *et al.*, 1978; Gewelt, 1981) et, parmi les méthodes annexes d'étude de concrétions, les essais de spectrométrie gamma (Quinif, 1980), et aussi les études du deutérium et des inclusions fluides de la calcite (Schwarcz *et al.*, 1976).

## 2.—LES SEDIMENTS DETRITIQUES

### Provenance

On classe habituellement les sédiments des grottes en dépôts autochtones et dépôts allochtones, en distinguant par là les matériaux

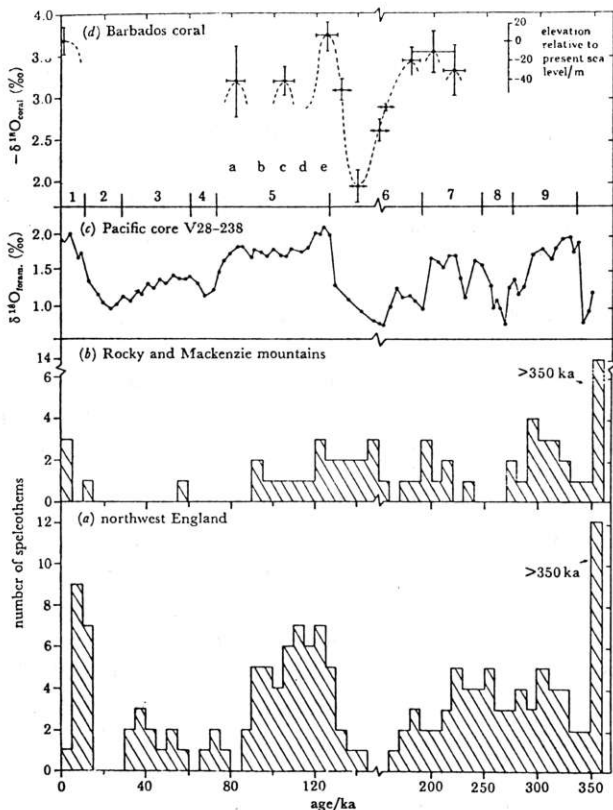


FIG. 3.—Comparison of other palaeoclimate records with the speleothem record (a), from figure 2) from northwest England; (b) age-frequency distribution of speleothems from the Rocky and Mackenzie mountains (data from Harmon et al. (1977), with use of the same criteria as used in constructing figure 2); oxygen variations in oxygen isotope contents of foraminifera in deep sea core V28-238 (Shackleton & Opdyke 1973), based on the assumption of constant sedimentation rate between dated stage boundaries (Kominz et al. 1979); and (d) palaeosea level record from dated coral reef terraces in Barbados, with use of oxygen isotope content of corals as an indicator of relative sea stand (Fairbanks & Matthews 1978).

FIG. 3.—Comparaison de 3 autres enregistrements paléoclimatiques avec (a) les datations de concrétions anglaises; (b) distribution des âges de concrétions des Rocheuses et des Monts Mackenzie; (c) variations isotopiques de l'oxygène dans des foraminifères d'un sondage profond; (d) anciens niveaux marins reconstitués à partir de terrasses de récifs coraliens (extrait de Gascoyne, Schwarcz et Ford, 1983).

provenant de la roche même dans laquelle la grotte est creusée de ceux qui sont apportés du dehors de la grotte (cfr. les catégories "endogénétique" et "exogénétique" de Ford et Cullingford, 1976).

Les dépôts autochtones comportent au premier chef les concrétions carbonatées, dont nous avons déjà parlé; dans le domaine détritique, il y a les résidus de dissolution abandonnés sur place dans la cavité lors de son creusement, et les matériaux écroulés ou éboulés du plafond et des parois.

Les résidus de dissolution abandonnés sur place témoignent que, dès le départ de la karstification sous terre, lorsque seule l'énergie chimique de l'eau peut permettre l'enlèvement de matière, faute d'énergie cinétique, un dépôt peut se faire par gravité sur le fond des cavités naissantes, par abandon d'un résidu non dissous (Ek et Roques, 1972; Roques et Ek, 1973).

Mais, dans les matériaux détritiques autochtones, les blocs écroulés ou éboulés ont souvent de loin la première place en volume. Ces blocs sont généralement parallélépipédiques (pour des causes structurales) et anguleux; ils peuvent cependant comporter un certain émoussé, qui peut être antérieur à leur chute (si l'éboulis a été préparé par la corrosion) ou postérieur (si les blocs trempent, après leur chute, dans une eau agressive). Au point de vue dimensionnel, il faut distinguer les éboulements cryoclastiques (d'origine périglaciaire) des autres: les éboulements cryoclastiques peuvent parfois comporter uniquement des débris très minces, en plaquettes, et petits. Les autres sont fréquemment beaucoup plus grossiers et plus hétérométriques.

