

RASSEGNA SPELEOLOGICA ITALIANA
E SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA

MEMORIA V — TOMO I

ATTI

DEL

Symposium Internazionale di Speleologia

Villa Monastero, Varenna - 1960

sui

“Riempimenti naturali di grotte,,

*A cura
di Salvatore Dell'Oca
Segretario del Comitato Scientifico*

TOMO PRIMO

COMO 1961

MEM.
V

TOMO
I

Atti del Symposium Internazionale di Speleologia

RASSEGNA SPELEOLOGICA ITALIANA
E SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA

MEMORIA V — TOMO I

ATTI

DEL

Symposium Internazionale di Speleologia

Villa Monastero, Varenna - 1960

sui

“Riempimenti naturali di grotte,,

A cura
di Salvatore Dell'Oca
Segretario del Comitato Scientifico

TOMO PRIMO

COMO 1961

SYMPOSIUM INTERNAZIONALE DI SPELEOLOGIA

Villa Monastero - Varenna

3 - 6 ottobre 1960

« RIEMPIMENTI NATURALI DI GROTTA »

Dal 3 al 6 ottobre 1960, si è svolto regolarmente alla Villa Monastero di Varenna (Lago di Como), il Symposium Internazionale di Speleologia sul tema prestabilito: « Riempimenti Naturali di grotte ».

Il Symposium è stato indetto dalla Società Speleologica Italiana, dalla Rassegna Speleologica Italiana e dallo Speleo Club Universitario Comense.

Il Comitato Organizzatore era composto dal Presidente Giuseppe Nangeroni, Presidente della Società Speleologica Italiana, Preside della Facoltà Magistero presso l'Università Cattolica del Sacro Cuore in Milano e Ordinario di Geografia presso la stessa Università, e dal Segretario Generale Salvatore Dell'Oca, direttore della Rassegna Speleologica Italiana e presidente dello Speleo Club Universitario Comense.

Il Comitato Scientifico era formato dal Presidente e dal Segretario del Comitato organizzatore, nonché dai sette relatori ufficiali; con votazione scritta questi hanno designato il Presidente ed il Segretario del Comitato Scientifico, nelle persone di Giuseppe Nangeroni a Presidente e di Salvatore Dell'Oca a Segretario.

Tale votazione è stata riconfermata nella Riunione del Comitato Scientifico effettuata nel pomeriggio del giorno 2 ottobre 1960, nell'Aula Consigliare della Villa Monastero di Varenna.

In fase organizzativa sono state diramate tre circolari per un totale di 7000 copie, a tutte le organizzazioni speleologiche del mondo, nonché ai singoli specialisti particolarmente interessati alla manifestazione. L'organizzazione prevedeva la diramazione di cinquanta inviti, rivolti a specialisti qualificati in materia, da scegliersi fra quanti avessero risposto alle prime circolari; l'invito prevedeva il soggiorno completamente speso per vitto, alloggio ed escursioni e per tutta la durata del Symposium.

Il Comitato Organizzatore ha quindi diramato 87 inviti, così ripartiti per Paesi:

Argentina 1; Austria 7; Belgio 3; Brasile 1; Canada 1; Cecoslovacchia 1; Cina 1; Francia 14; Germania occidentale 3; Giappone 2; Inghilterra 3; Italia 22; Jugoslavia 5; Nuova Zelanda 1; Polonia 1; Portogallo 1; Principato di Monaco 1; Repubblica democratica Tedesca 2; Romania 1; Spagna 3; Svizzera 3; Svezia 1; Turchia 1; Ungheria 5; USA 3.

Alcune nazioni non figurano in questo elenco, il che vuol dire che nessuna risposta, da parte degli interessati di quei Paesi, è pervenuta al Comitato Organizzatore dopo la distribuzione delle circolari. Il Comitato Organizzatore, infatti, ha avuto cura di scegliere almeno un rappresentante per ogni Nazione fra quanti avevano dato la adesione preliminare.

Ai lavori del Symposium hanno partecipato i signori:

ABEL Gustave: Abteilungsleiter für Höhlenkunde am « Haus der Natur » in Salzburg; Korrespondent der Bundeshöhlenkommission, Wien (Austria).

BARRAL Louis: Conservateur du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco; Président de l'Association de Préhistoire et de Spéléologie (Principato di Monaco).

Opera pubblicata col contributo del Consiglio Nazionale delle Ricerche

- BAUCIC Ivo: Istituto Geografico dell'Università di Zagreb e Società Speleologica Croata (Jugoslavia).
- BAUER Fridtjof: Speläologisches Institut (Ministerium f. Land und Forstwirtschaft) Wien (Austria).
- BERNASCONI Reno: Speleo Club Universitario Comense, Società Speleologica Italiana e Società Svizzera di Speleologia, sezione Berna.
- BINDA Augusto: Speleo Club Universitario Comense e Società Speleologica Italiana.
- BOGLI Alfred: Mitglied der internationalen Karstkommission der IGU. Wissenschaftlicher Leiter der Hölochforchung (ASACH), (Svizzera).
- BURCHARD Przemyslaw: Commission de Spéléologie et d'Alpinisme Souterrain Polonaise (Polonia).
- CAPELLO Carlo: Istituto di Geografia, Università di Torino, Società Speleologica Italiana.
- CAPPA Giulio: Gruppo Grotte Milano e Società Speleologica Italiana.
- CAPPA Carlo: Gruppo Grotte Milano.
- CASTALDI Francesco: Istituti Universitari Navale e Orientale di Napoli.
- CHOPPY Jacques: Parigi.
- CIGNA Arrigo: Gruppo Grotte Milano, Speleo Club Universitario Comense, Società Speleologica Italiana.
- CIRY R.: Université de Dijon Faculté des Sciences, Laboratoire de Géologie (Francia).
- CORBEL Jean: Centre national de la Recherche Scientifique (Francia).
- COTTI Guido: Gruppo Speleologico Ticinese, Società Speleologica Svizzera e Società Speleologica Italiana (Svizzera).
- DE LAVAUR Guy: Vice Président Société Spéléologique Française (Francia).
- DELL'OCA Salvatore: Direttore Rassegna Speleologica Italiana, Presidente Speleo Club Universitario Comense.
- DE LORIO Bernard: Président du Spéleo Club de Dijon (Francia).
- DESIO Ardito: Direttore dell'Istituto di Geologia dell'Università di Milano.
- DUBOIS P.: Montpellier (Francia). Segretario Società Speleologica di Francia.
- DUSAN Novak: Geoloski zavod LRS — Ljubljana — FLRJ (Jugoslavia).
- EK Camille: Institut de Géologie et Géographie physique de l'Université de Liège (Belgio).
- FERREIRA Jaime Martins: Sociedade Portuguesa de Espeleologia (Portogallo).
- FINOCCHIARO Carlo: Commissione Grotte « E. Boegan » C.A.I. Trieste e Società Speleologica Italiana.
- FRANKE Herbert W.: Verband der österreichischen und Verband der deutschen Höhlenforscher.
- FURREDDU Antonio: Gruppo Speleologico Pio XI, Osservatorio Geofisico in Cuglieri, Società Speleologica Italiana.

- GEZE Bernard: Président du Comité National Français de Spéléologie (Francia).
- GROBET André: Société Suisse de Spéléologie (Svizzera).
- HERMES Karl: Geographisches Institut, Universität Köln (Germania).
- INSON Eric: South Wales Caving Club (Inghilterra).
- JAKUCS Lászlò: Präsident Ungarischen Speleologischen Gesellschaft (Ungheria).
- LEMMI Guido: Gruppo Grotte Istituto di Geologia Università di Perugia e Società Speleologica Italiana.
- LIEGEOIS Paul: Professeur à l'Université de Charleroi, Président de la Fédération Spéléologique de Belgique (Belgio).
- LIPPI-BONCAMBI Cesare: Gruppo Grotte Istituto di Geologia Università di Perugia e Società Speleologica Italiana.
- MANCINI Fiorenzo: Istituto di Geologia applicata dell'Università di Firenze.
- MANFREDI Paola: Museo Civico Storia Naturale di Milano e Società Speleologica Italiana.
- MARIE : Parigi (Francia).
- MAUCCI Walter: Società Adriatica di Scienze Naturali in Trieste e Società Speleologica Italiana.
- MORANDINI Giuseppe: Istituto Geografico Università - Padova.
- MORI Alberto: Istituto di Geografia dell'Università di Pisa.
- NANGERONI Giuseppe: Presidente Società Speleologica Italiana.
- OZORAY George: Hungarian Geological Institut (Ungheria).
- PARENZAN Pietro: Centro Speleologico Meridionale e Società Speleologica Italiana.
- PASA Angelo: Museo Civico di Storia Naturale in Verona e Società Speleologica Italiana.
- PASA Maria Vittoria: Museo Civico di Storia Naturale in Verona e Società Speleologica Italiana.
- PERNA Giuliano: Società Speleologica Italiana, Museo di Storia Naturale Trento.
- POLLINI Alfredo: Speleo Club Universitario Comense, Società Speleologica Italiana.
- PRETNER Egon: Società Speleologica Slovena di Lubiana (Jugoslavia).
- RENAULT Philippe: Laboratoire Souterrain du C.N.R.S. de Moulis (Francia).
- RUTESIC MILORAD Miro: He « Gornja Zeta » Niksic (Jugoslavia).
- SCOTTI Pietro: Università di Genova e Società Speleologica Italiana.
- SKRIVANEK Frantisek: D. Karstsekcion d. National Museum Gesellschaft und Stat. Institut für Naturschutz - Praga (Cecoslovacchia).
- SIFFRE Michel: Spéleo Club de Paris et Club Martel de Nice. Laboratoire de Géologie Dynamique a la Sorbonne, Paris (Francia).

SILVESTRI d. Pietro: Speleo CAI-Domo, Sez. CAI, Soc. Escursionisti Ossolani in Domodossola e Società Speleologica Italiana.

TELL Leander: Svezia.

TINTANT Henri: Université de Dijon (Francia).

TONGIORGI Enzo: Vice Presidente Società Speleologica Italiana, Laboratorio Geologico Nucleare, Pisa.

TRIMMEL Hubert: Verband österreichischer Höhlenforscher (Austria).

TROMBE Felix: Directeur de Recherches au Centre National de la Recherche Scientifique (Francia).

VLAKOVIC Vladislav: H.E. Gornia Zeta - Niksic (Jugoslavia).

WARWICK Thomas Gordon: University of Birmingham & G.R.G. (Inghilterra).

WILLIAMS Ann: Cave Research Group of Great Britain (Inghilterra).

Il Comitato Organizzatore ha designato sette relatori ufficiali, ciascuno con l'incarico di trattare un particolare aspetto del tema fondamentale « Riempimenti naturali di grotte ». N.LLOPIS LLADO che aveva ricevuto l'incarico di trattare il problema « Ciclo di concrezionamento e ciclo carsico » non ha potuto partecipare — per impegni di Governo — al Symposium; BERNARD GEZE si è assunto l'incarico di sostituirlo.

Il quadro dei relatori ufficiali risulta così composto (secondo l'ordine delle relazioni):

FELIX TROMBE: sedimenti di origine chimica.

PHILIPPE RENAULT: problemi fisici in rapporto con i riempimenti delle grotte.

HERBERT W. FRANCKE: Datazione dei sedimenti di grotte.

BERNARD GEZE: Ciclo di concrezionamento e ciclo carsico.

GORDON T. WARWICK: Problemi di paleometeorologia connessi al riempimento delle grotte.

ANGELO PASA e MARIA VITTORIA PASA: La ricerca paleobotanica applicata ai depositi di riempimento nelle grotte.

Le sedute di lavoro sono state equamente suddivise, riservando metà giornata per ciascun argomento trattato e rimandando le conclusioni alla seduta finale.

Ogni relatore ufficiale ha introdotto l'argomento prescelto, avendo a disposizione per la propria esposizione un'ora circa di tempo; il Presidente di seduta apriva quindi la discussione, e i partecipanti che desideravano prendere la parola, dovevano immediatamente prenotarsi, succedendosi poi, nell'ordine di prenotazione, al tavolo dell'oratore. La risposta del relatore ufficiale alle interrogazioni, salvo rari casi di pronta risposta, è stata rimandata alla seduta conclusiva.

Lo svolgimento delle sedute è stato regolato dalla formazione di una Presidenza che variava ogni seduta, e così composta:

3 ottobre, mattino : Presidente GIUSEPPE NANGERONI
Membri A. Desio
A. Bögli

3 ottobre, pomeriggio: Presidente BERNARD GEZE
Membri G. Abel
L. Tell

4 ottobre, mattino : Presidente HUBERT TRIMMEL
Membri E. Tongiorgi
G. De Lavaur

4 ottobre, pomeriggio: Presidente EZIO TONGIORGI
Membri A. Grobet
R. Ciry

5 ottobre, mattino : Presidente P. G. LIEGEOIS
Membri G. Morandini
Eric Inson

5 ottobre, pomeriggio: Presidente EGON PRETNER
Membri C. Capello
P. Burchard

6 ottobre, mattino : Presidente GIUSEPPE NANGERONI
Membri H. Franke
B. Gèze
A. Pasa
M. V. Pasa
Ph. Renault
F. Trombe
G. Warwick

Il successo della Riunione è stato assicurato oltre che per la scelta scrupolosa dei partecipanti invitati e per la designazione accurata dei vari relatori ufficiali, anche per la messa in atto di un servizio di traduzione simultanea nelle lingue ufficiali del Symposium e cioè: francese, inglese, italiano e tedesco.

Questo servizio ha reso possibile la continua e perfetta intelligenza delle esposizioni e degli interventi dei singoli oratori. Il Comitato Organizzatore del Symposium, pur di raggiungere pienamente lo scopo prefissato, si è sobbarcato ad una spesa veramente ingente, per mettere a disposizione dei convenuti un servizio altamente specializzato. Ogni partecipante aveva a disposizione, sia nella sede di Varenna che in quella di Como, una cuffia d'ascolto a tre traduzioni, oltre la lingua originale che gli consentiva di ascoltare immediatamente nella propria lingua il discorso di un oratore parlante in lingua diversa.

Il servizio di traduzione comprendeva inoltre un servizio di registrazione in nastro magnetico nella lingua dell'oratore, ed un altro servizio di registrazione nella lingua italiana; inoltre un servizio di trascrizione di tutti gli interventi.

Il Comitato Organizzatore ha messo a disposizione degli oratori, inoltre, un perfetto servizio di proiezione, con diversi proiettori, schermi, amplificatori etc. Tale servizio è stato ampiamente usufruito dalla maggior parte dei relatori ed oratori.

Nonostante che i nove interpreti al servizio del Symposium fossero tutti professionisti altamente qualificati e avessero ricevuto in precedenza una preparazione sulla materia specifica del Symposium, per raggiungere una esattezza tecnica nella terminologia speleologica, geologica, botanica, fisico-chimica, usata nel corso del Symposium, il Comitato Scientifico ha disposto che ogni seduta di lavoro fosse preceduta alla sera od al mattino, da una riunione ristretta degli interpreti, dei relatori ufficiali e di pochi altri partecipanti al Symposium. Questo espediente ha permesso la regolare traduzione anche dei termini meno usati e più strettamente tecnici.

L'organizzazione del Symposium Internazionale di Speleologia in Varenna è stata possibile grazie all'interessamento delle Autorità nazionali e locali, che con il loro contributo finanziario hanno permesso di offrire una signorile ospitalità e di mantenere lo svolgimento del Symposium su di un livello altamente qualificato e sorretto da un insieme di servizi accessori indispensabili ad una riunione a carattere internazionale.

Gli Enti che hanno contribuito con sovvenzioni alla organizzazione sono in ordine alfabetico:

Azienda Autonoma di Soggiorno di Como;
 Camera di Commercio e Industria di Como;
 Cassa di Risparmio delle Province Lombarde;
 Comitato Pro Campione;
 Consiglio Nazionale delle Ricerche;
 Comune di Como;
 Ente Provinciale Turismo di Como;
 Prefettura di Como;
 Rassegna Speleologica Italiana;
 Società Speleologica Italiana;
 Speleo Club Universitario Comense.

Ai partecipanti al Symposium è stata distribuita una busta in plastica contenente prospetti del lago di Como, cartine geografiche, cartoline, distintivo del Symposium, una copia della Memoria IV della SSI «Atti dell'8° Congresso Nazionale di Speleologia in Como (1956)», alcuni fascicoli della Rassegna Spel. Ital., e copia dei primi nove contributi, pervenuti prima dello svolgimento del Symposium, etc.

Per la stampa dei contributi e delle relazioni, il Comitato Organizzatore ha ritenuto di pubblicare ante-symposium tutte le note che pervennero al Comitato stesso prima del Symposium; gli ATTI del SYMPOSIUM comprendono tutte le relazioni e comunicazioni presentate prima e durante il Symposium, oltre a tutti gli interventi ed ai testi delle discussioni.

A coronamento dei lavori del Symposium sono state eseguite escursioni all'Orrido di Bellano, e, con motoscafi, all'Abbazia di Piona, alle miniere di pegmatite di Olgiata, e alla sorgente del Fiumelatte. Nell'ultima giornata, dopo la seduta conclusiva alla Villa dell'Olmo in Como, i partecipanti al Symposium sono stati accolti nei saloni della Villa d'Este di Cernobbio per la colazione ufficiale di chiusura, presenti le autorità della Provincia e Città di Como.

SEDUTA INAUGURALE

Mattino del 3 Ottobre 1960 in VARENNA

PRESIDENTE :

Giuseppe Nangeroni

RELATORE UFFICIALE :

Félix Trombe

Presidente NANGERONI

Signore e Signori, durante una riunione tenuta qui in Varenna in questa stessa ospitale e serena Villa Monastero, in occasione dell'VIII Congresso Italiano di Speleologia nel 1956, venne timidamente affacciata la proposta da parte sia del Comm. Bonomelli, in rappresentanza dell'Ente Varenna, sia di studiosi partecipanti al congresso, di tenere un ristretto Simposium su un fenomeno specifico e limitato di speleologia. La proposta non cadde nel vuoto e venne raccolta dalla Società Speleologica Italiana, dallo Speleo Club Universitario di Como e dalla Rassegna Speleologica Italiana con il validissimo aiuto delle loro Eccellenze il Ministro Martinelli e il Prefetto di Como, del Ministro della Pubblica Istruzione, del Consiglio Nazionale delle Ricerche, della Cassa di Risparmio delle Province Lombarde, della Camera di Commercio di Como, della Azienda Autonoma di Soggiorno, dell'Ente Provinciale del Turismo e del Comune di Como, che vivamente tutti ringrazio, e soprattutto con la collaborazione — scusate questo «soprattutto» — di molti studiosi di speleologia e mercè gli intelligenti sacrifici di tempo, e non solo di tempo, del nostro infaticabile Segretario Generale signor Salvatore dell'Oca, al quale mi è grato tributare qui un pubblico plauso, si è potuti giungere al traguardo. La scelta del tema venne affidata alla Commissione cui sembrò necessario approfondire il problema del riempimento naturale delle grotte, e più specificatamente del riempimento indipendentemente dalla attività umana. Questa limitazione venne decisa in rapporto a molti fattori; anzitutto al tempo necessariamente troppo ristretto per le relazioni, relativamente all'estensione dei problemi inerenti al riempimento grotte, poi al fatto che altri simposi e congressi a noi vicini nel tempo si sono e si sarebbero interessati direttamente od indirettamente del fattore umano. D'altronde, in sede di discussione nulla vieta che si possano considerare anche fenomeni concomitanti al problema fondamentale; il problema della datazione porta con sé, ad esempio, evidentemente, una somma di fatti di cui molti sono collegati direttamente anche alla paleontologia e alla paleogeografia in generale. Gli interventi saranno anzi opportuni perchè solo l'apparenza e le nostre molto limitate capacità comprensive, oltre che le necessità dei singoli approfondimenti analitici, tengono distinti dei fenomeni che spesso sono tra loro intimamente interdipendenti. Dalle circolari inviate si può riconoscere il metodo seguito nell'organizzazione del nostro simposio. E permettete che io rilegga i nomi degli egregi relatori che ci intratteranno sui principali problemi inerenti al problema base stabilito. Questa mattina il Prof. Trombe, Direttore di ricerche — scusate se dico anche queste cose, perchè tutti sappiano benissimo quale è l'attività e quale è il valore del Prof. Trombe — Direttore di ricerche del Centro Nazionale della Ricerca Scientifica di Francia ci tratterà, da suo pari, sopra «I sedimenti di origine chimica in grotta». Nel pomeriggio di oggi il Prof. Renault del Laboratorio sotterraneo di Moulis ci parlerà invece dei «problemi fisici in relazione ai riempimenti naturali delle grotte». Domani il Prof. Franke di Monaco di Baviera, della Unione Speleologica Germanica e della Unione Speleologica Austriaca, ci intratterà invece sulla «datazione dei sedimenti delle grotte». E in collegamento con ciò, nel pomeriggio, il Prof. Pasa

e la sua gentile consorte, del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, ci intratterranno invece sulla « ricerca paleobotanica applicata ai depositi di riempimento nelle grotte; metodi e risultati ». Mercoledì il Prof. Warwick dell'Istituto di Geografia della Università di Birmingham: « Problemi di paleometeorologia connessi al riempimento naturale delle grotte ». Avrebbe dovuto anche partecipare a questo consesso il Prof. Llopis Lladò di Oviedo.