La structure a une grande influence sur la répartition des éboulements. Ainsi, on trouve des grandes salles liées à des éboulements le long des lignes de faiblesse tectoniques: c'est le cas à Padirac, ou à la Grotte de Remouchamps (Belgique), où les grands éboulements se présentent le long des lignes de faille (effets passifs de la tectonique; Ek, 1970). Les alternances de bancs minces de lithologie différente sont aussi favorables (Sweeting, 1972). Là où le karst est partiellement couvert, comme au Kentucky, les dépressions de la surface du sol, où la couverture est plus mince, sont favorables à la préparation des effondrements par des circulations d'eau de percolation (Brucker, 1966).

Les causes immédiates des éboulements, éboulements et écroulements sont variées. Le climat périglaciaire peut provoquer des éboulements cryoclastiques jusqu'à plusieurs centaines de mètres de l'entrée dans

certains cas (au Pléistocène dans l'Eisriesenwelt, Autriche). La dissolution par les eaux de percolation peut désolidariser des bancs les uns des autres. Ceci peut être beaucoup plus important si des sulfates présents dans la roche forment du gypse, dont la grande solubilité et le foisonnement (p. ex. s'il se forme à partir d'anhydrite) favorisent le décolllement des bancs. Le déséquilibre mécanique lié à l'élargissement d'un conduit (p. ex. par l'érosion latérale d'une rivière souterraine), ou les séismes sont aussi des causes de chutes de blocs. Dans les cavités qui sont sous une pression hydrostatique importante, le départ de l'eau par abaissement de son niveau peut être une cause d'écroulement (Sweeting, 1972; Delattre, 1985).

Lorsqu'ils ne sont pas directement liés au départ de l'eau, à l'abaissement du niveau piézométrique, les éboulements peuvent se faire lorsque la galerie est sèche. C'est donc de toute façon une phase d'évolution tardive dans la genèse des cavités.

On va voir qu'il n'en est pas de même avec les remplissages allochtones qui sont surtout l'oeuvre des rivières souterraines.

#### **Transport, mise en place et faciès.**

Le transport des sédiments en grottes est le plus souvent l'oeuvre de la gravité et de l'eau, plus rarement du vent ou de la glace, plus rarement encore d'autres facteurs.

Des sables désertiques ont été trouvés à plusieurs reprises dans les grottes (Cooke, 1975). Plus fréquemment, les glaciers peuvent apporter aux entrées de grottes du till, fréquemment relavé, mais pas toujours; des moraines latérales ont été poussées dans des grottes de la Cordillère cantabrique (Mugnier, 1983); plus souvent, l'apport est l'oeuvre d'eaux sous-glaciaires —on en a des exemples au Québec (Ek et al., 1981)— ou proglaciaires, comme les dépôts varvés de Gaping Gill (Angleterre).

Lorsque l'eau transporte des sédiments en grotte, elles le font de la façon suivante: les variations de l'émoussé ont été étudiées, entre autres, par Newson (1971); celles de la granulométrie, par Bögli (1980, p. 166); l'aplanissement des galets est très fort dans certains cas (Sweeting, 1972, p. 174); ceci serait lié parfois au franchissement de siphons (Ek, 1974). Le lien entre la granulométrie et la vitesse du courant a été étudié par White et White (1968), qui ont mis l'accent sur les effets de la charge de fond (Bedload) sur la morphologie des conduits. Ils considèrent que le transport de fond est une partie inté-

grante de l'évolution d'un réseau karstique et qu'un développement important sous l'effet des seules eaux de percolation est peu probable. Ils montrent que la charge de fond contrarie l'érosion verticale et, en cas d'abaissement du niveau de base, favorise la création d'une nouvelle galerie, inférieure, plutôt que l'incision en canyon du conduit existant. Quant aux argiles de grottes, présentes dans tant de cavités, elles sont probablement le plus souvent liées à l'existence en surface d'une épaisse couverture d'altération, susceptible de s'insinuer dans les fissures quand l'eau s'y infiltre, et de se déposer dans des grottes où l'eau est quasiment immobile (Sweeting, 1972, p. 174). Dans les monts Ozark (U. S. A.), cependant, Reams (1968) a montré que le remplissage argileux des grottes avait été apporté de la surface par des cours d'eau souterrains.

Bögli (1980) s'est attaché à étudier la mise en place des sédiments détritiques d'eau courante en fonction de la dynamique de l'écoulement, qui dépend fortement elle-même de la morphologie de la cavité. Il a aussi rappelé l'usage que l'on peut faire en grotte de la courbe de Hjulström pour déterminer les vitesses des anciens courants, connaissant la granulométrie des dépôts. On trouvera dans Streit (1968) un rappel des méthodes classiques de la sédimentologie dont l'application est intéressante en grottes. Parmi les méthodes plus modernes, signalons l'usage de la thermo-luminescence sur les sédiments détritiques (Quinif, 1981).

Divers faciès particuliers aux cavités souterraines ont aussi attiré les chercheurs. Nous ne reviendrons pas sur les faciès d'entrée de grotte, si variés, mais justement caractérisés par la forte influence des agents extérieurs. A l'opposé, les vermiculations argileuse qui tapissent tant de parois de grottes le doivent à la protection offerte par le milieu (cfr. Bögli, 1980 et Bleahu, 1982). L'induration des sédiments par du carbonate provenant des eaux souterraines saturées est également fréquent en grotte, de même que, dans les régions méditerranéennes et plus chaudes, les dépôts ferrugineux anciens, tels la limonite pisolithique (Gospodarič, 1968).

On voit la variété des remplissages détritiques des cavités karstiques. L'étude de ces dépôts présente d'autre part une grande importance pour deux raisons au moins. La première est que si la dissolution est le phénomène original et originel de la formation des grottes, le développement de vastes cavités intégrées est presque toujours l'oeuvre de rivières souterraines transportant, grâce à la vitesse de leur courant,



des matériaux souvent allochtones et souvent abrasifs. Les sédiments détritiques ne sont pas seulement des témoins de l'évolution des grottes: ils en sont aussi en partie les outils. En outre, c'est un caractère assez propre aux cavités souterraines que les sédiments sont susceptibles de créer des bouchons que l'eau, parfois ne peut plus franchir, du fait que les galeries, contrairement aux vallées épigées, ont un plafond: l'alluvionnement peut conduire au comblement, à l'obstruction, à la fossilisation du conduit que les sédiments parcourent, outils d'évolution, mais aussi outils de mort.

### **Séquences sédimentaires souterraines.**

Si chaque sédiment est le témoin d'un épisode de l'histoire de la grotte qui le renferme, ce sont évidemment les séquences sédimentaires les plus complexes, les plus variées, les plus longues qui sont susceptibles de nous livrer des chapitres entiers de cette genèse, et ce sont les études pluridisciplinaires qui peuvent en dire le plus long sur les épisodes retracés.

Nous n'en citerons —très brièvement— que quelques exemples. En 1974 paraissait sous la direction de M. Dewez une étude des dépôts de la partie aval de la galerie supérieure de la grotte de Remouchamps (Belgique), comportant des recherches de géologie, de géomorphologie karstique, de sédimentologie, y compris une étude des minéraux denses, de paléontologie animale, de palynologie, d'archéologie, etc., le tout aboutissant à une connaissance remarquablement détaillée de l'évolution de la grotte, surtout durant la dernière période froide et l'Holocène. Toutefois, la reconstitution du fonctionnement d'une galerie durant le même laps de temps fut étudié avec beaucoup plus de précision encore dans les domaines sédimentologique, minéralogique et palynologique, par Quinif, Dupuis, Bastin et Juvigné en 1979. Une succession d'épisodes d'éboulis, de sédimentation détritique, de concrétionnement, entrecoupés de périodes de recreusement (fig. 4), témoignent de périodes où la roche en surface a été successivement nue, couverte de loess, couverte d'un sol végétal, etc.

Un autre bel exemple d'une telle étude a été présenté par Borowska, Kostrzewski et Zwoliński (1983): c'est une étude sédimentologique très complète de 137 échantillons, qui conduit ses auteurs à considérer que, dans la vallée des Tatra concernée, l'importance des dépôts allochtones a crû au cours du temps dans les grottes, que les matériaux locaux éboulés sont plus importants vers l'amont des galeries et dans les passages supérieurs, que la granulométrie des dépôts et même leur émoussé dépend plus des conditions hydrodynamiques locales que de la distance de transport, etc.