Purtroppo, sia per la salute non completamente efficiente, e sia, vorrei dire, per molti impegni che gli sono sopraggiunti proprio in questi giorni e dei quali non ha potuto esimersi, ha mandato un telegramma di partecipazione purtroppo solamente spirituale, mentre avrebbe dovuto trattare il tema: « Ciclo di concrezionamento e ciclo carsico »; problema certamente molto importante e di valore prevalentemente riassuntivo di tutto quello di cui noi avremmo potuto parlare in questi pochi giorni. Io spero che il Prof. Gèze possa prendere la parola proprio su questo argomento. Una promessa l'ha fatta. Io spero che voglia mantenere questa promessa, e noi anticipatamente lo ringraziamo.

Sono convinto che questi tre brevi giorni serviranno ad illuminarci sempre meglio sui vari aspetti del problema e sulle cause del fenomeno. Aspetti e cause che vanno dagli elementi meteorologici, o addirittura climatici e microclimatici, agli elementi litologici e tettonici, in funzione diretta o indiretta, variabili quelli e questi nello spazio e nel tempo, con valori diversi e variamente diversi da luogo a luogo, da tempo a tempo, e soprattutto sui fenomeni di diversa velocità e intensità di corrosione e di sedimentazione, che a noi certo più interessa, che sui metodi per la ricerca di questi valori, metodi che forse debbono variare secondo i diversi ambienti climatici. Oggi si chiedono valori di velocità, tanto da aver bisogno dell'aiuto del matematico e della statistica per i necessari calcoli, mentre prima ci si poteva accontentare anche della pura e semplice morfologia. Io però vedo tra voi anche degli « esploratori puri », cioè dei cari amici che vanno in grotta quasi solo per andare in grotta, perchè esistono le grotte, come un alpinista puro va sulle cime solo per conquistarle, « perchè le vette sono là ».

Cari amici esploratori, voi avete il compito dei pionieri. Il laboratorio ha molta importanza, ma il lavoro di campagna ne ha per lo meno altrettanta, ed è veramente di pochi entusiasti quello di scoprire le vie aperte negli abissi. Ma una comunicazione del simposio già pubblicata serve anche per voi, perchè le scoperte che voi potete compiere ed il cui merito spetta a voi non solo serviranno per la scienza, ma anche per la soddisfazione del vostro spirito e del vostro intelletto. Ringrazio voi, cari Colleghi e amici che avete voluto accettare il nostro invito, certamente anche con un po' di vostro sacrificio, di partecipare e di illuminare tutta la comunità con la vostra parola che esprime tutta la vostra esperienza di laboratorio e di campagna. Non mi resta che augurare un ottimo esito del nostro simposio, perchè tale fu il nostro desiderio e l'intendimento del comitato nel periodo di preparazione. Vogliate scusare le imprevedibili deficienze, di cui non tutte, ripeto, hanno la loro causa nella nostra volontà. E il più grande augurio che a tutti porgo è che, tornando al nostro lavoro quotidiano, possiamo ricordare queste tre giornate come un periodo di lieta e gioconda fecondità di desideri e di opere.

Mi permetto di informare che hanno mandato la loro adesione, per telegramma o per lettera — nomino solamente alcuni Enti — la Presidenza del Consiglio dei Ministri, il Ministro della Pubblica Istruzione; tra le personalità che noi tutti conosciamo, il Prof. Lehmann che purtroppo in questi giorni è indisposto, e purtroppo anche il nostro Prof. Gortani che proprio in questi giorni a Tolmezzo ha avuto un attacco polmonare, che speriamo sia una cosa veramente da poco, per cui possa rimettersi rapidamente; e il medesimo augurio lo facciamo per il caro Prof. Lehmann. Inoltre, la Società Geografica Italiana che qui è rappresentata anche dal Prof. Mori, e, mi sia permesso, per quello che riguarda non solamente gli studiosi ma anche gli esploratori,

anche il nostro caro amico Prof. Sommaruga che si è ricordato di noi da Bengasi donde ha mandato appunto un telegramma di partecipazione.

Io credo che sia conveniente oramai iniziare il nostro lavoro. Il tempo è breve, le relazioni debbono necessariamente essere non lunghe ma necessariamente vaste, e noi dobbiamo ascoltare e poi dobbiamo evidentemente anche discutere sopra questi diversi problemi nei particolari e nelle linee generali. E quindi mi permetto di pregare il Prof. Trombe di venire a riferirci sopra il suo tema.

FÉLIX TROMBE

Directeur de Recherches

au Centre National de la Recherche Scientifique (Paris)

Président de la Commission de Spéléologie du Club Alpin Français

SEDIMENTS D'ORIGINE CHIMIQUE DANS LES GROTTES

Parler des sédiments d'origine chimique des grottes conduit à considérer tout d'abord les conditions dans lesquelles les eaux superficielles ruisselant sur les massifs, puis passant sous terre se chargent de substances diverses qu'elle pourront ensuite, dans des conditions déterminées, déposer dans les cavités souterraines.

A vrai dire, nous élargirons le sujet en examinant les conditions de sédimentation de tout ce qui peut sous terre passer à l'état solide, y compris l'eau elle-même sous forme de glace.

Nous examinerons successivement, en allant du plus simple au plus complexe:

- a) les dépôts de glace dus seulement à des variations de température.
- b) les dépôts de sels dissous peu influencés par la présence de gaz carbonique, mais régis par les variations de température et l'état hygrométrique de l'air.
- c) les dépôts de sels dissous principalement obtenus par des variations de concentration du gaz carbonique de l'air des cavernes et des variations de température de l'air et de l'eau.

d) les dépôts divers d'origine chimique.

Avant d'aborder les questions précédentes, il convient de donner un aperçu de ce que l'on peut appeler les climats souterrains, climats qui jouent un rôle fondamental dans les phénomènes de corrosion et de dépôt d'ordre chimique.

Considérons, tout d'abord, les cavités à un seul orifice pratiquement fermées à leur extrémité.

La figure 1 représente le schéma d'une grotte qui capte sélectivement l'air froid extérieur, car ce dernier, plus dense, a tendance à glisser dans la cavité pour y remplacer un air plus chaud. Cette cavité est, en moyenne, plus froide que la masse rocheuse qui l'entourne. L'air froid, qui y descend, y est toujours relativement réchauffé par les parois souterraines. Son état hygrométrique diminuant, il a tendance à provoquer l'évaporation des solutions qui filtrent dans l'épaisseur de la roche, en même temps, d'ailleurs, qu'il les refroidit.

La figure 2 représente une cavité chaude à orifice inférieur qui capte sélectivement par gravité l'air chaud extérieur. Les parois sont plus froides que l'air admis et, dans certains cas, il y a de fortes condensations, accompagnées de corrosion de la roche. Ces cavités chaudes, en particulier, ont des surfaces fortement attaquées par les eaux condensées. On n'y retrouve jamais de vestiges anciens.

La figure 3 représente une galerie horizontale où peut se produire un double courant d'air: admission d'air relativement froid à certaines heures ou à certaines époques, admission d'air relativement chaud à d'autres époques. Le sol de cette galerie aurait tendance à se dessécher, les voûtes à se corroder.

Les phénomènes climatiques sont plus compliqués lorsque les galeries souterraines présentent plusieurs orifices (fig. 4). La masse calcaire est parfois traversée sur des

centaines de mètres d'épaisseur, sinon un millier, par des galeries souterraines où l'air circule. Le calcaire, ayant une réserve thermique considérable, présente en moyenne une température assez égale, très différente, en plus ou en moins, des températures extérieures qui subissent d'importantes variations diurnes et de plus importantes encore variations saisonnières.

Comme le montre la figure 4, l'air peut circuler, parfois avec violence, de bas en haut ou de haut en bas du réseau souterrain. Pour un air descendant (air chaud admis en a, période d'été ou certaines périodes diurnes), on aura des condensations, très importantes parfois et des corrosions en a; en b, c, d, la température de l'air s'égalisera avec celle de la caverne.

Pour un air ascendant (air froid admis en d, périodes d'hiver ou certaines périodes nocturnes), la zone d, c sera une zone à évaporation, dessiccation; la cavité e située en contrebas de la galerie d - c sera froide en moyenne et se desséchera. L'air, remontant en b et a, prendra la température moyenne du réseau.

Les exemples précédents montrent que l'air souterrain peut se caractériser par des températures et des états hygrométriques très variables et surtout très différents de ceux qui sont réalisés à l'extérieur au même moment. Les différences d'altitude entre les orifices extérieurs de circulation de l'air auront une grande influence sur les températures moyennes obtenues. Il en résultera, pour les dépôts souterrains, de très grandes possibilités; en outre, les sens des courants d'air s'inversant avec les sens des pressions motrices créés par les différences entre les températures interne et externe, il en résultera aussi, pour l'aération des cavités et l'élimination du gaz carbonique qu'elles peuvent contenir, des régimes très différents.

Rappelons, comme nous le verrons en détail plus loin, que ce sont surtout les variations du titre de l'air en gaz carbonique qui conditionnent les possibilités corrosives ou incrustantes des eaux souterraines.

A - LES DEPOTS SOUTERRAINS DE GLACE.

Les *glacières souterraines*, très nombreuses dans les massifs calcaires, se forment dans des cavités verticales, fermées à leur base ou présentant de faibles circulations d'air. C'est le type de la cavité froide, dont l'efficacité pour le captage sélectif de l'air froid est souvent accrue par la présence d'un entonnoir supérieur, rassemblant l'air froid et accumulant la neige de l'hiver (fig. 5).

Ces cavités ont, en général, un étage de névé et en dessous étage de concrétions de glace parfois très importantes. A partir d'une certaine altitude, en général 1400 à 1500 mètres, ce sont des glacières permanentes, en particulier si les fuites d'air vers les profondeurs du massif sont réduites. Pour des altitudes plus basses, les masses de glace sont variables saisonnièrement et disparaissent parfois l'été, mais il est à noter que l'hiver souterrain est en retard de plusieurs mois sur l'hiver superficiel.

Indiquons aussi que, dans les glacières comportant des salles inférieures à concrétions de glace, des dégagements et des localisations de gaz carbonique dus à la solidification des eaux de ruissellement peuvent être réalisés.

Dans les galeries à deux orifices, telles que les représente la figure 6, les apports d'air froid ont lieu pendant les périodes de circulation de bas en haut. Les masses de glace sont localisées dans les parties inférieures des réseaux. D'énormes monocristaux de plusieurs mètres d'épaisseur, mais merveilleusement limpides et transparents, sont ainsi formés, par exemple dans le Glacier de Marboré, Pyrénées Françaises.

B - DEPOTS DE SELS PEU INFLUENCES PAR LA PRESENCE DE GAZ CARBONIQUE.

A vrai dire, il est probable que ce gaz a une action, mais que l'on peut considérer comme très faible comparée à celle qu'il possède pour la mise en solution et le dépôt des carbonates.

Les sels dissous sans réaction chimique par les eaux souterraines sont très nombreux. Le plus important et le plus fréquent est le sulfate de calcium qui cristallise sous forme de gypse ($\text{SO}_4\text{Ca}_2\text{H}_2\text{O}$). Sa présence dans les calcaires est due soit à un stade lagunaire dans la sédimentation, soit à l'oxydation des pyrites ou des schistes pyriteux (voir plus loin).

Le sulfate de calcium présente une courbe de solubilité dans l'eau qui est indiquée figure 7.

Dans les cavernes, où la température est toujours inférieure à 40° C, c'est la partie montante de la courbe qui nous intéresse. Le gypse se déposera donc sous terre, soit par évaporation de sa solution saturée dans un courant d'air non saturé d'humidité, soit par refroidissement de cette solution. On le trouvera toujours dans les parties inférieures des cavernes (zones froides ou zones sèches).

En raison de sa solubilité relativement plus grande que celle du calcaire, plus de 2 g par litre, on peut déposer des quantités notables de gypse par de faibles évaporations de solution ou de faibles variations de température. Un litre de solution saturée qui passe de 10 à 0° C déposera 200 mg de gypse, une variation de 1° donnerait 20 mg.

A côté du gypse, on trouve parfois de l'Epsomite ($\text{SO}_4\text{Mg}, 7\text{H}_2\text{O}$), sulfate de magnésium beaucoup plus soluble dans l'eau (100 fois plus que le gypse). L'Epsomite serait le résultat d'une attaque des dolomies par l'acide sulfurique résultant de l'oxydation des pyrites.

C - DEPOTS DE SELS OU COMPOSES DIVERS INFLUENCES PAR LA PRESENCE DU GAZ CARBONIQUE.

Dans la plus grande majorité des cas, les massifs rocheux où sont creusés des réseaux souterrains et grottes comportent dans leur composition chimique une forte proportion de carbonate de calcium, parfois même ce composé est pratiquement le seul présent.

En général, les calcaires comportent aussi d'autres carbonates, parfois des sels (gypse), des argiles et minéraux divers.

La mise en solution des carbonates par les processus que nous allons indiquer libère les autres composés qui seront ou chimiquement ou physiquement transformés par les eaux de ruissellement; dans certains cas, ces *résidus de décalcification* subiront une évolution continentale, dans d'autres cas, ils passeront rapidement sous terre.

Avant d'aborder le problème de l'attaque du calcaire par l'acide carbonique, indiquons aussi avec SCHOELLER (2) que la corrosion des roches calcaires est due également à bien d'autres agents d'attaque qui, dans certains cas, ont un rôle plus important que celui du gaz carbonique. Citons les acides nitrique et nitreux des phénomènes de nitrification, l'acide sulfurique provenant de l'oxydation des sulfures, les acides produits pendant la croissance des plantes et mis en liberté après la mort de celles-ci, les acides de la décomposition des matières végétales par des bactéries, acides butyrique, formique, acétique, propionique, oxalique, fumarique, succinique, citrique, tannique, valériannique, lactique.

Une partie de ces acides donne des sels stables, d'autres se décomposent. D'après SCHOELLER (2), la mise en solution des calcaires par ces acides peut être, dans certains cas, 10 fois plus grande que par l'intermédiaire du CO_2 (régions chaudes) [CORBEL].

Néanmoins, d'après le bilan du débit solide des rivières souterraines du calcaire, c'est surtout sous forme de bicarbonate de calcium ou de solutions carboniques d'autres éléments et grâce à la présence de gaz carbonique que les montagnes se dissolvent.

Examinons, maintenant d'un peu plus près cette réaction curieuse, pivot de la chimie souterraine que donnent le gaz carbonique, l'eau et un assez grand nombre de carbonates simples ou mixtes et même des oxydes.

Nous prendrons le carbonate de calcium comme exemple car c'est le seul, semble-t-il, pour lequel des études poussées aient été faites.

En l'absence rigoureuse de gaz carbonique, l'eau pure dissout très peu de calcaire, 15 mg par litre environ à la température ordinaire comme le montrent les valeurs suivantes [2].

solubilité en mg/l				
t	CO ₃ Ca calcite	CO ₃ Ca aragonite	calcaire amorphe	CO ₃ Mg
25°	14,33	15,28	14,45	0,176
50	15,04	16,16	15,15	
100	17,79	19,02	18,16	

D'autres valeurs sont données par CHARLOT et EMWSCHWILLER [1], 12,4 mg.

On peut remarquer que la calcite et le carbonate dit amorphe seraient un peu moins solubles que l'aragonite. Néanmoins d'après BACKSTROËM [1], la solubilité de la calcite et de l'aragonite sous une pression de CO₂ voisine de 1 atmosphère seraient égales.

Le carbonate de magnésium, par contre, lorsqu'il est seul, est bien plus soluble, associé au carbonate de calcium (dolomie), il devient très peu soluble.

Le rôle du gaz carbonique dans la mise en solution du carbonate de calcium est fondamental. Mis en présence d'eau pure, le gaz carbonique se dissout physiquement (loi de Henry), la solubilité étant, à une température donnée, fonction de la pression du gaz sur la solution.

Lorsque la température augmente, la quantité de gaz dissous, pour une même pression sur la solution, décroît. Sous une pression de gaz de CO₂ de 1 atmosphère (pression atmosphérique), l'eau pure dissoudra (en litre de gaz ramené à 0° C par litre d'eau) les quantités suivantes:

0° C	5°	10°	15°	17°	20°	30°	40°
1,713	1,424	1,194	1,019	0,958	0,878	0,665	0,530

On voit que cette décroissance de la solubilité du gaz carbonique avec la température pour une même pression de gaz ambiant est loin d'être négligeable. Elle varie du simple ou double entre 0° C et 20° C.

Dans la nature, le gaz carbonique se présente sous forme diluée dans l'air, parfois très diluée (air normal — 3/10.000 de CO₂), parfois relativement concentrée dans l'air confiné du sol (10 % ou plus).

Il occupe dans l'air une *pression partielle* et sa mise en solution dans l'eau se fait à l'équilibre, dans les mêmes conditions que s'il se trouvait le seul gaz présent sous une pression égale à sa pression partielle. Il faut souligner à l'équilibre, car, en effet, en présence d'air, les échanges du gaz carbonique entre l'eau et l'air sont bien plus longs que si ce gaz était seul présent; ceci joue pour la mise en solution du CO₂ comme pour son évaporation des solutions.

La solubilité du CO₂ dans l'eau, pour différentes pressions partielles dans l'air et différentes températures est donnée tableau I [3].

Les chiffres soulignés correspondent au CO₂ présent dans l'eau pour la pression partielle du CO₂ dans l'air normal (3/10.000).

TABLEAU I

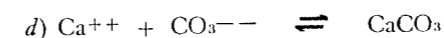
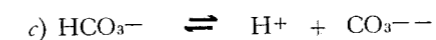
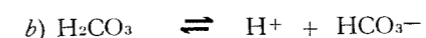
Pression p de CO ₂ (en atmos- phère)	CO ₂ dissous physiquement mg. par litre d'eau, aux températures de							
	0° C	5°	10°	15°	17°	20°	30°	40°
1/10.000	0,34	0,28	0,23	0,20	0,19	0,17	0,13	0,10
3/10.000	1,01	0,84	0,70	0,60	0,56	0,52	0,39	0,31
1/1.000	3,36	2,80	2,34	2,00	1,88	1,72	1,31	1,04
1/500	6,73	5,59	4,69	4,00	3,76	3,45	2,61	2,08
1/100	33,6	28,0	23,5	20,0	18,8	17,2	13,1	10,4
2/100	67,3	55,9	46,9	40,0	37,6	34,5	26,1	20,8
3/100	101	83,9	70,4	60,0	56,5	51,7	39,2	31,2
4/100	135	112	93,8	80,1	75,6	69,0	52,2	41,6
5/100	168	140	117	100	94,1	86,2	65,3	52,1
6/100	202	168	141	120	113	103	78,4	62,5
7/100	236	196	164	140	132	121	91,4	72,9
8/100	269	224	188	160	151	138	104	83,3
9/100	303	252	211	180	169	155	118	95,7
10/100	336	280	235	200	188	172	131	104

A première vue, il apparaît que les solubilités sont assez faibles et l'on ne conçoit pas bien comment dans les phénomènes du calcaire, ce gaz joue un si grand rôle.

Tout change, en effet, lorsque le carbonate de calcium apparaît en présence des deux autres antagonistes, l'eau et le gaz carbonique.