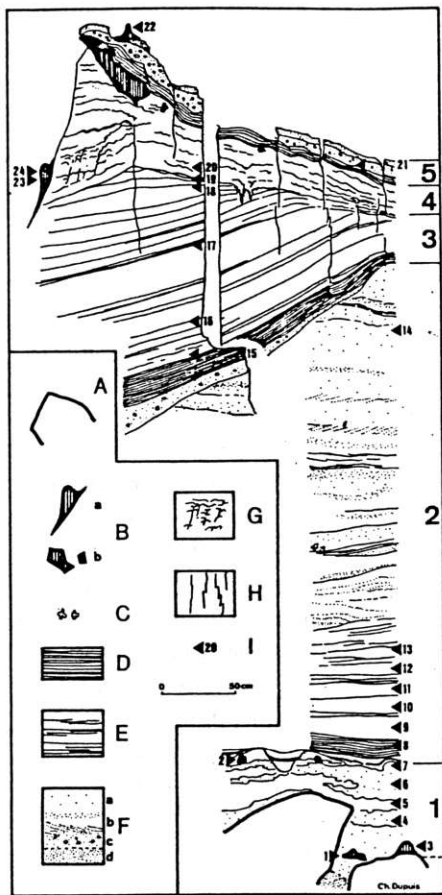


FIG. 4. Description de la coupe et situation des spectres polliniques obtenus. Les numéros des unités détritiques distinguées sont portés sur la partie droite de la figure.

- A. Blocs éboulés de calcaire frasnien.
- B. Stalagmites en place (a) et fragments de stalagmites et de stalactites remaniés (b).
- C. "Poupées" calcaires.
- D. Argile litée plus ou moins limoneuse.
- E. Limon à lits argileux.
- F. Limon sableux (a), sable plus ou moins limoneux (b), limon sableux à galets d'argile et de limon (c), sable (d).
- G. Fentes de dessiccation.
- H. Fractures parfois calcifiées découpant la partie supérieure du témoin de sédiments.
- I. Situation d'un spectre pollinique.

FIG. 4.—Description of the profile and location of pollen spectra collected. Figures on the right side refer to the numbers of the sedimentary units.

- A. Fallen blocks, Frasnian limestone.
- B. Stalagmites in original position (a) and pieces of fallen stalagmites and stalactites.
- C. Calcareous concretions.
- D. Layered silty clay.
- E. Silt with clay beds.
- F. Sandy silt (a), silty sand (b), sandy silt with clay and silt pebbles (c), sand (d).
- G. Dessiccation cracks.
- H. Fissures, some of them being calcified, at the upper part of the sediments.
- I. Location of pollen samples.

(extrait de Quinif, Dupuis, Bastin et Juvigné, 1979).

## Implications de l'étude des séquences sédimentaires souterraines.

Les études des séquences sédimentaires souterraines ont déjà fréquemment donné lieu à des conclusions débordant largement le cadre des observations, et portant sur l'évolution générale de la grotte ou de la karstification régionale, ou même sur la morphogenèse du massif ou sur les paléoclimats. Nous n'en citerons qu'une poignée d'exemples pris dans les travaux des dernières années.

L'étude des remplissages concrétionnés de l'Anou Boussoil, dans le Djurdjura (Algérie) a montré des alternances climatiques, et l'étude des formations d'ankérite et de gypse a révélé l'origine hydrothermale d'une partie des galeries de la grotte (Collignon, Goergler et Quinif, 1982).

La micropaléontologie, en révélant l'âge dinantien d'un remplissage de grotte, a montré que des grottes s'étaient creusées en Belgique dans les calcaires frasniens au cours du Dévonien supérieur (Ek et Poty, 1982).

La palynologie, et particulièrement la comparaison des spectres de sédiments détritiques avec ceux des concrétions, a apporté des renseignements précieux sur les climats et les époques des dépôts de grotte, et sur les décalages entre des sédimentations en surface et la resédimentation, après remaniements, en grotte.

La minéralogie des concrétions a fourni dans plusieurs cas, dans des régions arides ou semi-arides, des indications sur des fluctuations climatiques ou sur d'anciennes actions hydrothermales (Jennings, 1983).

Les dépôts de la galerie Aranzadi, à la Pierre Saint-Martin, ont donné des renseignements précis sur l'évolution de la karstification du massif (Maire et Quinif, 1984).

Dans le bassin d'Iserlohn, en Rhénanie-Westphalie (Allemagne), comme dans les Pyrénées françaises, des successions de séquences sédimentaires ont été corrélées à des variations climatiques du Quaternaire (Schmidt, 1984; Bakalowicz, Sorriaux et Ford, 1984).