On admet, en général, que le carbonate de calcium dissous dans l'eau est complètement dissocié en ions CO₃⁻⁻ et Ca⁺⁺. Il ne peut rester en solution qu'en présence d'une quantité de gaz carbonique correspondant à la formation de bicarbonate de calcium et d'un excès de ce gaz dit d'équilibre.

La suite des réactions peut s'inscrire:



On peut résumer les équilibres par les relations suivantes:

$$(I) [\text{Ca}^{++}] = [\text{CO}_3^{--}] + [\text{CO}_3\text{H}^-] + [\text{CO}_3\text{H}_2]$$

$$(II) [\text{CO}_3^{--}] [\text{Ca}^{++}] = S$$

$$(III) \frac{[\text{CO}_3^{--}] [\text{H}^+]}{[\text{CO}_3\text{H}^-]} = K_2$$

$$(IV) \frac{[\text{CO}_3\text{H}^-] [\text{H}^+]}{[\text{CO}_3\text{H}_2]} = K_1$$

S est le produit de solubilité du carbonate de calcium, K_1 et K_2 sont les constantes d'acidité de l'acide carbonique. De (I), (II), (III), et (IV), on déduit la relation cherchée entre la solubilité du carbonate de calcium et la concentration en ions hydrogène dans la solution.

$$(V) \quad [Ca^{++}]^2 = S \left(1 + \frac{[H^+]^2}{K_2} + \frac{[H^+]}{K_1 K_2} \right)$$

Il faut remarquer que l'on peut négliger la réaction de dissociation de l'acide carbonique en anhydride carbonique et eau (réaction a).

Les valeurs des constantes K_1 et K_2 à 18° sont égales, respectivement à $3,2 \cdot 10^{-7}$ et $5,6 \cdot 10^{-11}$ [7 et 8].

Pour le produit de solubilité S, on trouve: $0,48 \cdot 10^{-8}$ à 25° [6] ou $0,58-0,59 \cdot 10^{-8}$ à 18° [EMSCHWILLER et CHARLOT] [1].

Les études théoriques et expérimentales de TILLMANS [11], de JOHNSTON et WILLIAMSON [4] [5], de FREAR et JOHNSTON [6] et d'autres auteurs [20] [21] [22] ont permis d'établir les relations précédentes.

TILLMANS, admettant qu'il est toujours nécessaire d'avoir en solution une certaine proportion de gaz carbonique libre dit d'équilibre pour empêcher la dissociation du bicarbonate, donne la relation suivante tirée des équations d'équilibre:

$$\begin{array}{l} \text{CO}_2 \text{ (équilibrant)} \\ \text{(mg/l)} \end{array} = \begin{array}{l} [\text{CO}_2 \text{ (semi-combiné)}]^2 \\ \text{m/l} \end{array} \times \begin{array}{l} [\text{CaO}] \\ \text{m/l} \end{array} \times \frac{1}{k_t} \frac{44}{56}$$

Les valeurs de $\frac{1}{k_t}$ augmentent beaucoup avec la température (voir tableau suivant)

	25°	0	10	15	17	20	30	40
$\frac{1}{k_t} \times 10^5$	44	1,25	1,58	1,9	2	2,11	2,83	3,78

On a, par ailleurs, à 17° C:

$$\text{pH} = \log \frac{[\text{CO}_3 \text{ H}] \text{ des bicarbonates}}{[\text{CO}_3 \text{ H}_2] \text{ libre} \times 3,04 \cdot 10^{-7}}$$

Ces relations traduites dans les tableaux II, III et IV et la figure 8 concordent assez bien avec les faits expérimentaux pour des eaux renfermant plus de 50 mg/litre de CO_2 total (CO_2 bicarbonate et CO_2 libre).

Au-dessous d'après FRANQUIN et MARECAUX [12], on observait des anomalies. D'après ces derniers auteurs, le CO_2 libre d'équilibre n'existerait qu'à partir d'une certaine concentration des solutions en bicarbonate de calcium ($5,67 \cdot 10^{-4}$ mol/litre, soit 92 mg mg/litre de bicarbonate ou 57 mg de CO_3Ca).

Au-dessous de cette concentration en bicarbonate, les solutions seraient stables, même en l'absence de gaz carbonique équilibrant.

Pour les concentrations supérieures à $5,67 \cdot 10^{-4}$ mol/l., FRANQUIN et MARECAUX admettent que, suivant la théorie d'ORLOV [13], le départ de CO_2 observé

serait dû seulement au fait que la relation $[\text{CO}_3^{--}] [\text{Ca}^{++}] = S$ doit être vérifiée.

Notons que les valeurs limites indiquées plus haut représentent pratiquement la limite inférieure des titres en carbonate de calcium que peuvent présenter les eaux souterraines. On est donc conduit à adopter la relation de TILLMANS en remarquant que des écarts notables avec l'expérience peuvent exister pour les plus faibles titres en CO_3Ca .

Revenons, maintenant, aux conclusions pratiques que l'on peut tirer des données précédentes.

L'examen du tableau II montre bien qu'une certaine pression de gaz carbonique est nécessaire pour empêcher la dissociation du carbonate de calcium. Si cette pression était nulle ou égale à 10^{-14} (tableau II) les montagnes calcaires se dissocieraient progressivement et, se transformant en chaux, seraient notablement solubles dans l'eau. Depuis longtemps, elles seraient dissoutes sous l'action des eaux de ruissellement.

Sous la pression partielle que donne naturellement le gaz carbonique dans l'air, il apparait déjà, à la température ordinaire, une solubilité notable de CO_3Ca , 56 mg/l à 25° C et 81 mg/l à 0° C au lieu de 15, en l'absence d'air, à 16° C. Ensuite, plus la pression monte plus la solubilité augmente. Un fait est aussi à remarquer, en comparant les tableaux I, II, III, et IV: la présence de carbonate de calcium permet d'absorber, en solution à une même température, beaucoup plus de gaz carbonique qu'il ne s'en dissout dans l'eau pure.

Ce gaz est d'ailleurs maintenu en solution par la présence de CO_2 libre d'équilibre. Si ce dernier diminue par suite de la diminution du titre de l'air ambiant ou d'une élévation de température, il s'évade du gaz carbonique et il se dépose du carbonate de calcium jusqu'à ce que l'équilibre chimique corresponde aux conditions nouvelles de température et de pression de CO_2 .

TABLEAU II

Solubilité du carbonate de calcium à diverses températures et pour différentes pressions partielles de gaz carbonique [4]

Phase solide formée à l'équilibre	Température	Pression CO_2 en atmosphère	mg/l CO_3Ca ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans 1000 g.	Auteurs
Ca (OH) et CO_3Ca	16°	$3,16 \cdot 10^{-14}$	2000	JOHNSTON & WILLIAMSON [5]
»	»	$2,18 \cdot 10^{-10}$	74	
»	»	$6,14 \cdot 10^{-8}$	18	
»	»	$3,73 \cdot 10^{-7}$	15,9	
$\text{CO}_3 \text{ Ca}$	»	$7,62 \cdot 10^{-6}$	22	
»	»	$7,63 \cdot 10^{-5}$	40	
»	»	$2,15 \cdot 10^{-4}$	56	
»	0	$3,2 \cdot 10^{-4}$	81	
»	10	»	70	
»	15	»	65	
»	25	»	56	FREAR & JOHNSTON [6]
Calcite	25	$3,2 \cdot 10^{-4}$	53	
»	»	$1,10 \cdot 10^{-3}$	78	
»	»	$1,10 \cdot 10^{-2}$	170	
»	»	0,1	390	

TABLEAU III

CO ₂ libre (mg./litre)	0° C			10° C			15° C			20° C			30° C			40° C		
	CO ₂ semi-comb. (mg./l)	pH	CO ₃ Ca (mg./l)	CO ₂ semi-comb. (mg./l)	pH	CO ₃ Ca (mg./l)	CO ₂ semi-comb. (mg./l)	pH	CO ₃ Ca (mg./l)	CO ₂ semi-comb. (mg./l)	pH	CO ₃ Ca (mg./l)	CO ₂ semi-comb. (mg./l)	pH	CO ₃ Ca (mg./l)	CO ₂ semi-comb. (mg./l)	pH	
5	150	7,82	135	59,4	7,79	121	53,2	7,76	113	49,7	7,75	110	48,4	7,73	102	44,9	7,71	
10	197	7,71	179	78,8	7,65	169	74,4	7,66	160	70,4	7,64	146	64,2	7,61	134	59,0	7,58	
20	246	7,55	227	99,9	7,52	213	93,7	7,49	206	90,6	7,48	186	81,8	7,43	170	74,8	7,40	
30	279	7,43	260	114	7,41	245	108	7,38	236	104	7,35	214	94,2	7,32	194	85,1	7,27	
40	307	7,35	286	126	7,32	268	118	7,29	260	114	7,28	236	104	7,23	213	93,7	7,19	
50	330	7,29	308	136	7,26	288	127	7,23	279	123	7,21	254	112	7,17	230	101	7,13	
60	351	7,23	326	143	7,20	307	135	7,17	297	131	7,16	270	119	7,12	245	108	7,08	
70	371	7,19	344	151	7,16	323	142	7,13	313	138	7,12	285	125	7,08	258	114	7,04	
80	390	7,16	359	158	7,12	337	148	7,09	327	144	7,08	298	131	7,04	270	119	6,99	
90	407	7,12	374	165	7,09	352	155	7,06	340	150	7,05	310	136	7,00	281	124	6,96	
100	423	7,10	387	170	7,06	364	160	7,03	352	155	7,01	320	141	6,97	290	128	6,92	
110	438	7,07	400	176	7,03	376	165	7,00	363	160	6,98	331	146	6,94	300	132	6,90	
120	—	—	412	181	7,00	388	171	6,98	374	165	6,96	340	150	6,92	309	136	6,88	
130	—	—	423	186	6,98	399	176	6,95	384	169	6,93	349	154	6,89	316	139	6,85	
140	—	—	434	191	6,96	409	180	6,93	393	173	6,91	357	157	6,87	324	143	6,83	
150	—	—	445	196	6,94	420	185	6,91	402	177	6,89	365	161	6,85	332	146	6,81	
160	—	—	—	—	—	428	188	6,89	411	181	6,87	373	164	6,83	340	150	6,79	
170	—	—	—	—	—	437	192	6,87	419	184	6,86	380	167	6,82	347	153	6,77	
180	—	—	—	—	—	446	196	6,86	427	188	6,84	388	171	6,80	354	156	6,75	
190	—	—	—	—	—	—	—	—	435	191	6,82	393	173	6,78	360	158	6,74	
200	—	—	—	—	—	—	—	—	435	191	6,82	400	176	6,76	366	161	6,73	

TABLEAU IV
(d'après TILLMANS)

Réaction CO₃Ca + CO₂ + H₂O = (CO₃)₂ H₂Ca
équilibre à 17° C.

CO ₂ semi-comb. mg./l	CO ₃ Ca mg./l	CO ₂ équivalent mg./l CO ₂ libre	pH d'équilibre	CO ₂ semi-comb. mg./l	CO ₃ Ca mg./l	CO ₂ équivalent mg./l CO ₂ libre	pH d'équilibre
5	11	00	9,9	107,5	244	32,3	7,19
15	34	0,25	8,44	110	250	35	7,16
17,5	40	0,40	8,31+0,1	112,5	256	37,8	7,14
20	45	0,50	8,26	115	261	40,75	7,12
22,5	50	0,60	8,23	117,5	267	43,8	7,10
25	57	0,75	8,19	120	273	47	7,07
27,5	63	0,90	8,16	122,5	279	50,2	7,05
30	68	1	8,14	125	284	54	7,03
32,5	74	1,20	8,10	127,5	290	57,4	7,01
35	80	1,40	8,07	130	296	61	6,99
37,5	85	1,60	8,04	132,5	301	64,7	6,98
40	91	1,75	8,02	135	307	68,5	6,96
42,5	97	2,10	7,97	137,5	313	72,3	6,95
45	102	2,40	7,94	140	318	76,4	6,93
47,5	108	2,70	7,91	142,5	324	80,5	6,92
50	114	3	7,89	145	330	85	6,90
52,5	119	3,50	7,84	147,5	335	89,1	6,89
55	125	3,90	7,81	150	341	93,5	6,87
57,5	130	4,25	7,79	152,5	347	98	6,86
60	136	4,80	7,76	155	352	103	6,84
62,5	142	5,25	7,74	157,5	358	107,5	6,83
65	148	6	7,70	160	364	112,5	6,82
67,5	153	6,75	7,67	162,5	370	117,5	6,81
70	159	7,50	7,64	165	375	122,5	6,80
72,5	165	8,30	7,61	167,5	381	127,6	6,79
75	170	9,25	7,57	170	386	132,9	6,77
77,5	176	10,40	7,54	172,5	392	138	6,76
80	181	11,50	7,51	175	398	143,8	6,75
82,5	187	12,80	7,47	177,5	404	149,1	6,74
85	193	14,10	7,44	180	410	154,5	6,73
87,5	199	15,60	7,41	182,5	415	160	6,72
90	205	17,20	7,38	185	420	165,5	6,72
92,5	210	19	7,35	187,5	426	171	6,71
95	216	20,75	7,33	190	432	176,6	6,70
97,5	222	22,75	7,30	192,5	438	182,3	6,69+0,2
100	227	25	7,27	195	444	188	6,68
102,5	233	27,3	7,24	197,5	449	194	6,68
105	238	27,5	7,22	200	455	199,5	6,67

Le problème qui se pose pour la mise en solution, comme l'a souligné BOEGLI [28], est la présence effective du gaz carbonique nécessaire.

Examinons à ce sujet quelques exemples. La dissolution du CO_3Ca dans l'eau pure correspond, à l'équilibre, à une pression partielle de CO_2 de l'atmosphère extrêmement faible de l'ordre de $4 \cdot 10^{-7}$ (voir tableau II). Si au lieu d'eau pure, on avait utilisé de l'eau contenant du CO_2 en équilibre avec celui de l'air atmosphérique, par exemple, à 0° , 1mg/l environ, la solubilité de CO_3Ca aurait été augmentée, mais fort peu (de 2 milligrammes par litre environ).

Pour atteindre les 81 milligrammes que l'on trouve à l'équilibre à 0° en présence d'air atmosphérique, il faudra que chaque litre de solution emprunte à l'air atmosphérique tout le CO_2 du bicarbonate et le CO_2 d'équilibre (soit 36 à 37 mg de CO_2 par litre de solution). Or, l'air contient 3/10.000 de CO_2 soit, environ, à 0° C et au niveau de la mer, 1 mg par litre de CO_2 . Il faudra donc des échanges avec des centaines de litres d'air et de longs intervalles de temps (certainement un grand nombre d'heures (BOEGLI) pour aboutir à la dissolution à l'équilibre de 81 mg de CO_3Ca .

Dans des précipitations superficielles brutales, un tel échange avec l'air au niveau du calcaire est impossible. Par contre, des précipitations faibles et prolongées entretenant une humidité constante sur les roches permettent un tel échange; elles sont beaucoup plus efficaces pour la dissolution du calcaire.

Nous en savons assez maintenant pour voir comment se font les dépôts souterrains, type carbonates.

L'eau superficielle, si elle est en même temps et assez longtemps au contact de l'air (CO_2 à $3 \cdot 10^{-4}$) et de la roche, va se charger de gaz carbonique et de calcaire (voir tableau II). Le gaz carbonique accumulé sera beaucoup plus important que celui qui est normalement soluble dans l'eau pure (tableau IV).

Sous terre, quelles sont les conditions qui permettront un dépôt de carbonate? Abaisser le titre en gaz carbonique de l'air sera impossible; des mesures, dans différentes grottes même très aérées, montrent que la proportion de CO_2 dans l'air reste un peu supérieure à celle que l'on trouve à l'extérieur. Il faudra donc recourir à une variation de température pour qu'il y ait évaporation de CO_2 et dépôt de calcaire; la caverne devra donc être plus chaude que l'ambiance extérieure (nous avons vu plus haut que l'eau pouvait dissoudre d'autant plus de CO_2 et de calcaire (tableau III) qu'elle était plus froide). C'est donc en hiver, quand les cavernes sont relativement chaudes, et en tous cas, beaucoup plus chaudes que l'ambiance extérieure, que les dépôts de carbonates se formeront en profondeur. Ceci est vrai pour les massifs calcaires présentant de grandes surfaces de lapiaz dépourvues de toute végétation.

Par contre, lorsque le tapis végétal existe, la véritable source de gaz carbonique est sous la racine des plantes et non dans l'air superficiel. Il est bien connu que la pression partielle du gaz carbonique, dans les sols agricoles, peut varier de 1/1.000 à 1/10 d'atmosphère; on en a donc de 3 à 300 fois plus que dans l'air.

Ajoutons aussi que, sous les glaciers ou les masses de neige, les eaux de ruissellement sont souvent chargées de gaz carbonique. [3]. De nombreuse étude de J. CORBEL [30] [31] ont montré que les eaux des pays calcaires froids sont plus chargées en carbonate de calcium que celles des pays calcaires chauds. Par contre c'est dans les pays calcaires chauds que l'on observe les concrétionnements les plus importants.

Dans les diverses conditions précédentes, les eaux qui pénètrent sous terre peuvent être notablement chargées en calcium. Des titres de plusieurs centaines de milligrammes de CO_3Ca peuvent être obtenus.

Comment va réagir, sous terre, une telle solution? Si les cavités sont aérées, l'air va rapidement évacuer le gaz carbonique qui se dégage, on aura dépôt rapide de carbonate de calcium. Si la caverne est confinée, aucun dépôt notable ne se produira, car le gaz carbonique de l'air souterrain prendra sa pression d'équilibre, à moins que le facteur variation de température n'intervienne comme précédemment.

Il n'est donc pas étonnant que, dans certaines grandes cavités à faible aération, des titres en gaz carbonique de plusieurs pour cent soient rencontrés [29].

Les solutions, encore très chargées en calcaire, peuvent en déposer beaucoup si elles rencontrent d'autres cavités, derrière, par exemple, des voûtes siphonnantes, où l'aération peut être meilleure.

On imagine aisément, en rapprochant ce qui a été dit à propos des climats souterrains de ce que nous venons de commenter, que les dépôts souterrains soient distribués sous terre d'une manière apparemment capricieuse. À ceci vient s'ajouter le trajet également capricieux suivi par les eaux qui filtrent à travers la roche.

D'autres zones de dépôt peuvent aussi être obtenues grâce aux eaux de condensation interne qui se saturent sur place de gaz carbonique, corrodent les roches des galeries souterraines et peuvent provoquer la formation in situ d'argile de décalcification et des dépôts de calcaire. Ce phénomène existe à Padirac (nouvelles galeries, fig. 12) où dans une même galerie se distinguent des zones de corrosion sous les voûtes et de calcification au niveau des nappes d'eau. Ce phénomène est obtenu grâce à une différence de température, probablement de quelques degrés, entre la voûte et l'eau. À certaines saisons, été probablement, l'eau des nappes est plus chaude que les voûtes, elle distille continuellement sur les voûtes qui sont continuellement attaquées par les eaux condensées, chargées de gaz carbonique. Ces eaux descendent dans la nappe, perdent du CO_2 et se concentrent par évaporation sur les voûtes. On obtient donc une corrosion des voûtes et le dépôt calcaire des nappes avec l'intervention d'une quantité très limitée de CO_2 qui se recycle continuellement. Le phénomène est saisonnier, car, à d'autres époques, l'eau est au contraire plus froide que les voûtes. Elle aurait alors tendance à se rechauffer, à perdre du CO_2 (voir solubilité du CO_2 en fonction de la température) et peut-être à déposer aussi du calcaire, mais dans ce dernier cas, il n'y a pas corrosion des voûtes.

Carbonate de magnésium.

Le carbonate de magnésium se trouve naturellement sous la forme de magnésite ou giobertite MgCO_3 ou de nesquehonite, $\text{MgCO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$.

D'après SCHOELLER [2], la giobertite serait plus difficilement soluble que la nesquehonite et que le carbonate de chaux sous une pression de CO_2 de 3/10.000, mais, pour des pressions plus élevées, la solubilité augmente et peut devenir égale à celle du CO_3Ca .