Enfin, une étude des minéraux denses présents dans des concrétions stalagmitiques de grottes belges vient de révéler une éruption volcanique jusqu'ici inconnue du Pléistocène (Gewelt et Juvigné, 1986).

## PERSPECTIVES

L'étude des remplissages des grottes est en pleine expansion, et la très grande abondance de la littérature montre combien son avenir est considéré prometteur par nombre de chercheurs dans tous les domaines de la sédimentologie, de la géomorphologie, de la stratigraphie, de la chronologie.

A côté de toutes les techniques sédimentologiques et des méthodes isotopiques, il nous semble que des perspectives nouvelles s'ouvrent, par exemple, dans le domaine du paléomagnétisme (après Latham, 1981, voir Geeraerts, 1982), et dans le domaine des minéraux denses en particulier volcaniques, qui peuvent fournir des marqueurs stratigraphiques extraordinaires (Gewelt et Juvigné, 1986).

Mais les nouveaux progrès ne dépendront pas seulement des techniques: une approche méthodologique récente vient d'être appliquée aux grottes: l'approche énergétique (Quinif, 1983). Si l'on analyse les types d'énergie mis en jeu dans la genèse des grottes —énergie chimique, énergie mécanique, énergie hydrodynamique— on est conduit à admettre avec Y. Quinif que les remplissages modifient la distribution spatiale de l'énergie dans un réseau. Il y a là un point de vue nouveau, certainement générateur de découvertes.

Enfin, on ne peut terminer ce modeste tour d'horizon géologique sans rappeler un trait fondamental —un attrait fondamental aussi— de l'étude des sédiments souterrains: c'est l'importance des interactions entre les remplissages karstiques et les activités humaines, l'économie, la vie sociale.

Les remplissages des grottes incluent les phosphates et les nitrates, jadis exploités en grand, mais aussi les sulfures, les hydrocarbures.. Le tourisme en grotte est largement tributaire de la beauté et de la quantité des concrétions. L'élimination de dépôts obstruant des ponors en Yougoslavie permet de réduire substantiellement les inondations et de gagner ainsi de vastes surfaces pour l'agriculture. Cet exemple pourrait être suivi dans de nombreux pays. L'homme et les remplissages karstiques sont en constante interaction: une raison majeure de pousser les études.

## BIBLIOGRAPHIE

ATKINSON, T. C., 1983. Growth mechanisms of speleothems in Castleguard Cave, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15: 523-536.

ATKINSON, T. C., HARMON, R. S., SMART, P. L. & WALTHAM, A. C., 1978. Paleoclimatic and geomorphic implications of  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dates on speleothems from Britain. *Nature*, 272: 24-28.

BAKALOWICZ, M., SORRIAUX, P. & FORD, D., 1984. Quaternary glacial events in the Pyrénées, from U-series dating of speleothems in the Niaux-Lombrives-Sabart caves, Ariège, France. *Norsk geogr. Tidsskr.*, 38: 193-197.

BLEAHU, M., 1982. *Relieful carstic*. Bucarest (Albatros), 296 p.

BÖGLI, A., 1980. *Karst hydrology and physical speleology*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer-Verlag), 284 p.

BORÓWKA, R. K., KOSTRZEWSKI, A. & ZWOLIŃSKI, Z., 1983. Morphology of Chocholowska valley caves, origin of cave deposits and their paleogeographical significance (Tatra, Poland). *Atti Convegno int. sul carso di alta montagna*, 1: 1-12.

BRUCKER, R. W., 1966. Truncated cave passages and terminal breakdown in the Central Kentucky karst. *Bull. National Speleological Society*, 28 (4): 171-178.

BÜRGER, D., 1984. Verwitterungsrelikte der Kalkvorkommen Nordrhein-Westfalens, pp. 347-359, in: *Le Karst belge. Karstphänomene in Nordrhein-Westfalen*, C. Ek & K.-H. Pfeffer, éditeurs, *Kölner Geographische Arbeiten*, 45: 1-584.

COLLIGNON, B., GOERGLER, B. & QUINIF, Y., 1982. L'Anou Boussouïl, témoin privilégié de l'évolution géologique récente du Djurdjura. *Rev. Bel. Géogr.*, 106 (1): 47-60.

COOKE, H. J., 1975. The paleoclimatic significance of caves in western Ngamiland, Botswana. *Geographical Journal*, 141: 430-434.

CURL, R. L., 1972. Minimum diameter stalactites. *National Speleological Society Bulletin*, 34: 129-136.

- CURL, R. L., 1973. Minimum diameter stalagmites. *Natural Speleological Society Bulletin*, 35: 1-9.
- DELATTRE, N., 1985. Les puits naturels du Tournaisis. Etude de leur localisation et contribution à l'étude de leur genèse. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 108: 117-123.
- DEWEZ, M. (éditeur), 1974. Nouvelles recherches à la Grotte de Remouchamps. *Bull. Société royale belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 85: 5-161.
- DREYBRODT, W., 1981. The kinetics of calcite precipitation from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems: revisited. *Chemical Geology*, 32: 237-245.
- DREYBRODT, W., 1982. a possible mechanism for growth of calcite speleothems without participation of biogenic carbon dioxide. *Earth and Planetary Science Letters*, 58: 293-299.
- DUPLESSY, J. C., LABEYRIE, J., LALOU, C. & NGUYEN, M. V., 1970. Continental Climatic Variations between 130,000 and 90,000 Years B. P., *Nature*, v. 226: 631-633.
- EK, C., 1970. Les influences structurales sur la morphologie de la grotte de Remouchamps (Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique*, 93: 293-304.
- EK, C., 1973. La dissolution du carbonate de calcium. Essai de mise au point. *Bull. Soc. géogr. de Liège*, 9: 55-87.
- EK, C., 1974. Etude sédimentologique de la grotte de Remouchamps. *Bulletin de la Société Royale belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 85: 16-41.
- EK, C., HILLAIRE-MARCEL, C. & TRUDEL, B., 1981. Sédimentologie et paléoclimatologie isotopique dans une grotte de Gaspésie, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 35: 317-328.
- EK, C. & POTY, E., 1982. Esquisse d'une chronologie des phénomènes karstiques de Belgique. *Revue belge de Géographie*, 106 (1): 73-85.
- EK, C. & ROQUES, H., 1972. Dissolution expérimentale de calcaires dans une solution de gaz carbonique. Note préliminaire. *Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*, 14: 67-82.

FOLK, R. L. & ASSERETO, R., 1976. Comparative fabrics of length-slow and length-fast calcite and calcitized aragonite in a holocene speleothem, Carlsbad Caverns, New Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46: 486-496.

FORD, T. D. & CULLINGFORD, C. H. D., 1976. *The Science of Speleology*. London (Academic Press), 593 p.

FRANKE, H. W., 1965. The theory behind stalagmite shapes. *Studies in Speleology*, 1: 89-95.

FRANKE, H. W., 1971. Morphologie und Stratigraphie des Tropfsteins. Rückschlüsse auf Grössen des Paläoklimas. *Geol. Jahrb.*, 89: 473-501.

GAMS, I., 1968: Versuch einer Klassifikation der Tropfsteinformen in der Grotte von Postojna. *Actes du IVème Congrès international de Spéléologie*, III: 117-126.

GASCOYNE, M., 1977. Trace elements in calcite. The only cause of speleothem color ? *Proceed. of the 1977 NSS Annual Convention*: 39-42.

GASCOYNE, M., FORD, D. C. & SCHWARCZ, H. P., 1981. Late Pleistocene chronology and paleoclimate of Vancouver Island determined from cave deposits. *Canadian Journal of Earth Science*, 18: 1643-1652.

GASCOYNE, M., SCHWARCZ, H. P. & FORD, D. C., 1983. Uranium-series ages of speleothem from Northwest England: correlation with Quaternary climate. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B 301: 143-164.

GASCOYNE, M. & NELSON, D. E., 1983. Growth mechanisms of recent speleothems from Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada, inferred from a comparison of uranium-series and carbon-14 age data. *Arctic and Alpine Research*, 15: 537-542.

GASCOYNE, M. & SCHWARCZ, H. P., 1982. Uranium-series dating of speleothems. In: *Uranium series disequilibrium: applications to environmental problems*, M. Ivanovich & R. S. Harmon (éd.), Clarendon Press, Oxford: 270-287.

GEERAERTS, R., 1982. Etude paléomagnétique de sédiments de la grotte de Bohon. *Revue belge de Géographie*, 106: 99-108.

GEWELT, M., 1981. Les variations isotopiques du carbone et de l'oxygène dans une stalagmite de la grotte de Remouchamps (Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique*, 104: 269-279.

GEWELT, M., 1984. Colloque international de Karstologie appliquée. Livretguide des excursions, Liège (Laboratoire de Géomorphologie de l'Université): 9-14.

GEWELT, M., 1985. Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges: apport des datations  $^{14}\text{C}$  et  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . *Annales de la Société géologique de Belgique*, 108: 267-273.