Ce qui précède paraît en contradiction avec les valeurs données plus haut [2], pour la dissolution de CO_3Mg dans l'eau pure; il semble que les carbonates naturels soient plus difficilement solubles que les carbonates artificiels; ceci serait peut-être dû à une différence de constitution, la magnésite pouvant avoir la formule $\text{Mg}[\text{Mg}(\text{CO}_3)_2]$ [23].

Dans les calcaires, on rencontre souvent le carbonate mixte, la dolomie $\text{CO}_3 \text{Ca}$, $\text{CO}_3 \text{Mg}$ qui, lui, est manifestement beaucoup moins soluble que ses constituants dans les eaux chargées de gaz carbonique.

Pour une pression de CO_2 de une atmosphère, on aurait à 18° une solubilité de la dolomie de 320 mg au litre. Rappelons que dans les mêmes conditions la solubilité de $\text{CO}_3 \text{Ca}$ serait de l'ordre de 1 gramme par litre.

Autres carbonates et sels divers.

Carbonate de fer:

Le carbonate ferreux, comme le carbonate manganéux est, en l'absence d'oxygène, certainement transporté par les eaux souterraines par le processus fondamental déjà décrit, le rôle du CO_2 étant prépondérant. En milieu oxydant, l'hydroxyde ferrique qui se forme est, au pH des eaux calcaires, voisin de 7, difficilement soluble. Il suit le sort des argiles. La solubilité de l'hydroxyde ferrique varie considérablement au voisi-

nage de pH 7; de 40 mg/l à pH 6,9, elle décroît à 0,2 mg/l à pH 7,5. Ceci conduit à la perspective d'une solubilité non négligeable du fer, soit dans les eaux acides (acide carbonique agressif), soit dans les eaux très chargées en calcaire (Tableau IV) (au-dessus de 300 mg/l) dont le pH est du dessous de 7.

On retrouve, dans les concrétions, des zones à sesquioxyde de fer et à bioxyde de manganèse.

Bien d'autres carbonates, le plus souvent divalents, sont certainement mis en solution par les eaux chargées de gaz carbonique: carbonates de Zn, Cd, Ba, Sr, Pb, Gl, Cu, Co, Ni, Li.

On a également montré le rôle du CO₂ dans le transport des *phosphates*. Il n'est pas rare de trouver sous terre des concrétions relativement riches en anhydride phosphorique, les gouffres à phosphorite en sont le plus bel exemple [36]. On sait que le phosphate tricalcique (PO₄)₂ Ca₃ est très peu soluble dans l'eau pure 20 mg/l. Par contre, sous une pression de CO₂ d'une atmosphère, on a une solubilité de 0,5 à 0,6 g au litre, soit à peu près la moitié de la solubilité du CO₃Ca. Remarquons que cette solubilité est plus grande que celle du phosphate bicalcique qui, en l'absence de CO₂, est de 0,2 g au litre.

Nous donnons à titre d'information originale l'analyse chimique de différentes parties de concrétions formées sur les parois de la grotte de Pénéblanque (Haute Garonne) qui présentent, par ailleurs, aux rayons X, une structure apatitique (Tableau V).

TABLEAU V

Constituants	Couche externe brune à aspect vernissé des concrétions	Couche sous-jacente blanche des concrétions	Roche support
Chaux CaO (gravimétrie de l'oxalate)	43 %	46,2%	56 %
Anhydride phosphorique P ₂ O ₅ (gravimétrie du phosphomolybdate d'ammonium)	33,5%	34,5%	Traces
Silice SiO ₂ (insolubilisation en milieu chlorhydrique)	2,2%	1 %	
Oxyde ferreux Fe O (manganimétrie)	1,3%	0,6%	Traces
Alumine Al ₂ O ₃ (gravimétrie du phosphate)	1 %	0,6%	
Anhydride carbonique CO ₂ (Attaque H Cl dilué)	14 %	15 %	44 %
Fluor, chlore	Traces	Traces	
Matières organiques	Traces	Traces	
Perte à 150°	2 %		
TOTAL:	97 %	97,9%	100%

Dépôts de décalcification.

L'attaque des calcaires laisse sur place de nombreux insolubles, sables dolomitiques, quartz, glauconie. Nous avons vu précédemment que l'attaque chimique des calcaires peut avoir lieu sous terre. Ces dépôts seront alors localisés dans les souterrains eux-mêmes.

L'argile est, en partie, insolubilisée et en partie transportée.

Il est certain que les gels de silice ou les véritables solutions de silice sont stables en milieu basique et suivent les solutions de carbonates. Pour les silicates d'alumine (argiles), leur floculation a lieu quand le pH augmente, c'est à dire, quand on précipite du carbonate de calcium.

La solubilité vraie de la silice dans l'eau est donné dans le tableau VI [SCHOELLER [2]].

Les transports des argiles, du fer, de la silice dépendent de beaucoup de facteurs et, en particulier, des interventions des acides du sol et des sels de calcium.

L'acide humique superficiel joue donc un grand rôle dans cette mise en mouvement de l'argile, de la silice et du fer tant que l'intervention du calcium ne provoque pas la fixation et la précipitation du fer et en grande partie de l'argile. On sait, par exemple, [DEMOLON - 45] que certaines végétations dépourvues de calcium (conifères) donnent un humus libre et agressif, d'autres végétations (hêtres) apportent le calcium nécessaire pour fixer l'humus.

Ces facteurs initiaux ont une grande importance car l'action du calcium sur les eaux qui pénètrent sous terre n'est pas immédiate et la composition des dépôts obtenus peuvent refléter leur influence.

TABLEAU VI
Solubilité de la silice (SiO₂) dans l'eau

pH	millimoles/l.	mg/l
2	0,6	36
3	0,6	36
4	1,0	60
5	1,8	108
6	3,6	216
7	4,7	282
8	5,3	318
9	5,7	342
10	6,0	360
11	6,3	378

De récentes études sur les argiles et limons des cavernes [32] [33] [35] venant s'ajouter à des travaux d'ensemble plus classiques sur les sédiments ont montré leur complexité qui résulte de ce qui a été dit plus haut.

On savait déjà que les argiles des milieux souterrains pouvaient être plus ou moins carbonatées, phosphatées, ferrugineuses, etc, mais il apparaît qu'elles sont aussi plus ou moins humiques et également, d'après CAUMARTIN [35], qu'elles contiennent une microflore abondante.

Examinons maintenant les aspects et caractères divers des dépôts souterrains.

Nous avons déjà parlé de la glace et du gypse et signalé que ce dernier cristallise dans les zones basses, déshydratées et froides des cavités souterraines, en particulier,

là où existent des courants d'air. Les formes différentes des dépôts de gypse sont nombreuses. Le cristal fondamental est monoclinique, mais le fer de lance classique des gisements de plâtre est remplacé dans les grottes par des baguettes prismatiques ou des plaques développées sur des surfaces rocheuses; certaines formes sur la glace sont transparentes (Grotte Devaux, 2840 m). Plus fréquemment le gypse se présente sous forme de fleurs ou d'arborescences très caractéristiques. Les figures 9 et 10 montrent des fleurs de gypse de l'aven Bob (Aveyron) (Photos Balsan).

Les formations de gypse se trouvent aussi dans les schistes. L'oxydation des pyrites contenues dans les schistes conduit, en présence du calcaire, suivant des réactions classiques [3] [34], à la formation de sulfate de calcium, anhydrite, puis gypse. Les gonflements qui résultent de ces réactions font éclater les schistes en feuilletés. On voit sur la figure 11, l'éclatement d'une plaque de schiste par formation de gypse (cristaux blancs). Ce phénomène, qui débite la roche en minces feuilletés comme l'indique la figure 12, est aussi capable de provoquer la fissuration, la fragmentation et l'effondrement d'énormes blocs de milliers de mètres cubes (grotte de Riusec, Haute Garonne). C'est là un exemple de plus de l'intervention des phénomènes chimiques au stade initial des effondrements souterrains.

Le carbonate de calcium.

Ce composé le plus important de la chimie souterraine existe sous diverses formes cristallines. La plus connue est la calcite, variété stable de CO_3Ca anhydre, qui cristallise en rhomboèdres. La calcite, stable à la température ordinaire, est également stable jusqu'à la température de dissociation du carbonate de calcium, c'est à dire jusqu'à des températures de l'ordre de 700°C .

Deux autres formes métastables du carbonate de calcium anhydre existent aussi: ce sont la *Vatérite* hexagonale que l'on n'a jamais trouvée dans les grottes et l'*aragonite* orthorhombique qui existe sous terre, mais beaucoup plus rarement que la calcite. Il faut signaler aussi une forme hydratée, l'*hydrocalcite*, $\text{CO}_3\text{Ca} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ rhomboédrique comme la calcite et qui, en raison de sa stabilité à basse température, pourrait, dans les grottes froides comme j'en avais émis l'hypothèse, être le stade intermédiaire de formation de cristaux de calcite dans certains mond milchs.

Le carbonate de calcium dans les cavernes est, en définitive, représenté par la calcite, forme stable, et l'aragonite, forme métastable.

On connaît les conditions de transformation aragonite-calcite à température relativement élevée autour de 400°C [38] [39] [40] [41].

JAMIESON [42], par une étude sous pression (de plusieurs milliers de Kg) des équilibres calcite aragonite entre 25 et 80°C , aboutit à la conclusion que l'aragonite se forme sous pression à cause de sa densité supérieure à celle de la calcite, mais que, dans les conditions naturelles, à la pression normale, l'aragonite est métastable. Les formations naturelles sont donc dues, soit à des impuretés qui interviennent pour modifier l'équilibre au moment des dépôts, soit à des facteurs physiques dont l'influence l'emporte sur les facteurs régissant l'équilibre.

On a étudié la formation d'aragonite au laboratoire en présence de sels de strontium et de magnésium [43]. Il est indéniable que ces sels interviennent pour favoriser la cristallisation d'aragonite, en particulier, le sulfate et le carbonate de strontium, ce dernier isomorphe de l'aragonite. Le même auteur [43] trouve qu'une température relativement élevée permet d'augmenter les proportions d'aragonite dans les dépôts obtenus en présence des impuretés magnésium ou strontium.

Un autre travail de G. W. MOORE [44] donne une classification des grottes américaines en prenant comme base la présence ou l'absence d'aragonite. Au nord d'une ligne irrégulière est-ouest, partageant les U.S.A. en deux, les grottes sont froides et ne contiennent pas d'aragonite. Au sud de la ligne de séparation, les grottes sont plus chaudes et, semble-t-il, auraient été encore plus chaudes dans le passé; on y trouve

soit des formations actuelles d'aragonite, soit des formations anciennes recouvertes de calcite.

Dans un autre ordre d'idées, Mademoiselle POBEGUIN [27] a montré que l'on obtenait facilement de l'aragonite à partir de solution aqueuse de carbonate de calcium pur en présence de CO_2 en réalisant la cristallisation en présence d'une atmosphère relativement sèche ou en présence d'un courant d'air; l'aragonite étant un peu plus soluble que la calcite, elle aurait tendance à se former dans des solutions sursaturées.

Aspects des dépôts de carbonate de calcium.

L'aspect des dépôts de calcite est très varié: stalactites, stalagmites draperies sont les formes les plus fréquentes (figures 14 et 15). Le développement d'une stalactite ou d'une stalagmite se fait le plus souvent, comme l'avait montré HAUY, le fondateur de la cristallographie, suivant l'axe ternaire du rhomboèdre (fig. 13 et 16), bien que les cristaux paraissent se développer suivant divers profils (fig. 17) peut-être dûs aux conditions de dépôt ou à des alternances de dissolution et de dépôt.

Dans l'eau, les cristaux se forment avec des développements de faces secondaires (fig. 18).

Les formes les plus extraordinaires des dépôts souterrains sont les excentriques de calcite (fig. 13 et 19). PRINZ [37] en a étudié très minutieusement les caractères dans les grottes de Belgique. La raison du développement des faces secondaires est encore incertaine. Il est probable que les courants d'air, les réchauffements locaux, les dépôts d'argile jouent un rôle dans ces formations excentriques, de même qu'ils favorisent les formations de calcaire grimpantes sur de grandes surfaces de parois.

Les concrétions d'*aragonite* ne sont pas moins extraordinaires que celle de calcite. Dans plusieurs grottes de France, on les trouve surtout sous la forme de cristaux aciculaires blancs développés en forme d'oursin autour d'un noyau de calcite (fig. 20). Diverses études [25] [26] sont à signaler à ce sujet.

D'autres types de dépôts souterrains sont également à signaler: les *perles de caverne* (calcite) (fig. 21 et 22) cristallisent concentriquement autour d'un noyau en général non calcaire (grain de sable), les *formations de mond milch* dont la composition est très variable, etc.

J'avais montré, en 1943, que certains Mond milchs, en particulier ceux provenant de grottes froides d'altitude, étaient uniquement constitués d'un enchevêtrement de microcristaux de calcite gorgés d'eau, d'où l'hypothèse d'une formation intermédiaire d'hydrocalcite. Actuellement, on a trouvé des mond milchs de composition extrêmement variables (cristaux de calcite, d'aragonite, de dolomie, de huntite, d'hydromagnésite, de nesquehonite, de giobertite, de phosphate, d'alumine, etc.).

Ce qui précède conduit GEZE [46] à considérer le mond milch seulement comme un faciès.

Je citerai aussi ces extraordinaires formations microcristallines de calcite trouvées dans les nouvelles galeries de la rivière souterraine de Padirac, phénomène d'une grande ampleur puisqu'une nappe d'eau de plusieurs mètres de large et de plusieurs mètres de profondeur en était encombrée, en surface et assez loin au-dessous de l'eau, sur plusieurs dizaines de mètres de longueur. La figure 23 montre l'invasion de la rivière par ces formations assez résistantes pour empêcher la progression d'un bateau, mais insuffisamment solides pour porter un homme. La figure 24 en donne une photographie agrandie (x 3); la figure 25 les montre en grossissement plus grand (x 20).

Ces formations, trouvées en 1948 et qui sont restées stables plusieurs années, ont été dissoutes, malgré leur grand développement, et détruites au cours d'un seul cycle annuel. Elles montrent l'existence de variations climatiques souterraines importantes et fortuites, même dans les grands réseaux profonds comme Padirac.

Ce qui précède nous conduit à examiner un dernier aspect du problème des sédi-

ments chimiques souterrains: celui de leur croissance, de leur évolution et de leur destruction.

On sait peu de chose sur l'évolution des dépôts d'argile, de mond milch et même d'aragonite, par contre, pour les dépôts de calcite, quelques indications peuvent être données.

Le concrétionnement s'effectue à des vitesses très variables. Je citerai, comme exemple extrême:

1^o) *les formations rapides de Padirac et d'Adelsberg*: un grillage, posé il y a 60 ans en haut de la grande salle de Padirac, est actuellement couvert de mailles de calcite d'épaisseur variant de 1 à 3 centimètres.

A Adelsberg, certains dépôts ont été recouverts d'un vernis calcaire en 13 ans.

2^o) *Les revêtements créés par capillarité sur les parois d'argile*: ce concrétionnement est extrêmement long. Une griffade d'ours de cavernes (25.000 à 30.000 ans) est recouverte d'une croute de calcite de 1 à 3 mm d'épaisseur. Des traces humaines sur le sol, des gravures ou des dessins sur argile présentent de fines couvertures calcifiées ou des accumulations de cristaux dans les creux des empreintes ou des traits.

La conservation des concrétions anciennes est liée à différents facteurs. Parmi les facteurs physiques, la *corrosion* par les eaux condensées est un des plus marquants. On l'observe particulièrement dans certaines galeries fossiles au-dessus des rivières actives. Les phénomènes de corrosion peuvent être assez intenses pour détruire plusieurs millimètres d'épaisseur de calcaire en quelques milliers d'années. Enfin, le principal facteur de destruction des concrétions est d'ordre mécanique, les stalactites accrochées sur des roches argileuses deviennent par leur développement de plus en plus lourdes, puis se décolent et se brisent. Les stalagmites édifiées sur des dépôts peu résistants finissent aussi par tomber. On voit à l'aven d'Ornac, dans le midi de la France, d'impressionnants exemples de ces destructions.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) - EMSCHWILLER et CHARLOT - *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 5^{ème} Série, 1088 (1939).
- BACKSTRÖEM - *Z. Physik Chem.*, 97, 179 (1921).
- 2) - H. SCHOELLER - *Géochimie des eaux souterraines* - Société des Editions Technil; Paris 1956.
- 3) - F. TROMBE - *Traité de Spéléologie*, Payot Editeur, Paris 1952; *Gouffre et Cavernes du Haut Comminges*, Travaux scientifiques du Club Alpin Français (1943).
- 4) - PASCAL - *Traité de Chimie Minérale*, T IV, Masson, ed., Paris 1958.
- 5) - JOHNSTON et WILLIAMSON - *G. Am. Chem. Soc.*, 38, 975 (1916).
- 6) - FREAR et JOHNSTON - *J. Am. Chem. Soc.*, 51, 2082 (1929).
- 7) - KAUKO et KARLBERG - *Z. Physik Chem.*, A 173, 141 (1935).
- 8) - KAUKO et NANTERE - *Z. Physik Chem.*, A 176, 187 (1936).
- 9) - HOEHNEL - *J. Prakt. Chem.*, 107, 165 (1924).
- 10) - ENGEL - *C. R. Ac. Sci.*, 101, 949 (1885).
- 11) - TILLMANS - *Die chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser*, 2 ed. W. KRAPPE, Halle (1932).
- 12) - J. FRANQUIN et P. MARECAUX - XVIII Congrès de Chimie Industrielle, Nancy, 22 Septembre - 2 Octobre 1938 - *Compte-rendus*, T. 2, 532 c à 547 c.
- 13) - ORLOV - *Z. anorg. Chem.* 87 (1930).
- 14) - LANGELIER - *J. Am. Water Works Assoc.*, 28, 1500 (1936).
- 15) - LARSON et BUSWELL - *J. Am. Water Works Assoc.*, 34, 1667 (1942).
- 16) - COLAS - *L'eau*, 36, 6, 7, 8 (1949).
- 17) - HANS WETTE - *Gas und Wasserfach*, 86, 265 (1943).
- 18) - SANDERA - *Chem. Obzor.*, 17, 21 (1942); *Chem. Zentr.* II, 444 (1942).
- 19) - GREENWALD - *J. Biol. Chem.*, 141, 789 (1941).

- 20) - SMITH - *J. Marine Biol. Assoc. United Kingdom*, 25, 235 (1941).
- 21) - MILLER - *Am. J. Sci.*, 250, 161 (1962).
- 22) - HUBARD - *J. Phys. Chem.*, 43, 387 (1939).
- 23) - QUARAROLI et BELFIORI - *Chem. Zentr.*, II, 3380 (1938).
- 24) - B. GEZE, R. LAGRANGE et Th. POBEGUIN - *C. A. Ac. Sci.*, 242, 144-5 (1956).
- 25) - B. GEZE et Ph. RENAULT - *Bull. Soc. Fr. de Minéralogie*, T. LXXVIII, 400-409 (1955).
- 26) - T. TROMBE et M. FOËX - *Bull. Soc. Fr. de Minéralogie*, T. LXXVIII, 510 (1959).
- 27) - Th. POBEGUIN - *C. R. Ac. Sci.*, 241, 1791 (1955).
- 28) - A. BOEGLI - *Kalklösung und Korrenbildung* - *Zeitschrift für Geomorphologie* 1960.
- 29) - H. ROQUES - *Sur la répartition de l'acide carbonique dans les kartst* - *Annales de Spéléologie*, T XIV, fas. 1-2, 9 (1959).
- 30) - J. CORBEL - *Thèse et Revue de Géographie de Lyon*, Publication hors série 1957.
- 31) - J. CORBEL - *Annales de Géographie*, n° 366, 97 (Mars-Avril 1959).
- 32) - CAVAILLE - *Les argiles des grottes* - Introduction à l'étude des sédiments souterrains - *Annales de Spéléologie*, T. XV, fas. 2, 383 (1960).
- 33) - Anne-Marie GOUNOT - *Recherches sur les limons argileux souterrains* - *Annales de Spéléologie*, T. XV, fas. 3, 501 (1960).
- 34) - G. LORIAUX - *De la présence des pyrites dans les roches calcaires et de son influence dans le cavernement* - *Colloquium Int. de Spéléologie Bruxelles* 4 et 6 Juillet 1958, p. 17.
- 35) - V. CAUMARTIN - *Quelques aspects nouveaux de la microflore des Cavernes* - *Annales de Spéléologie*, T. XIV, fas. 1-2, 147 (1959).
- 36) - B. GEZE - *Les gouffres à phosphate du Quercy* - *Annales de Spéléologie*, T. IV fas. 2, 89 (1949).
- 37) - W. PRINZ - *Les cristallisations des grottes de Belgique* - Bruxelles Hayez ed. (1908).
- 38) - R. FAIVRE et R. WALLAEYS - *C. R. Ac. Sci.*, 231, 285 (1950).
- 39) - M. PRUNA - *Thèse* Paris 1951.
- 40) - G. CHAUDRON, H. MONDANGE et M. PRUNA - *Proc. Int. Symp. Reactivity of Solids*, Gothenburg, p. 9 (1952).
- 41) - H. MONDANGE - *Thèse*, Paris 1958.
- 42) - J. C. JAMIESON - *Journal of chemical Physics*, Vol. 21, N° 8, 1385 (1953).
- 43) - G. W. MURRAY - *The Journal of Geology* - 62, 481-492 (1954).
- 44) - G. W. MOORE - *Am. Journal of Sciences*, 254, 746-753 (1956).
- 45) - DEMOLON - *Dynamique du sol* - Dunod ed. 1948.
- 46) - B. GEZE - *Communication au Congrès de Spéléologie de Marseille* (1960).