GEWELT, M. & JUVIGNE, E., 1986. La retombée volcanique de Remouchamps, un nouveau marqueur stratigraphique dans le Pléistocène supérieur, daté par  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dans des concrétions stalagmitiques. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 109 (sous presse).

GEYH, M. A. & FRANKE, H. W., 1970. Zur Wachstumsgeschwindigkeit von Stalagmiten. *Atompraxis*, 16 (1): 46-48.

GEYH, M. A. & SCHILLAT, B., 1966. Messungen der Kohlenstoff. Isotopenhäufigkeit von Kalksinterproben aus der Langenfelder Höhle. *Der Aufschluss*, 12: 315-323.

GIROU, A., 1970. Etude de la cinétique de la précipitation des carbonates de calcium. Thèse de doctorat, Fac. Sc. Univ. Toulouse, 137 p.

GOEDE, A. & HARMON, R. S., 1983. Radiometric dating of Tasmanian speleothems. Evidence of cave evolution and climatic change. *J. Geol. Soc. of Australia*, 30 (1-2): 83-100.

GOSPODARIĆ, R., 1968. Über einige klastische Sediment im Slowenischen Karst. *Actes du Quatrième congrès int. de Spéléol., Postojna*, 3: 139-146.

GUENDON, J. L., 1984. Les paléokarst des Alpes occidentales du Trias à l'Eocène. *Karstologia*, 4: 3-10.

HARMON, R. S., THOMPSON, P., SCHWARCZ, H. P. & FORD, D. C., 1978. Late Pleistocene paleoclimates of north America as inferred from stable isotope studies of speleothems, *Quaternary Research*, 9: 54-70.



HARMON, R. S., FORD, D. C. & SCHWARCZ, H. P., 1977. Inter-glacial chronology of the Rocky and Mackenzie Mountains based on  $^{230}\text{Th}$ – $^{234}\text{U}$  dating of calcite speleothems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14: 2543-2552.

HARMON, R. S., THOMPSON, P., SCHWARCZ, H. P. & FORD, D. C., 1978. Late pleistocene sea level history of Bermuda. *Quaternary Research*, 9: 205-218.

HENDY, C. H., 1970. The use of  $\text{C}^{14}$  in the study of cave processes. *in* Radiocarbon Variations and Absolute Chronology. I. U. Olsson (édit.) Proc. 12th Nobel symp. Uppsala, 1969, 419-443.

HENNIG, G. J. & GRÜN, R., 1983. ESR dating in Quaternary geology. *Quaternary Science Reviews*, 2: 157-238.

HENNIG, G. J., GRÜN, R. & BRUNNACKER, K., 1983. Speleothems, Travertines and Paleoclimates. *Quaternary Research*, 20: 1-29.

HILL, C. A., 1976. Cave Minerals. Huntsville, Alabama (Nat. Speleol. Soc.), 137 p.

IKEYA, M., 1975. Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance. *Nature*, 255: 48-50.

JENNINGS, J. N., 1971. Karst. Cambridge, Massachusetts and London, England (M. I. T. Press), 252 p.

JENNINGS, J. N., 1983. The disregarded karst of the arid and semi-arid domain. *Karstologia*, 1: 61-73.

JAKUCS, L., 1977. Morphogenetics of karst regions. Bristol (Hilger), 284 p.

KENDALL, A. C. & BROUGHTON, P. L., 1978. Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48: 519-538.

LABEYRIE, J., DUPLESSY, J. C., DELIBRIAS, G. & LETOLLE, R., 1967. Etude des températures des climats anciens par la mesure de l'oxygène 18, du carbone 13 et du carbone 14 dans les concrétions des cavernes. In: *Radioactive dating and method of low-level counting*, I. A. E. A. Vienne: 153-160.

LATHAM, A., 1977. A feasibility study of the paleomagnetism of stalagmite deposits. Proc. 7th Int. Speleological Congress, Sheffield: 280-282.

LATHAM, A. G., 1981. Magnetostratigraphy from speleothems: establishment and applications. Proc. 8th Int. Congress Speleology, B. F. Beck (ed.), Georgia: 358-361.

LIVELY, R. S., 1983. Late Quaternary U-series speleothem growth record from southeastern Minnesota. *Geology*, vol. II: 259-262.

MAIRE, R. & QUINIF, Y., 1984. Un complexe sédimentaire karstique en milieu alpin: les dépôts de la galerie Aranzadi (Gouffre de la Pierre Saint Martin, Pyrénées Atlantiques). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 298 (5): 183-186.