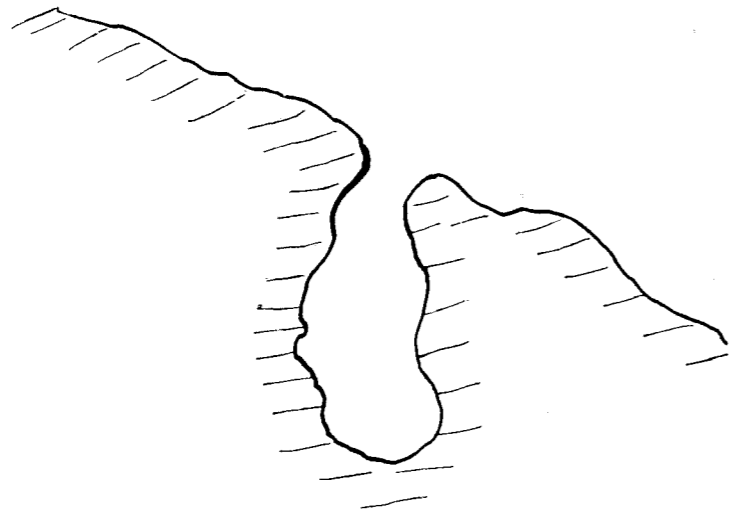


Fig. 1

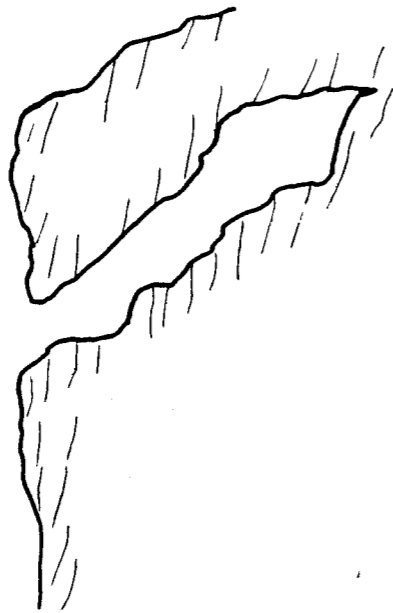


Fig. 2

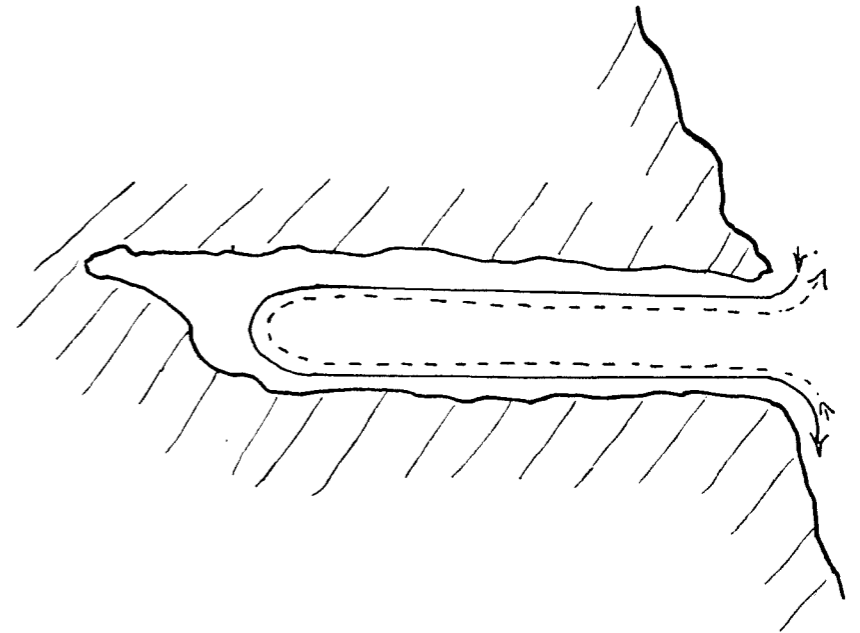


Fig. 3

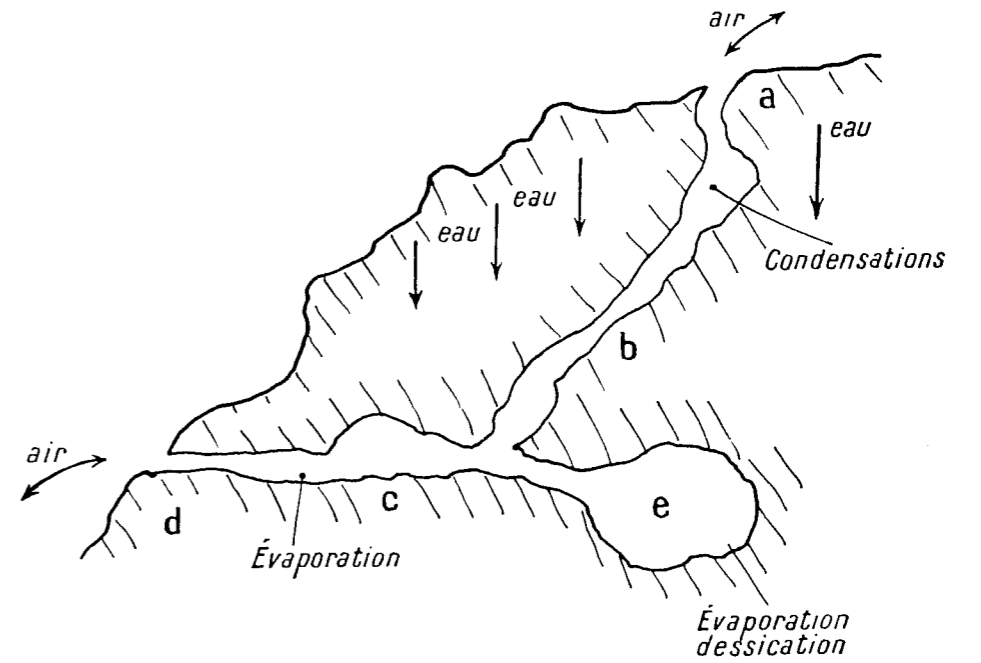


Fig. 4

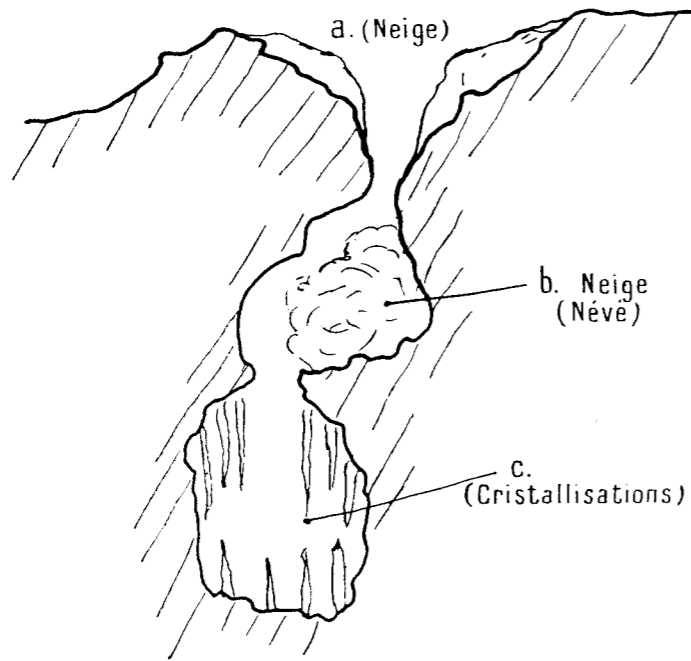


Fig. 5

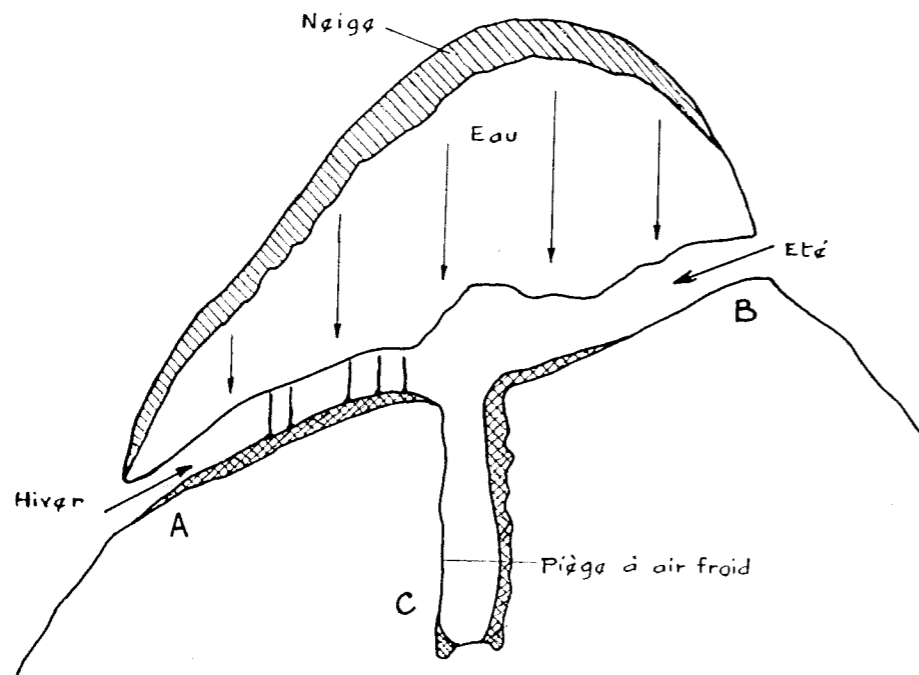


Fig. 6

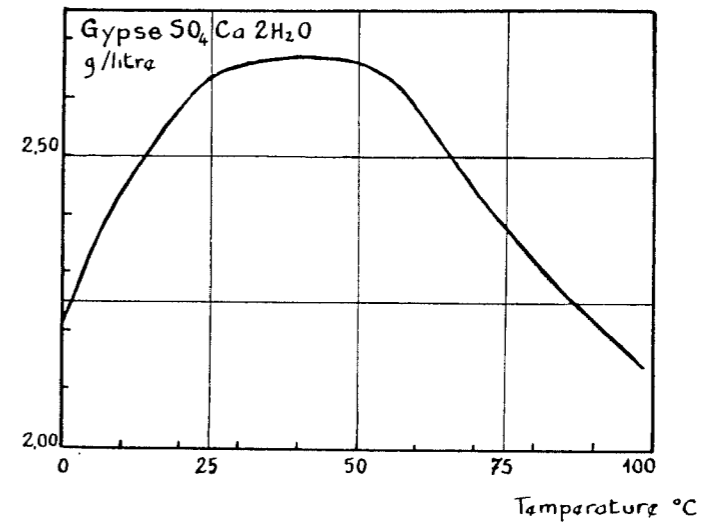


Fig. 7

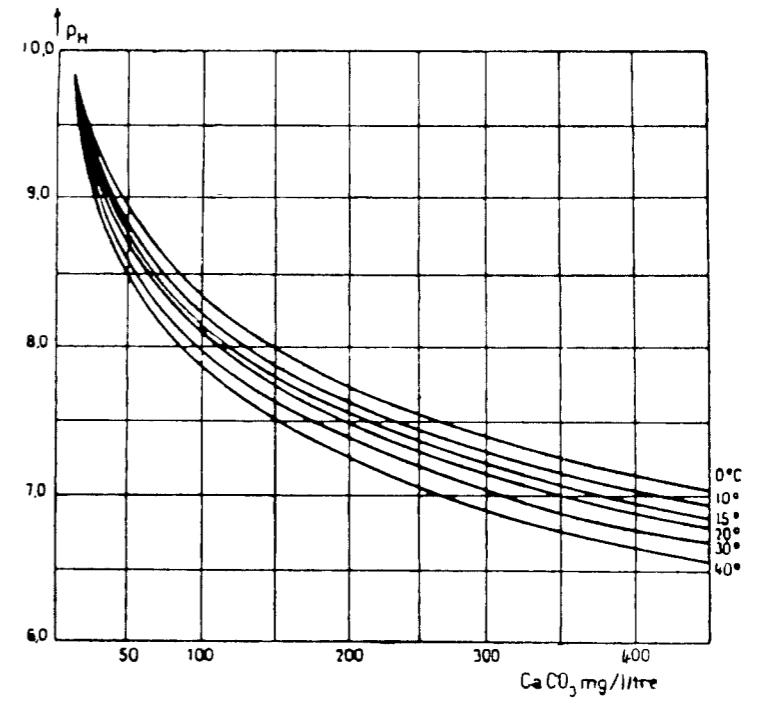


Fig. 8

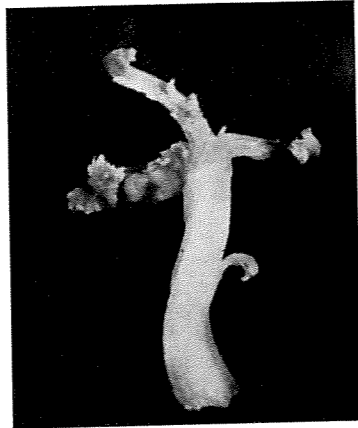


Fig. 9



Fig. 10

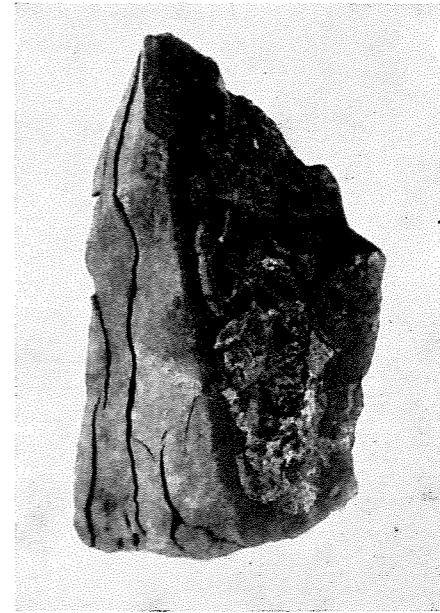


Fig. 11

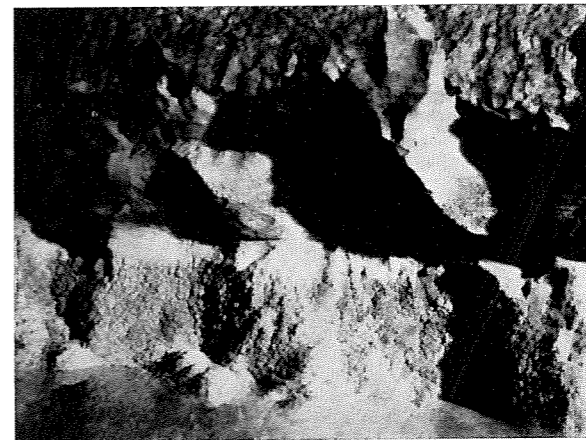


Fig. 12

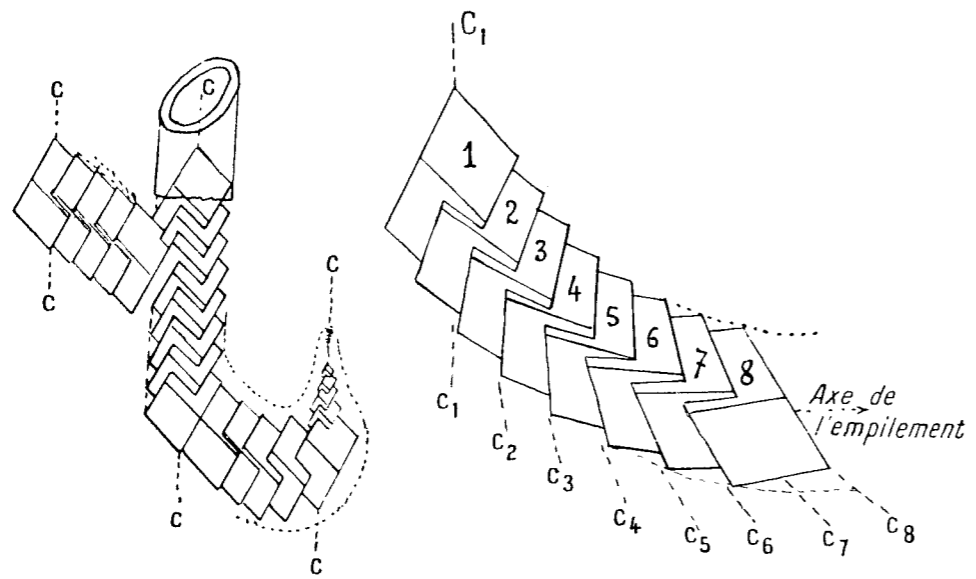


Fig. 13

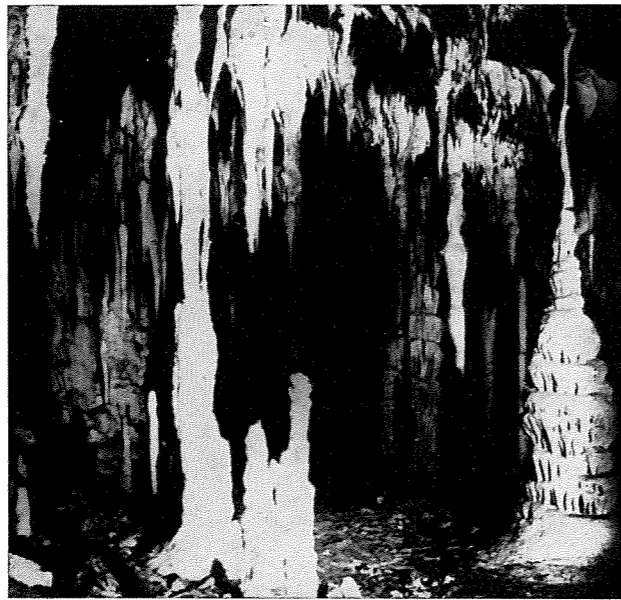


Fig. 14 - Tuc d'Audoubert (Ariège).

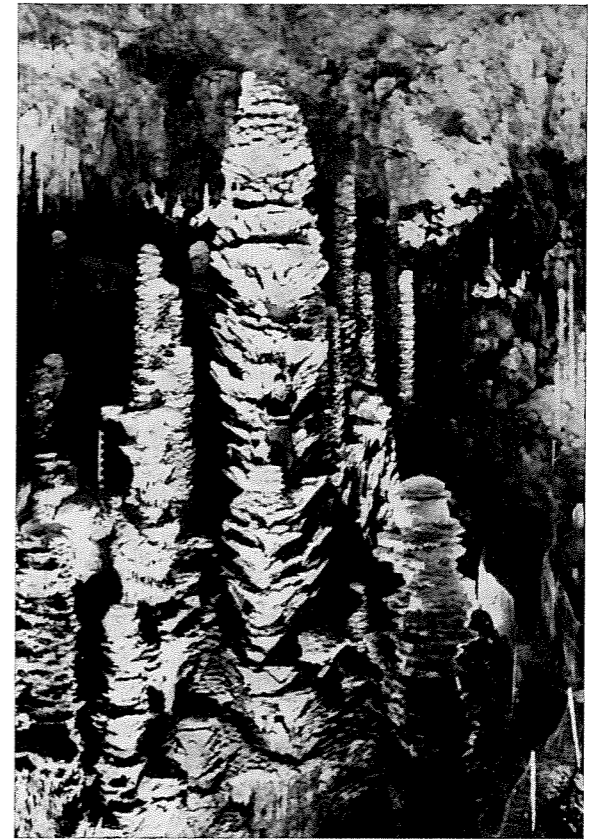


Fig. 15 - AVEN ARMAND (Photo Balsan).



Fig. 16

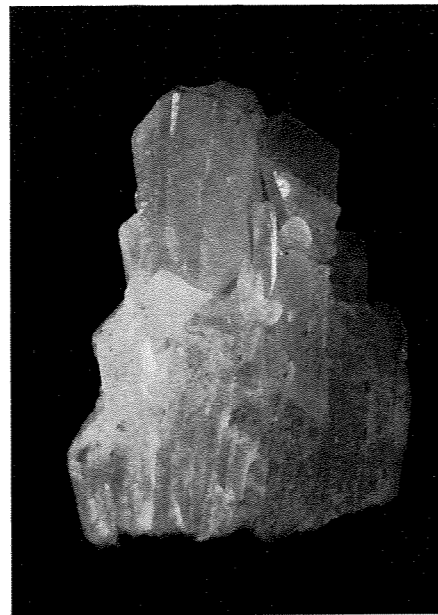


Fig. 17



Fig. 18



Fig. 19 - Grotte de Médous (Médous) (Photo Allix).

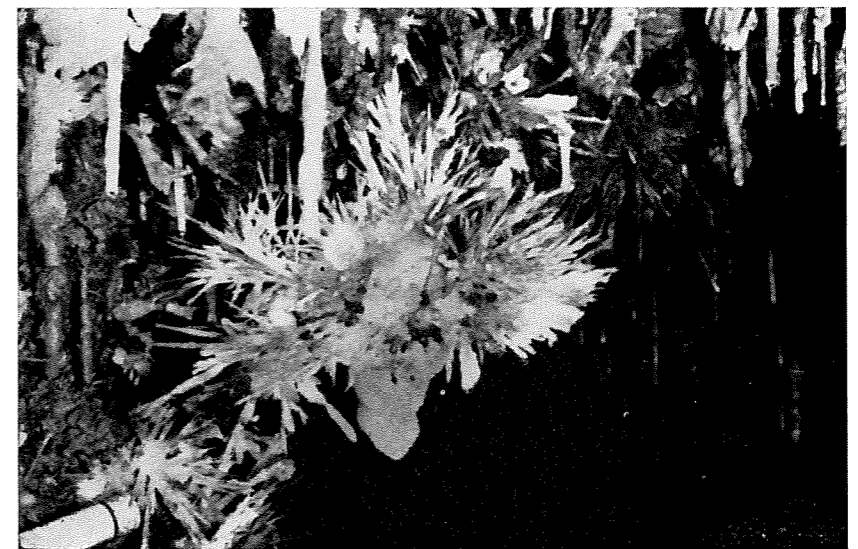


Fig. 20 - Aragonite (Photo Balsan).

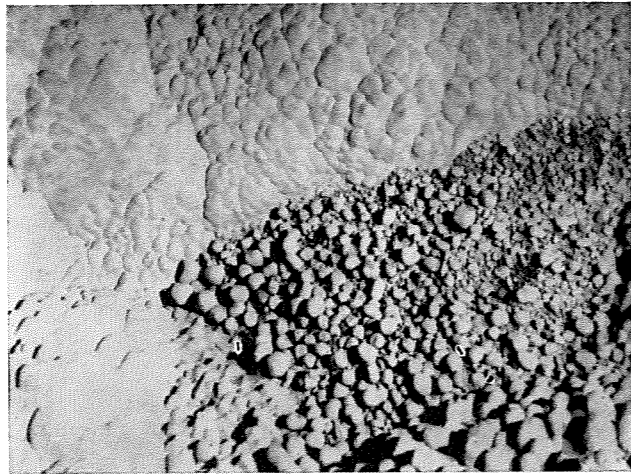


Fig. 21

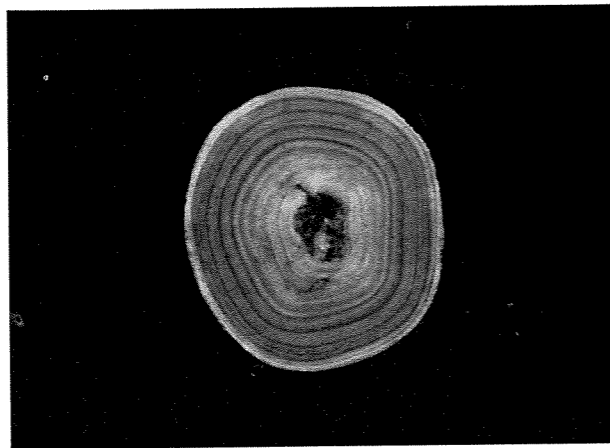


Fig. 22

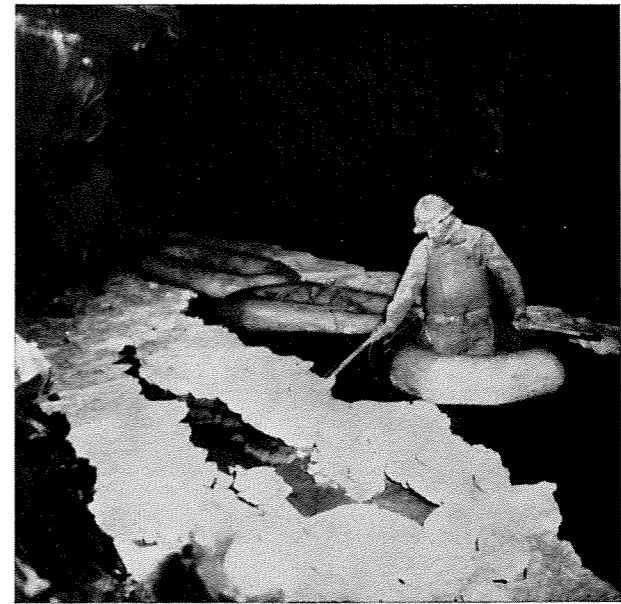


Fig. 23



Fig. 24



Fig. 25

DISCUSSIONE

Presidente NANGERONI.

Ringrazio il Prof. Trombe della sua bellissima relazione. Mentre Egli stava parlando io pensavo che era proprio necessario arrivare ad un simposio di questo genere, perchè effettivamente le conoscenze che non dico io, perchè io, scusate, sono veramente ignorante, ma che quasi tutti noi abbiamo al riguardo sono veramente molto scarse. Invece in questo modo, con l'aiuto della fisica, soprattutto, e della chimica noi, appunto attraverso l'apporto del Prof. Trombe, abbiamo potuto sapere e conoscere molte cose più di quello che certamente conoscevamo; e questo da parte di tutti. Quindi ancora un vivo ringraziamento.

Vorrei, prima di cominciare la presentazione delle diapositive, pregare quelli che desiderano intervenire nella discussione, di dare il loro nome.

CORBEL: Je tiens tout d'abord à remercier, mon collègue, le Professeur Trombe. J'ai beaucoup utilisé son livre. Ce sont plutôt des compléments et une autre direction de recherches que j'apporte. Je m'intéresse essentiellement à l'action des différents types de climat sur les grottes. Deux points me semblent importants; *le premier concerne la température des grottes et les glaces.*

A une certaine distance de l'entrée des grottes, 100 à 200 m environ, la température moyenne annuelle est à peu près fixe et correspond à la température moyenne annuelle de l'entrée. Entre celle-ci et la zone de température stable existe une zone de variations de températures. Quelle est l'ampleur de cette zone et des changements de températures qui s'y produisent. Ces variations, par les mesures que j'ai pu faire ne paraissent pas dépasser 3° Centigrades en général. Ce n'est que dans des cas vraiment exceptionnels que l'on peut voir des différences de l'ordre de 4°.

Mais généralement l'écart est beaucoup plus voisin de 1 que de 3. Passons à la température moyenne de l'entrée. Elle varie évidemment avec l'altitude, comme elle a varié autrefois avec les conditions climatiques du Quaternaire. Ces différences dues à l'altitude correspondent, on le connaît très bien en climatologie, à 5° Centigrades pour 1000 m d'altitude. C'est-à-dire qu'au voisinage de la ligne de 1500 m, qui est la première altitude à laquelle on trouve les gouffres à neiges, à glaciers, à formations de glace, cela correspond à une température moyenne annuelle de +5 dans la zone ensoleillée; mais dans les zones d'ombre, (puisque dans nos régions de montagne on distingue toujours la zone au soleil et la zone à l'ombre), cette température moyenne annuelle peut être proche de 0° même à 1500 m. Les formations de glace se produisent donc par des températures moyennes annuelles très voisines de 0°. On trouve des formations de glace beaucoup plus importantes lorsqu'on monte plus haut, puisqu'à partir de 2500 m on a l'isotherme 0° même sur le versant au soleil, et au-dessus on a même des températures moyennes inférieures (rarement dans les Alpes mais plus fréquemment dans l'Arctique). Nous avons mesuré cette différence entre zone d'ombre et zone de soleil, à maintes reprises et nous avons constaté qu'elle variait beaucoup avec l'altitude. Au voisinage de la mer, elle est très faible, alors qu'à 2000 m d'altitude, cette différence ombre-soleil est considérable. A 4000 m, elle est encore beaucoup plus forte du fait que la pression est plus faible. Ceci a pour conséquence que dans l'Arctique, en Laponie ou au Groenland, il n'y a pratiquement pas cette différence ombre-soleil, puisqu'on opère toujours au voisinage du niveau de la mer, alors que dans les grottes alpines de haute altitude cette différence est très sensible dans la répartition des grottes, et donc dans les courants d'air; il y a plus de chances d'avoir des courants d'air entre deux faces alpines éclairées différemment qu'entre deux faces arctiques où la circulation d'air est beaucoup plus faible.

Deuxième point: il s'agit des problèmes chimiques en grottes.

Dans les mesures systématiques de rivières froides — qui n'ont pas été faites tellement par moi qui n'ai pas pu les suivre très régulièrement, mais par les services spéciaux américains ou russes qui mesurent des rivières arctiques depuis des années six fois par jour, et ont donc des séries suffisamment longues — on peut constater que la variation du pH est extrêmement faible. Je citerai un chiffre: pour 10 rivières du Nord de l'Alaska, étudiées durant des années, la variation a été seulement de 6,4 à 7,3. C'est un exemple de stabilité absolument remarquable. Ceci me paraît lié au fait que les réactions chimiques à basses températures sont très lentes.

La dissolution totale du calcaire est beaucoup plus forte que dans les eaux chaudes, mais tout cela se fait lentement. J'ai essayé de faire des mesures systématiques sur un certain nombre de grottes froides, et il me semble qu'il a fallu souvent trois jours pour arriver à ce que le calcaire atteigne sa saturation. Nous avons procédé à des recherches semblables dans les zones chaudes, (toujours en recourant aux chiffres des hydrologues des U.S.A.).

Au sud de la Floride, en un court laps de temps on a constaté des variations de pH de 4,3 à 10,2 et ceci dans des espaces relativement courts. Je pourrais citer des exemples de rivières souterraines du Mexique, du Yucatan, où la différence de pH se fait sur quelques centaines de mètres; donc, les variations sont relativement rapides. Ce sont donc des eaux instables qui (vues de l'extérieur pour ne pas décomposer trop les réactions) semblent passer leur temps à dissoudre et à redéposer le calcaire. Ce qui explique que l'on ait des masses de stalactites et de stalagmites énormes, alors que dans les zones froides, glacées, à eau stable, ce qu'il y a de frappant pour l'explorateur c'est l'absence ou la rareté extrême des concrétions dans les grottes glacées ou sub-glacées. Je pense qu'il y a environ 800 grottes dans la Laponie Artique, et quand on a trouvé comme stalactites de simples macaronis (ces formes longues et minces que les spéléologues connaissent bien), c'est un événement publié dans le journal local. Alors que l'on ne signalerait même pas cela dans un pays méditerranéen, là-bas c'est vraiment une découverte. Par contre, les grottes des Tropiques sont tellement envahies de concrétions que le spéléologue n'a littéralement plus de place pour passer. Dans les grottes du Yucatan, au Sud du Mexique, à partir de 200 ou 300 m de l'entrée, on ne peut plus se glisser entre les stalactites et les stalagmites. On trouve d'ailleurs, dans toutes les régions chaudes des concrétions même à l'extérieur des grottes, fait inconnu sous les climats frais ou froids. L'abondance des dépôts est donc bien un phénomène lié au climat, à l'instabilité des eaux chaudes qui déposent aussi vite qu'elles dissolvent.

Presidente NANGERONI:

Ringrazio il Prof. Corbel per l'intervento ricco di esperienze e prego il Dr. Bögli di prendere la parola.

BOEGLI: Boegli traite la question des conditions du concrétionnement dans les cavernes profondes; voir Boegli: Entstehungsbedingungen von Kalkausscheidungen in Höhlen, pages 115 à 119 (Tome II).

Presidente NANGERONI:

Ringrazio il Prof. Boegli per la sua comunicazione e per aver voluto aggiungere alle sue parole una rappresentazione iconografica veramente ottima e meravigliosa, specialista, com'egli è, di fotografie in grotte e specialmente di fenomeni di carsismo superficiale. Quindi ancora ringraziamenti. Prego il Dott. Cigna.

CIGNA: Vorrei ricordare un'ipotesi che mi è stata segnalata recentemente dal Prof. Tongiorgi circa la formazione di concrezioni di aragonite, secondo quanto è stato pubblicato in una rivista americana di geologia della quale ora non ricordo purtroppo il nome.

Secondo questa ipotesi il carbonato di calcio delle concrezioni si depositerebbe sotto forma di aragonite o di calcite a seconda che sia o non sia presente, rispettivamente, un germe di carbonato di stronzio. Ciò in quanto la stronzianite è isomorfa con l'aragonite.

Vorrei fare poi un'altra osservazione a proposito dell'effetto sale. Un articolo su questo effetto è stato pubblicato dal collega J. Montoriol Pous (Speleon, anno VIII, pag. 91) nel 1957 che lo descrive senza però trarre delle conclusioni quantitative. Il fenomeno, in breve, è il seguente: se ad una soluzione satura di un sale si aggiungono piccole quantità di un altro sale che non abbia ioni comuni con il primo, la solubilità del primo sale aumenta. Tutto ciò vale per concentrazioni molto deboli e quindi per sali poco solubili. Il carbonato di calcio è appunto un sale poco solubile in acqua e si può considerare l'aumento della sua solubilità in presenza di piccole quantità di cloruro di sodio. Facendo i conti, che sono piuttosto lunghi e noiosi, si trova che l'aggiunta dell'uno per mille di cloruro di sodio aumenta di alcuni percento la solubilità del carbonato di calcio. Se l'aumento effettivo non è irrilevante, questo fenomeno potrebbe avere una certa importanza in relazione alla presenza di cavità carsiche di dimensioni superiori a quelle che ci si aspetterebbe dalla circolazione idrica locale, in zone prossime al mare. Sarebbe interessante sapere se qualcuno ha svolto ricerche in questo senso, in modo da poter controllare sperimentalmente l'ipotesi cui si è fatto cenno.

Presidente NANGERONI:

Grazie. Prego il Prof. Warwick di prendere la parola.

WARWICK: Mr. President, Ladies and Gentlemen, I just wish to make a few comments on different speakers. First of all I would like to take up the remarks of my friend Dr. Cigna concerning the work of *Wray* and *Zeller* which was published in the *Journal of Sedimentary Petrology*, I think, of about 1956. They established very carefully this question of the effect of other minerals on aragonite precipitation, stressing the function of strontium salts, also, of course, the presence of other aragonite there on which crystal mould could form. In England not much work has been done directly on this but we do have two separate occurrences of aragonite. One from mines in the north of England, in a complex mineral field where strontium has been definitely established in several cases and where mines were opened and cavities found — there were the aragonite formations on the walls and it has been suggested that as due to strontium. On the other hand there is the hypothesis, put forward by *George Moore* in the *American Journal of Science* a few years ago — which I hope to refer to later — which regards aragonite formations as paleoclimatological indicators of warmer conditions than occur at present. It is just possible that some of our other aragonite formations found in the counties of Devon and Somerset, in the south-west of England, may fall into that category. Concerning the presence of carbon dioxide I have always stressed this question of CO₂ in the soil air, I would stress it a little more than Prof. Trombe who tended, I thought, to overstress the agricultural soils which naturally have an increase of additional manure and so forth, but the soil air especially in temperate climates is an important source for the supply of CO₂. But I think it is very dangerous at this stage of measurements to make deductions concerning the affect of this on cave formations. From such careful work as has been done at the agricultural research station at *Rothamstead*, on the CO₂ content of soils on plots which have been growing various crops, there was no noticeable seasonal variation. There were variations, but they depended on the weather — I know that our British weather is very variable — but I am sure that similar variations could be quoted elsewhere by agricultural scientists.

Of course above all there is the question that the diffusion of CO₂ from the soil air into the ordinary atmosphere depends very considerably on the atmospheric changes of pressure, which are very very much more variable than those underground. One has to interpret these matters very carefully and I don't think we can make the deductions accurately at this stage.

A second point concerning eccentricities — again I refer to the American geologist *George Moore* who unfortunately could not be here, who in a special paper issued by the National Speleological Society of America, has suggested that one of the causes for the change in direction of growth from that of the c-axis to give a curved form to the helictite may be due to temporary cessation of deposition, associated with the drying up of the surface due to direct evaporation. If this can be further substantiated, then we have here an indicator of conditions where complete saturation of the cave atmosphere is only seasonal. I don't think we can say more than that at the moment, but I think it is a very interesting hypothesis and this work was based on thin sections, *not*, as Prof. Nangeroni has said, simply on observations of morphology.

With regard to some of the formations which were shown by Prof. Trombe and Dr. Bögli, I would like to make two small comments. One is with regard to pool formations. There is an extremely rare formation, known as *calcite bubbles*, which I found in an abandoned limestone mine at Dudley, Worcestershire, England in a rimstone pool beneath a surface film of calcite (*cave ice*). They consist of calcite in the form of very small dog tooth crystals (scalenoedra) deposited around air bubbles trapped underneath the calcite film.

Finally, in discussing the question of *curtains* — if I may just refer to the blackboard for a moment — the two types of curtain which were shown by Dr. Bögli are of course of the well-known types the first with a perfectly smooth surface and often showing banding and the other type — of which he showed us a very large example — which I have referred to as the *coxcomb*. I think that this type often shows slower conditions of water supply, because one may observe in many cases the actual water held between the «teeth». The water is held here sufficiently long for the dissolved carbon dioxide to become adjusted to the local conditions, and quite large crystals are to be found forming these teeth or axes of growth. When broken off, these formations often break apart as there is little or no crystal continuity between them. On the other hand, hybrid forms occur, showing a change from the *coxcomb* type to the other by the filling in of the spaces between the teeth.

More work is also required on the study of deposits to be found in pools. For example I was in a local cave yesterday morning, the Grotta di Masera, and there from the bottom of one of the pools I found the typical rough crystalline material, but formed on a smooth, platy formation, one could pull pieces out. Probably recrystallization had occurred below, or a change in conditions of deposition. We know insufficient about the effects of recrystallisation under such circumstances.

Presidente NANGERONI:

Ringrazio del contributo anche il Prof. Warwick. Prego il Dr. Jakucs.