MONROE, W. H., 1970. A Glossary of Karst Terminology. Geol. Survey (U. S. A.) Water-Supply Paper 1899-K, 26 p.

MOORE, G. W., 1970. Checklist of cave minerals. *National Speleological Society, News*, 28: 9-10.

MUGNIER, C., 1983. Les glaciations et leur influence sur la karstification dans la région d'Ason (Province de Santander, Espagne). *Atti Convegno int. sul carso di alta montagna*, 1: 203-208.

NEWSON, M. D., 1971. The role of abrasion in cavern development. *Transactions Cave Res, Group G. B.*, 13 (2): 101-108.

NGUYEN, H. V. & LALOU, C., 1969. Comportement géochimique des isotopes des familles de l'uranium et du thorium dans les concrétionnements: application à la datation des stalagmites. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 269: 560-563.

PFEFFER, K.-H., 1984. Zur Geomorphologie der Karstgebiete im Rheinischen Schiefergebirge, pp. 247-291 *in*: *Le Karst belge. Karstphänomene in Nordrhein-Westfalen*, C. Ek et K.-H. Pfeffer, éditeurs, *Kölner Geographische Arbeiten*, 45: 1-584.

POTY, E., 1984. Les Karsts paléozoïques et mésozoïques (de la Belgique), pp. 71-78, *in*: *Le Karst belge. Karstphänomene in Nordrhein-Westfalen*, C. Ek et K.-H. Pfeffer, éditeurs, *Kölner Geographische Arbeiten*, 45: 1-584.

QUINIF, Y., 1978. Les radioéléments naturels dans les dépôts détritiques de grottes. Premiers résultats. Actes 6<sup>e</sup> Congr. Nat. Spéléol. (Porrentruy-Suisse). Suppl. n. 10 à Stalactite: 139-146.

QUINIF, Y., 1980. Etude du contenu en radioéléments de plancher stalagmitique supérieur. Partim (pp. 129-131) in: Le paléokarsts de la Belle-Roche (Sprimont-Liège). Compte rendu de la réunion du 7.11.1980 (ULg). Publication officielle du FNRS-Groupe de Contact: Etudes karstologiques (C. B. E. K.).

QUINIF, Y., 1981. Thermoluminescence: a method for sedimentological studies in caves Proc. 8th Int. Congr. Speleol., Bowling-Green, USA: 309-313.

QUINIF, Y., 1983. Eléments d'une approche énergétique du karst. Application à quelques exemples réels de karsts. Karstologia, 1: 47-54.

QUINIF, Y., DUPUIS, C., BASTIN, B. & JUVIGNE, E., 1979. Etude d'une coupe dans les sédiments quaternaires de la grotte de la Vilaine Source (Arbre, Belgique). Ann. Soc. géol. Belg., 102: 229-241.

REAMS, M. W., 1968. Cave sediments and the geomorphic history of the Ozarks. Ph. D. thesis, Washington University, St. Louis, Miss.

ROQUES, H., 1967. Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique. Mémoires et Documents du Centre de Recherches et de Documentation cartographiques, C. N. R. S., 4: 113-141.

ROQUES, H. & EK, C., 1973. Etude expérimentale de la dissolution des calcaires par une eau chargée de CO<sub>2</sub>. Annales de Spéléologie, 28: 549-563.

SCHMIDT, H., 1984. Die Heinrichshöhle in Hemer. Kölner Geographische Arbeiten, 45: 557-564.

SCHWARCZ, H. P., HARMON, R. S., THOMPSON, P. & FORD, D. C., 1976. Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance. Geochim. Cosmochim. Acta, 40: 657-665.

STREIT, R., 1968. Untersuchungsmethoden an Höhlensedimenten. Actes du Quatrième Congrès int. de Spéléol., Postojna, 3: 219-225.

SWEETING, M. M., 1972. Karst Landforms. London (Macmillan), 362 p.

THRAILKILL, J., 1970. Solution geochemistry of the waters of limestone terrains. University of Kentucky, Water Resources Institute, Lexington, KY. Research report n. 19, 125 p.

VOGEL, J. C., 1983.  $^{14}\text{C}$  variations during the upper Pleistocene. Radiocarbon, 25 (2): 213-218.

WHITE, E. L. & WHITE, W. B., 1968. Dynamics of sediment transport in limestone caves. Bull. Nat. Speleol. Soc., 30 (4): 115-129.

WINTLE, A. G., 1978. A thermoluminescence dating study of some Quaternary Calcite: potential and problems. Can. Journ. Earth Sci., 15: 1977-1986.