JAKUCS: Meine Damen und Herren, die ersten Untersuchungen hinsichtlich der Entwicklungszeit der Tropfsteinbildungen der ungarischen *Baradla* = Höhle von *Aggtelek* wurden mit Hilfe wasserchemischer Analysen von Prof. Dr. A. D u d i c h im Jahre 1930 vorgenommen. Er hat die altersbestimmenden Jahresdaten aus dem Vergleich der absoluten Gewichtsgrösse des im Wasser gelösten Kalkstoffes mit der gleichfalls messbaren Masse der untersuchten Stalagmit bzw. Stalaktitbildungen ausgerechnet. Den Grund zu einer solchen Altersberechnung bot die Annahme, — neben Beibehaltung des Prinzips der Aktualismus, — dass das Mass der Tropfsteinbildung nicht nur von der Zeitdauer und der Menge des abgetropften Wassers, sondern auch von der Konzentration des im

Wasser gelösten Kalziumhydrokarbonats eindeutig und linear abhängt. Mit anderen Worten würde das soviel bedeuten, dass sich aus einem Liter jenes Wassers, dessen gelöster Kalziumhydrokarbonatgehalt $X + 2N$ ausmacht, in gleicher Zeit zweimal soviel Tropfstein absetzt als aus einem anderen Liter Wasser, dessen gelöster Kalkgehalt nur eine Menge von $X + 1N$ beträgt. (In diesem Falle verstehen wir unter X den konstanten, und in derselben Höhle praktisch gleichbleibenden Gehalt an Kalziumhydrokarbonat, in mg/l, welcher sich unter den gegebenen meteorologischen, weiterhin aerosol, Temperaturverhältnissen bereits keineswegs von der wässrigen Lösung absetzen kann). Dr. Dudich hat aus den Berechnungen, welche auf Grund der obenbeschriebenen Untersuchungsprinzipien getroffen wurden, festgestellt, dass das Zeitalter der Tropfsteine der Baradla — Höhle stark individuell sei und berechnete in absoluten Jahreszahlen die individuelle Entwicklungszeit einzelner Stalaktiten.

Während der Fünfziger Jahre hat der Verfasser weitere eingehende Untersuchungen in Bezug auf das Wachstum der Tropfsteine der Baradla-Höhle durchgeführt. Während dieser wurden von ihm ungefähr 1200 Wasseranalysen an den Tropfwässern der Höhle durchgeführt, deren Ergebnisse an dieser Stelle nicht eingehend behandelt werden können, und er verglich die Daten dieser Angaben mit den Mengenzuwachsmessungen, welche an den untersuchten tropfenden Stellen vorgenommen wurden. Diese neueren Untersuchungen führten, den Dudichschen Ergebnissen gegenüber, zu dem überraschenden Ergebnis, dass die Menge des aus der Lösung ausgeschiedenen Kalkes — auf dieselbe Zeit und Wassermenge gerechnet — in keinem eindeutigen Verhältnis zu dem Grad der Kalksättigung der Lösung steht. Es ergaben sich z. B. Stellen, an denen sich bei 19,2 mg/l Kalziumionengehalt aus 100 l abgetropftem Wasser 16 mg Tropfstein abgesetzt hat, während gleichzeitig an anderen Stellen, an denen der Kalziumionengehalt des Wassers 130 mg/l betrug, sich aus 100 l Wasser nur 2 1/2 mg Tropfstein ausschied.

Wir erwähnen hier in Klammern, dass wir zur Messung des Mengenzuwachses des Tropfsteines in jedem Fall Glasscheiben von gleicher Fläche angewendet haben, welche an den untersuchten Stellen für bestimmte Zeitabschnitte im Wege des tropfenden Wassers gesetzt wurden. Während der Dauer der Messungen, die durchschnittlich 6 Monate betrug, wurde auch die Menge des auf die Glasscheibe tropfenden Wassers gemessen. Am Ende der Untersuchungsperiode wurde die Gewichtsunterschiede der mit der Tropfsteinschicht überzogenen und nachher mit Salzsäure wieder reingewaschenen Glasscheibe berücksichtigt.

Prof. Trombe und andere Verfasser bringen die aus einer Volumeinheit ausgeschiedene Tropfsteinmenge mit dem aggressiven Kohlensäuregehalt des Wassers in Bezug. Die kalklösende und kalkablagernde Fähigkeit des Wassers soll demnach eine Funktion jenes Kohlensäuregehaltes sein, welcher von dem im Boden absickernden Wasser, besonders in der oberen, von Pflanzenwurzeln, Mikroorganismen und verfallenden organischen Stoffen gesättigten Bodenschicht verschlungen wird. Dementsprechen sei die Geschwindigkeit der Tropfsteinbildung in der Höhle die Funktion der vom Wasser ausgeschiedenen Kohlensäuremenge. So eindeutig mag aber, laut unseren Untersuchungen, diese Folgerung nicht angenommen werden, da wir in zahlreichen Fällen dort eine stärkere Tropfsteinausscheidung beobachten konnten, wo der Kohlensäuregehalt bedeutend niedriger war als der eines anderen tropfenden Wassers, aus welchen aber die Kalkausscheidung kaum eine Rolle spielte.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen und des daraus folgenden Gedankenganges, die wir hier nur in grossen Zügen besprechen können, hatten uns davon überzeugt, dass das Mass der Tropfsteinbildung in einer Höhle am wirksamsten von gewissen Aenderungen des Drucks geregelt wird. Das in das mikrotektonischen Kluftnetz sickende Wasser ist im Gestein einem immerfort zunehmenden hydrostatischen Druck unterworfen. Auf die Wirkung dieser Druckerhöhung, welche auch mehrere Atmosphären betragen mag, wird das bekannte chemische Gleichgewicht der im Wasser gelösten

aggressiven bzw. freien Kohlensäure kraftvoll der aggressiven Kohlensäure zugunsten verschoben, welche Tatsache soviel bedeutet, dass das Wasser ohne Aufnahme von neuer äusserer Kohlensäuremenge, allein infolge des erhöhten hydrostatischen Drucks eine Fähigkeit zur weiteren Lösung von Kalziumkarbonat gewinnt. Sobald eine solche Lösung wieder an einer freien Stelle erscheint, zum Beispiel in einer Höhle, scheidet sich aus ihr infolge des Aufhörens des früher wirkenden hydrostatischen Drucks sofort jene Kalkmenge aus, welche jetzt unter dem geringeren Druck entsprechend dem chemischen Gleichgewicht in der Lösung überflüssig wird. In diesem Fall ist also die aus der Lösung ausgeschiedene Tropfsteinmenge keine Funktion des Uebersättigungsgrades der Lösung, sondern jener Unterschied, welcher zwischen dem Druck in der Höhle — praktisch einer Atmosphäre — und dem im Inneren des Gesteins auf das Wasser auswirkenden hydrostatischen Druck bestand. Es wurde auf Grund dieser Erkenntnis klar, dass derart kein richtiges Alter eines Tropfsteins erhalten ist, wenn wir das Tempo der Tropfsteinbildung nur mit Hilfe der chemischen Zusammensetzung und der Menge des auf den Tropfstein herabfallenden Wassers zu bestimmen versuchen. Der Verfasser hat in der Baradla-Höhle das Alter von mehreren Tropfsteinbildungen mit seiner oben beschriebenen Methode bestimmt.

Die durch diese Methode gewonnenen Jahreswerte erwiesen sich jedenfalls zuverlässiger als jene, welche mit Hilfe der früheren Messungsmethode erreicht wurden. Nach Kontrollierung der berechneten Werte mit Russringen jener Stalaktiten, deren Ausbildungsalter uns bekannt ist, ergaben sich Abweichungen von höchstens 10-12 %. Wir erwähnen hier in Klammern, dass die Baradla — Höhle laut den Ergebnissen der archäologischen Forschungen bereits vor 7000 sowie vor 3500 Jahren von den Menschen der Bükk-Kultur, beziehungsweise der Kultur von Hallstatt bewohnt war. Diese Tatsache wird von den im Inneren der Tropfsteine befindlichen und an der Bruchfläche gut erkennbaren syngenetischen Russringen unterstützt.

Presidente NANGERONI:

Il Dr. Jakucs ci ha dato un valido contributo e lo ringraziamo. La parola al Dr. Skrivanek.

FRANTISEK SKRIVANEK: *Das Strontium in Aragoniten und Kalksteinen des Tschechischen Karstes.* — Bei der systematischen Durchforschung von Höhlen im Tschechischen Karst, die von der Karstsektion der naturwissenschaftlichen Korporation des Nationalmuseums in Praha durchgeführt worden ist, hat man 2 Höhlen mit Aragoniten entdeckt. Es handelt sich um die Aragonithöhle « Na stýdlych vodách » bei Svaty Jan pod Skalou und die Aragonithöhle in « Císarská rokle » bei Srbsko. Das Aragonit in unseren Karsthöhlen ist eine sehr seltsame Erscheinung, weil seine Entstehung ganz besondere Bedingungen erfordert. Nach den bisherigen praktischen und experimentalen Erfahrungen hat man festgestellt, dass unter normalen, in Höhlen vorherrschenden Bedingungen des Kalkkarbonat in Kalzit mit ditrigonal-skalenoedrischer Symmetrie krystallisiert. Durch das direkte Ausscheiden von Kalk aus der abtropfenden Wasserlösung bildet sich die Tropfensteinmasse, die als Stigmatit bezeichnet wird. Nach der Entstehungsart unterscheidet man verschiedene stalagmische und stalagmitische Formen, die eine allgemeine Erscheinung in Karsthöhlen darstellen.

In Ausnahmefällen, insbesondere wenn das Ausscheiden von CaCO_3 aus der Lösung von höheren Temperaturen begleitet ist oder wenn die Mutterlösung von anderen isomorphen Kationen z. B. Sr enthält, entsteht die Bildung des rhombischen Aragonits. In der Bestrebung dieses Problem abzuklären, hat man Proben angestellt und festgestellt, dass die Bildung von Aragonit bei Temperaturen über 30° oder aber bei niedrigeren Temperaturen unter Einwirkung von Strontium entsteht. Diese experimentalen Erkenntnisse sind im Einklang mit den wirklichen Verhältnissen in der Natur. Der

Mediante gli studi sistematici delle caverne del Carso Cecoslovacco, che sono stati effettuati dalla Sezione per il Carso della Corporazione di Scienze Naturali del Museo Nazionale di Praga, si sono scoperte due caverne di aragoniti.

Si tratta della caverna di aragonite " Na stydlych vodach " presso Svaty Jan pod Skalou e la caverna di aragonite "Cisarska rokle" presso Sbrsko. L'aragonite in tali caverne carsiche presenta uno strano fenomeno, perché la sua formazione richiede delle condizioni complete-mente speciali. Secondo le conoscenze attuali pratiche e sperimenta-li, si è constatato che nelle condizioni normalmente predominanti nel-le caverne il carbonato di calcio cristallizza con simmetria a scala ditrigonale. Mediante la separazione diretta del Ca dalla soluzione acquosa sgocciolante si forma la massa pietrosa di sgocciolamento, che viene indicata come stalagmite.

Dopo questa formazione naturale si distinguono diverse forme di stalitti e stalagmiti, che rappresentano un fenomeno generale nelle caverne carsiche. In casi di eccezione, in particolare se la separazione del carbonato di Ca avviene ad alta temperatura o quando la soluzione madre con-tiene per esempio Sr, si ha la formazione di aragonite rombica.

Nel tentativo di chiarire questo problema, si sono eseguite delle prove e si è constatato che la formazione di aragonite avviene a tempe-rature superiori a 30° o anche a temperature inferiori sotto l'in-fluenza dello Sr.

Questa constatazione dovuta agli esperimenti è in accordo con quanto avviene realmente in natura.

Il primo caso, nel quale la formazione di aragonite è accompagnata da temperature più alte, ci è resa nota dalle caverne di aragonite di Zbrasov.

Le caverne di Zbrasov sono la conseguenza della corrosione dovuta all'acqua alcalina minerale calda, che viene emessa in seguito ad un perturbamento tettonico molto forte, sulle pietre calcaree superficiali, presso Kurort Teplice nel Mahren .

Le caverne di aragonite di Bohmen sono state formate con pietra calcaree del periodo siluriano (sotto Koneprusy) e del periodo devo-niano (Zlichov) .

La posizione geologica e la morfologia di entrambe le caverne menzio-nate esclude qualsiasi influenza di sorgenti minerali calde in quel tempo in cui stava formandosi l'aragonite.

La formazione di aragonite in queste caverne avviene tramite la cristallizzazione di soluzioni fredde di $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. La cristallizzazione di aragoniti da soluzioni fredde avviene secondo F. SLAVIK in presenza di $\text{Sr}(\text{HCO}_3)_2$. Mediante deposizione del contenuto di CO_2 unita alla deposizione del bicarbonato, che avviene mediante emissione della soluzione da scale fitture capillari nella calce piétrificata, cristallizza la miscela di carbonato di Ca e Sr. Il SrCO_3 è isomorfitico in presenza di aragonite e costringe il CaCO_3 ad una simmetria rombica. Non è escluso che data la più bassa solubilità del SrCO_3 , questo cristallizzi prima del carbonato di Ca. Secondo J. KOBICE una parte del carbonato di Ca viene sciolto in 1600 parti di acqua, una parte di carbonato di Sr in 18.045 parti di acqua. Da prima cristallizza il SrCO_3 (in questo caso non come miscela isomorfitica) ma come stronzionato), si forma il centro di cristallizzazione perché si formi l'aragonite. Finora rimane non risolta la domanda, se il carbonato di Sr è contenuto nell'aragonite come miscela isomorfitica o se esso rappresenta i centri dei cristalli dell'aragonite. Io non considero definitivamente esclusa, la spiegazione della formazione di aragonite dietro l'infusso del catione di Sr. Questa opinione sia naturalmente da intendere come una ipotesi di lavoro, il cui compito è di promuovere una discussione sulla formazione di aragonite mediante cristallizzazione da soluzioni fredde. J. KASPAR per esempio, dopo aver presa visione del lavoro di J.F. MACDONALD (Mineralogist 41: 744-756) è stato di altra opinione. Secondo una sua dichiarazione, la cristallizzazione deve subire l'infusso di un anione finora non ancora ben determinato. Attualmente non si forma più aragonite nelle caverne menzionate, conseguentemente non è possibile determinare la composizione chimica della soluzione madre. La presenza di Sr in queste soluzioni viene indirettamente conosciuta mediante l'analisi delle pietre calcaree della zona o della fioritura di aragoniti. Nelle pietre calcaree e nelle aragoniti sono state constatate perfettamente notevoli parti di Sr tramite le ricerche chimiche classiche. A conferma dei nostri lavori riportiamo una tabella delle analisi sulle pietre calcaree, nelle quali si sono formate le caverne, così come delle aragoniti che si trovano nelle pareti delle caverne. Dalla tabella di analisi apprendiamo che le pietre calcaree, nelle quali si sono formate le due caverne, contengono in media 0,6 % di Sr prescindendo da altre miscele (SiO_2 , R_2O_3 , MgCO_3) e non precipitano parti di Ba, Ti, SO_4 e altri ancora, il cui contenuto oscilla nelle pietre calcaree.

Dalla tabella si può vedere che il contenuto di Sr nelle aragoniti è più alto che in qualsiasi altro calcare .
Nei cristalli puri di aragonite della caverna " Na stydlych vodach" il carbonato di stronzio raggiunge circa l'1% .
I cristalli di aragonite non pura della caverna "Cisarka rokle" presentano in sezione 0,7 % di SrCO₃ .
Questo ci porta alla supposizione che il rapporto tra CaO e SrO nella soluzione madre, dalla quale l'aragonite cristallizza, fosse più alto di SrO che nelle pietre calcaree stesse.

Descr. del campione	Umidità	Res. insol. SiO ₂	Complessivo	Resto R ₂ O ₃	CaCO ₃	SrCO ₃
1. Cristalli di arag. Stydle vody	0,06 %	2,20 %	99,09 %	0,91 % 1,44 %	92,80 %	0,97%
2. Pietra calc. Koneprusy St.v.o.	0,03 %	2,57 %	99,68 %	0,32 % 1,02 %	94,75 %	0,67%
3. Calcite viva St. vo.	0,30 %	7,90 %	99,07 %	0,83 % 4,84 %	84,15 %	0,61%
4. Calcare St. Vo.	0,08 %	3,83 %	99,20 %	0,79 % 1,96 %	91,90 %	0,54%
5. Aragonite con miscela St.v.o.	0,05 %	0,60 %	99,55 %	0,45 % 0,45 %	96,10 %	0,70%
6. Calcare di Zlichov, Cisarska rokle	0,20 %	3,53 %	99,93 %	0,07 % 3,16 %	90,10 %	0,74%

erste Fall, wo die Aragonitbildung bei höheren Temperaturen eingetreten ist, ist uns aus der Aragonithöhle von Zbrašov bekannt. Die Höhlen von Zbrašov sind die Folge der Korrosion durch das heisse alkalische Mineralwasser, das aus einer markanten tektonischen Störung in Oberdevonkalksteinen beim Kurort Teplice in Mähren ausströmt. Die Aragonithöhlen in Böhmen sind in Silurkalksteinen / die unteren von Koneprusy / und in Devonkalksteinen / Zlíčov / entwickelt worden. Die geologische Position und die Morphologie der beiden erwähnten Höhlen schliessen jedwede Einwirkung von warmen Mineralquellen aus in der Zeit wo in diesen Höhlen die Aragonitblüten entstanden. Die Entstehung von Aragonit in diesen Höhlen geschah durch die Kristallisierung aus kalten Lösungen $\text{Ca}/\text{HCO}_3/2$. Die Kristallisierung von Aragonit aus kalten Lösungen entsteht nach F. Slavík in Gegenwart von $\text{Sr}/\text{HCO}_3/2$. Bei Herabsetzung des Gehalts von CO_2 gebunden im Bikarbonat Herabsetzungen die beim Herausfließen der Lösung aus Kalpilarissen und Ritzen im Kalkgestein erfolgt, kristallisiert die Mischung von Ca- und Sr- Karbonaten. Der SrCO_3 ist isomorphistisch gegenüber Aragonit und zwingt CaCO_3 zur rhombischen Symmetrie. Es ist nicht ausgeschlossen, dass angesichts der geringeren Lösbarkeit von SrCO_3 , dieser kristallisiert vor dem CaCO_3 . Nach J. Koblíček ein Teil des CaCO_3 wird in 1600 Teilen Wasser aufgelöst, während ein Teil SrCO_3 in 18.045 Teilen Wasser.

Zuerst kristallisiert SrCO_3 / in diesem Falle nicht als isomorphitische Beimischung, sondern als rhombisches Strontionat /, bildet das Kristallisationszentrum, um das sich Aragonit bildet. Bisher blieb die Frage ungelöst, ob SrCO_3 im Aragonit als isomorphitische Beimischung enthalten ist oder aber ob er die Kristallzentren des Aragonits darstellt.

Ich betrachte nicht die Abklärung der Entstehung von Aragonit unter Einfluss des Sr-Kations als definitiv abgeschlossen. Die Ansicht sei als eine Arbeitshypothese aufzufassen, deren Aufgabe es ist, eine Diskussion über die Entstehung von Aragonit durch Kristallisierung aus kalten Lösungen zu fördern. J. Kašpar z. B., aufgrund der Arbeit von J. F. Mac Donald / Mineralogist 41: 744-756 /, ist einer anderen Meinung. Nach seiner Mitteilung soll die Kristallisierung von einem bisher noch nicht näher bestimmten Anion beeinflusst sein.

Gegenwärtig bildet sich kein Aragonit mehr in den erwähnten Höhlen, folglich ist es unmöglich, die chemische Komposition der Mutterlösungen zu ermitteln. Die Präsenz von Sr in diesen Lösungen wird indirekt durch Analysen der Kalksteine aus der Umgebung oder der Aragonitblüten selbst nachgewiesen.

In Kalksteinen und Aragoniten sind ziemlich bedeutende Teile von Strontium auf dem Wege von klassischen chemischen Untersuchungen festgestellt worden. Zu Unterstützung unserer Ausführungen geben wir eine Analysentabelle der Kalksteine, in welchen die Höhlen entwickelt sind sowie der sich auf den Höhlenwänden befindlichen Aragonitblüten an. Der Analysentabelle entnehmen wir, dass die Kalksteine, in welchen beide Höhlen entwickelt sind, durchschnittlich 0,6 % Strontium enthalten abgesehen von anderen Beimischungen / SiO_2 , R_2O_3 , MgCO_3 und nicht bestimmter Teile wie Ba, Ti, SO_4 u.a.m. / deren Gehalt in Kalksteinen schwankt.

Aus der Tabelle ist ferner ersichtlich, dass der Sr-Gehalt in Aragoniten höher liegt als jener in Kalksteinen. Bei reinen Aragonitkristallen aus der Höhle « Na stýdlych vodách » beträgt er beinahe 1 % SrCO_3 . Die verunreinigten Aragonitkristalle aus der Höhle in Císařská rokle » weisen im Durchschnitt 0,7 % SrCO_3 auf. Diese Tatsache führt uns zur Annahme dass das Verhältnis zwischen CaO und SrO in der Mutterlösung, aus welcher Aragonit kristallisierte, höher war zugunsten von SrO als bei den Kalksteinen selbst.

Beschreibung des Musters	Feucht- igkeit	Unlös- b. Rest u. SiO_2	Ins- gesamt	Rest	R_2O_3	CaCO_3	SrCO_3	MgCO_3
1. Aragonitkristall, Stýdlé vody . .	0,06 %	2,20 %	99,09 %	0,91 %	1,44 %	92,80 %	0,97 %	1,62 %
2. Kalkstein v. Ko- néprusy, Stýdle vody	0,03 %	2,57 %	99,68 %	0,32 %	1,02 %	94,75 %	0,67 %	0,64 %
3. Kalcsinter, Stýdlé vody . .	0,30 %	7,90 %	99,07 %	0,83 %	4,84 %	84,15 %	0,61 %	1,27 %
4. Kalkstein v. Ko- néprusy, Stýdle vody	0,08 %	3,83 %	99,20 %	0,79 %	1,96 %	91,90 %	0,54 %	0,89 %
5. Aragonit mit Kalzitbeimisch., Stýdlé vody . .	0,05 %	0,60 %	99,55 %	0,45 %	0,45 %	96,10 %	0,70 %	1,65 %
6. Kalkstein von Zlíčov, Císařská rokle	0,20 %	3,53 %	99,93 %	0,07 %	3,16 %	90,10 %	0,64 %	2,30 %

Presidente NANGERONI:

Ringrazio per la sua comunicazione il Dr. Skrivanek di Praga. Mi pare che il suo intervento sia paragonabile, per quanto riguarda l'argomento, a quello su cui aveva insistito il Dott. Cigna.

La parola al Dr. Bauer.

F. BAUER: Meine Damen und Herren,

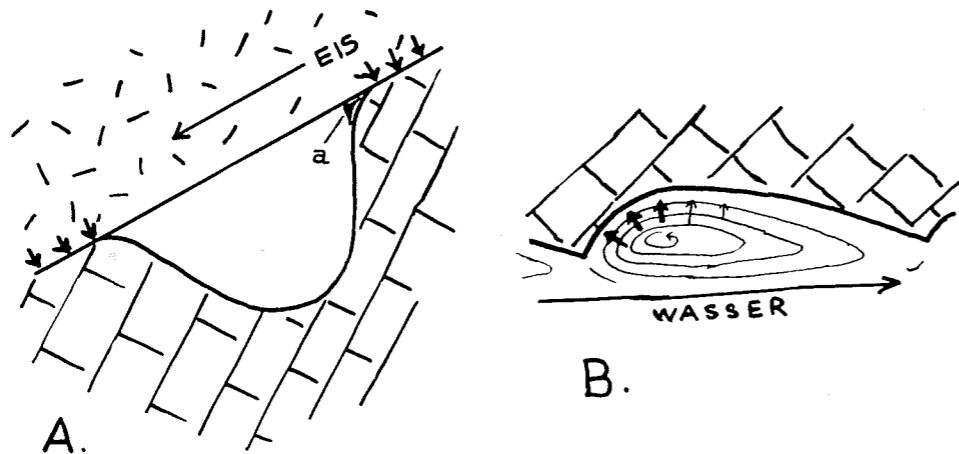
ich möchte zu dem Referat, in welchem die Rolle des hydrostatischen Druckes, bzw. des Wechsels des hydrostatischen Druckes bei der Lösung und Ausscheidung von Kalk erwähnt wurde, einige Bemerkungen machen.

Wir finden im Rückzugsbereich kalkalpiner Gletscher (wie im Dachsteingebiet) in den innerhalb der letzten Jahrzehnte eisfrei gewordenen Kalkflächen Reste von alten Karrenformen. Nähere Untersuchungen, auf welche hier nicht eingegangen werden kann, ergaben, dass das Gletschereis über die Karrenrinnen hinwegfloss, ohne in die Tiefe der Rinnen einzudringen. Es muss daher beim Ueberfließen durch das Eis an den Rändern der Rinnen (Punkt a) eine Druckverminderung an der Eisunterkante eingetreten sein. An diesen Stellen, und nur an diesen, ist es zur Bildung von feinkörnigen Kalkabsätzen durch Kalkausscheidung gekommen. Der Kohlensäuregehalt des Eises muss jedoch hier überall gleich gewesen sein, da eine Kohlensäurezufuhr oder -abfuhr nicht möglich gewesen ist. Es können daher an diesen Stellen die Druckänderungen bei der Kalkausscheidung eine Rolle gespielt haben. An jenen Stellen, wo das Eis über den Kalkmels floss, muss an der Sohle des Eises unter grösserem Druck eine Lösung stattgefunden haben, während im Augenblick des Erreichens des Rinnenrandes eine Kalkausscheidung (unter Druckverminderung an der Eissohle) stattgefunden hat (siehe Skizze A).

Ein zweiter Fragenkreis ist der der Bildung von Fazetten durch fließendes Wasser an den Höhlenwänden, die durch ihre Orientierung immer auf die Fließrichtung des Wasser rückschliessen lassen. Der steilere Rand der Vertiefungen ist stets auf der

Seite, von welcher das Wasser kommt, während der flachere Rand immer in der Richtung des Wasserabflusses liegt. Diese Fazetten finden wir jedoch nicht nur an Höhlenboden und Wänden, wo wir die mechanische Erosionswirkung der vom Wasser mitgeführten Sande etc. annehmen können, sondern auch an der Decke von Höhlen (z. B. in Niaux). In den Vertiefungen dieser Fazetten bildet sich beim Darüberströmen von Wasser stets ein Wirbel, dessen Zentrum immer an der Herkunftsseite des Wassers liegt. Die in diesen Wirbeln wirksame Zentrifugalkraft bewirkt damit an den an der Zuflusseite des strömenden Wassers liegenden Rändern der Fazetten eine Druckerhöhung. Diese könnte unter Umständen dazu beitragen, dass dort eine erhöhte Lösung des Kalkes erfolgt (siehe Skizze B).

Ich wollte diese Bemerkung im Anschluss an jenes Referat zur Diskussion stellen. Meines Wissens nach sind über die Gleichgewichtsbedingungen der in Wasser gelösten Kohlensäure unter verschiedenen Drucken noch keine Untersuchungen durchgeführt worden. Dies wäre jedoch im Hinblick auf die unter Umständen damit verbundenen Änderungen der Lösungsfähigkeit von Kalk von Bedeutung.



Presidente NANGERONI:

Anche l'intervento del Dr. Bauer ci ha rilevato particolari interessanti; nel ringraziarlo, dò la parola nuovamente al Dr. Boegli.

A. BOEGLI: Das Wasser, das sich unter dem Drucke des Eises bildet, ist imstande Kalk aufzulösen. Bei Druckentlastung wird es durch Regelation wieder zu Eis. Beim Uebergang des Wassers in die feste Phase sinkt die Löslichkeit des Kalkes schlagartig, und er wird ausgeschieden. An sich ist zu erwarten, dass dieser neugebildete Kalk mitgeschleppt wird. Ohne genauere Kenntnis der Umstände ist jedoch ein Entscheid darüber, warum der Kalk doch liegen blieb, nicht zu fällen. Nähere Untersuchungen hierüber wären angezeigt.

Presidente NANGERONI:

Non essendovi altre richieste d'intervento, se permettete, prima di lasciarci vorrei rileggere le disposizioni che riguardano appunto gli interventi. I sei relatori ufficiali tratteranno gli argomenti di cui al tema prefissato, e lo svolgimento di questo tema

rappresenterà l'introduzione per la discussione sullo stesso problema. Tutti potranno prendere la parola unicamente sull'argomento trattato, prenotandosi al termine di ogni relazione. Eventuali comunicazioni scritte dei singoli partecipanti al Simposium saranno pubblicate negli atti, purchè vengano consegnate alla segreteria prima della chiusura del Simposium. Purtroppo, per ristrettezza di tempo, non è possibile darne lettura nel corso dei lavori del Simposium, come già annunciato nelle circolari. Nella seduta conclusiva di Villa Olmo a Como, il giorno 6 ottobre, ciascun relatore concluderà l'argomento, riassumendo la propria relazione e ciò che è stato oggetto di discussione. Vi ringrazio e dichiaro chiusa la prima seduta del nostro Simposio.

S E C O N D A S E D U T A

Pomeriggio del 3 Ottobre 1960 in VARENNA

PRESIDENTE : Bernard Gèze

RELATORE UFFICIALE : Philippe Renault

Presidente GÈZE :

Monsieur le Président Nangeroni m'a demandé de présider cet après-midi notre séance de travail. Je le remercie vivement de l'honneur qu'il m'a fait en m'appelant à cette table et je remercie également Messieurs Abel et Leander Tell, qui ont bien voulu venir m'assister.

Avant de passer la parole au rapporteur de cet après-midi, M. Philippe Renault, je m'excuse de vous faire part d'une observation au sujet de l'aragonite. J'aurais dû la faire ce matin, mais j'y avais renoncé en raison de la limitation de notre temps.

Ainsi que cela vous a été dit, il est bien exact que l'aragonite se dépose dans des conditions aisées avec une haute température. On le sait, puisque tous les pisolithes qui se forment dans les sources thermales sont en aragonite. C'est une observation classique, bien connue depuis très longtemps. Donc il n'est pas question de nier la possibilité de l'intervention de hautes températures.

En ce qui concerne le rôle du strontium, dont on vous a parlé, on doit, peut-être, se montrer plus réservé, en ce sens que, partout où il y a du calcium dans la nature, il y a également du strontium. Beaucoup d'entre vous doivent savoir qu'à l'heure actuelle on est en train de mettre au point une méthode basée sur les rapports isotopiques calcium sur strontium, qui permettrait de dater tous les sédiments calcaires. Il est vraisemblable que, dans l'avenir, on arrivera à pouvoir préciser par cette méthode entre autres, l'âge des concrétions: beaucoup de discussions que nous aurons dans les jours suivants deviendront ainsi sans objet.

Si je fais une petite remarque dans ce sens-là c'est parce que je crois qu'actuellement le problème de la genèse de l'aragonite dans les cavernes n'est plus un problème. Je précise que Mlle POBEGUIN réalise dans son laboratoire du Muséum d'Histoire naturelle de Paris, à la température normale et à volonté, soit de la calcite, soit de l'aragonite, soit même de la vatérite (troisième variété de carbonate de calcium, que l'on n'a pas, jusqu'à maintenant, trouvée dans les cavernes). C'est uniquement une question de sursaturation des solutions carbonatées, donc de vitesse d'évaporation. Une évaporation lente permet le dépôt de calcite; une évaporation un peu plus rapide, qui se produira, par exemple, si on laisse une fenêtre ouverte, donne de l'aragonite; si l'on provoque une évaporation encore plus rapide, avec un courant d'air dirigé, on obtient de la vatérite.

Il est exact qu'il se trouve des grottes où il y a beaucoup d'aragonite et des grottes où il y a beaucoup de calcite, mais il est presque certain qu'on découvrira, en cherchant soigneusement, de l'aragonite en beaucoup plus de points que ce que l'on a cru jusqu'à maintenant: il suffira de rechercher les endroits où l'évaporation étant rapide il a pu y avoir sursaturation avant apparition des premiers cristaux.

En m'excusant encore de cette observation personnelle hors programme, je donne maintenant la parole à M. Philippe Renault, Attaché de recherches au Laboratoire souterrain du Centre National de la Recherche Scientifique à Moulis (Ariège), qui va nous traiter les problèmes physiques, en relation avec les remplissages naturels des grottes.

PHILIPPE RENAULT
(Moulis (Ariège), Laboratoire souterrain du
Centre National de la Recherche Scientifique)

PROBLÈMES PHYSIQUES EN RELATION AVEC LES REMPLISSAGES NATURELS DES GROTTES

Résumé

Les facteurs physiques intervenant pour déterminer ou orienter le colmatage d'un réseau karstique peuvent être envisagés selon quatre points de vue:

1. - Facteurs déterminant la genèse des sédiments:
 - déséquilibres de voûte et gravité: éboulements,
 - façonnement hydrodynamique des galets et des éléments mobilisés par les circulations aquifères,
 - transport : dépôt de sables, limons, et argiles.
2. - Rapports existant entre le colmatage et le creusement d'un réseau:
 - liaison existant entre processus de creusement et dépôt de certains sédiments,
 - orientation du creusement par un remplissage antérieur,
 - creusement effectué par l'intermédiaire du remplissage.
3. - Zones et milieux de sédimentation :
 - zones longitudinales,
 - étagements verticaux.
4. - Le point de vue stratigraphique: colmatages et remaniements,
 - remaniements par les eaux courantes, par solifluction et par action du vide,
 - localisation du colmatage dans un réseau,
 - le paléokarst, terme ultime de l'évolution d'un réseau.

— I —

INTRODUCTION

La sédimentation en caverne est soumise à un ensemble de facteurs parmi lesquels il est classique de distinguer processus physiques et processus chimiques.

Certains auteurs groupent à part les sédiments qui dérivent d'actions biologiques, mais parmi celles-ci il est possible de distinguer des actions biologiques de nature chimique (Ex: concentrations de phosphates) et des actions biologiques de nature physique (Ex: charniers).

Formulons une remarque préliminaire: dans les phénomènes de sédimentation souterraine — de même que dans les phénomènes de creusement — il y a interaction parfois poussée entre phénomène physique et phénomène chimique. Un dépôt d'origine chimique peut subir des remaniements d'origine physique aboutissant à la formation d'un nouveau sédiment. L'inverse est également possible. Toute classification est obligatoirement un schéma plus ou moins artificiel.

L'interaction des facteurs physiques et de la sédimentation en caverne peut être envisagée de plusieurs façons:

- la *genèse d'un dépôt*, ce dépôt étant considéré comme une entité,
- les *rapports existant entre ce dépôt et le creusement*,
- si des éléments morphologiques interviennent sans qu'il y ait interaction directe avec le creusement il convient d'analyser en outre la *localisation des sédiments à l'intérieur du réseau* pour un régime climatique donné ce qui conduit à distinguer des zones et des milieux de sédimentation,
- la combinaison des éléments de cette analyse ponctuelle pour l'ensemble du réseau, et compte tenu des enchaînements dans le temps, se traduit par la notion de

fossilisation plus ou moins avancée du réseau. C'est le *point de vue du stratigraphe* qui doit tenir compte des facteurs antagonistes, c'est à dire des mécanismes de remaniement.

Ce cadre est extrêmement vaste et dans la suite de cet exposé nous nous contenterons de définir les grandes lignes du sujet en ajoutant quelques notations portant sur certains points que nous connaissons plus particulièrement.

— II —

GENÈSE DES SÉDIMENTS DÉTRITIQUES DE CAVERNE

Nous distinguerons trois groupes de sédiments détritiques de caverne: les dépôts clastiques provenant d'effondrements, les galets ou blocs façonnés par un mécanisme hydrodynamique, et les sédiments fins (sable, limons et argile) dont le dépôt résulte d'un tri par un agent de transport.

1° *Eboulis et phénomènes d'effondrement:*

Les mécanismes élémentaires d'effondrement se ramènent principalement à deux types: le premier que nous avons baptisé *affaissement dissolution* (Renault - 1957) où prédominent les actions chimiques, le deuxième étant l'*éboulement* où prédominent les actions mécaniques.



Figure 1 - Section de la galerie de la perte du Planiol de la Plagne (Ariège), montrant un bloc d'affaissement-dissolution suspendu à mi hauteur.

L'affaissement dissolution (solutional subsidence) est un phénomène constitué par la diminution de volume d'un bloc — qu'il s'agisse d'un massif de roche en place isolé de tous côtés par un système de fissures ou d'un bloc transporté ou isolé au milieu d'un sédiment — baigné ou lessivé par un liquide corrodant. Ce processus explique la présence de blocs arrondis, parfois de plusieurs mètres d'arêtes, coincés à mi — hauteur d'une galerie en canon. Il explique de la même façon la présence de blocs massifs, arrondis, dans un élargissement de galerie ou dans une niche de paroi présentant un orifice d'accès de section inférieure à la section du bloc. Ce mécanisme contrôle de nombreux phénomènes: évolution des blocs enfouis dans un sédiment meuble, tassement des éboulis, genèse de certaines formes souterraines, etc...; il est plus répandu qu'il ne paraît au premier abord (1).

L'éboulement, c'est à dire la chute d'un bloc ou d'un paquet de blocs non soutenus par les épontes, est mieux connu (Davies, Montoriol-Pous, Renault). Le mécanisme, qui relève de la résistance des matériaux, se ramène à une modification des contraintes à l'intérieur de la roche au voisinage de la paroi éboulée. Cette variation d'équilibre de la voûte est:

— préparée par les *facteurs structuraux*: résistance mécanique de la roche, épaisseur plus ou moins grande des bancs, intercalation de niveaux argileux, densité des diaclases, et les *facteurs évolutifs*: plus ou moins grande portée de la voûte,

— déterminée par les *facteurs géophysiques*: tensions tectoniques, séismes, onde de choc provenant d'un éboulement massif dans le voisinage, *climatiques*: gel, déchaussement des blocs par les racines, par affaissement dissolution, auxquels il faut joindre certains facteurs *hydrodynamiques*: charges de crues, pressions de voûte en décrue.

La variété de ces facteurs explique la variété des types d'éboulis allant du chaos formé par un empilement de gros blocs de plusieurs mètres d'arête jusqu'aux petits éclats issus de la paroi et dispersés dans un dépôt de granulométrie fine (sable ou argile). Les travaux récents distinguent les principaux types suivants:

a) Les *éboulements mécaniques* (dépôts graviclastiques de Montoriol-Pous) produisant un talus formés de blocs très anguleux, non corrodés, disposés en désordre sous une voûte, parfois lisse (surface d'un joint de stratification ou d'une diaclase), le plus souvent anguleuse, formée d'éléments plans se recoupant avec des angles nets. Le processus de formation est purement mécanique la chute des blocs étant déterminée par une détente de la roche encaissante lorsque la voûte dépasse une certaine portée, à la suite d'un épisode de gélifraction, etc... Les éboulements mécaniques sont un phénomène de climat froid.

b) Les *éboulements chimiques* (dépôts chimoclastiques de Montoriol-Pous) donnent des talus formés de blocs corrodés disposés anarchiquement sous une voûte parabolique avec arêtes arrondies. Dans ce cas la détente de la voûte résulte d'une déconsolidation des blocs par affaissement dissolution.

La détection et l'interprétation de ces deux types, simples, est facile. D'autres cas, dont l'analyse sera plus délicate, peuvent être rencontrés à l'intérieur d'un réseau karstique.

c) La *genèse des grandes salles* (dépôts glyptoclastiques de Montoriol-Pous) implique l'enchaînement de plusieurs processus clastiques différents. Ces processus entraîneront une disposition particulière des accumulations clastiques.

Rappelons que l'on désigne généralement par « grande salle » un élargissement notable du réseau de conduits, fréquemment excentré par rapport à l'axe de la galerie principale et se localisant le plus souvent au croisement d'un ensemble de puits ou de galeries. L'interprétation génétique la plus logique est de considérer la salle comme

(1) Voir étude détaillée dans Renault (Ph.) - 1957 - Sur deux processus d'effondrement karstique. *Annales de Spéléologie*, XII, 19-46.

déterminée par une fissuration localement plus serrée, ce qui implique un creusement par effondrement. Au premier stade de creusement (régime noyé) l'affaissement dissolution sera prédominant dans beaucoup de cas (2).

La disposition du système morphogénétique en cours d'évolution variera suivant les cas. Montoriol-Pous distingue:

— la salle préfigurée par le croisement d'un certain nombre de conduits situés à des niveaux différents; les parois disparaissent par recoupement, les planchers s'effondrent et les divers conduits se confondent en une cavité unique, les blocs résiduels s'accumulant en talus de blocs anguleux ou corrodés *sous une voûte conservant des marques d'érosion* (3) et ne présentant pas le caractère anguleux des voûtes façonnées par éboulement (dépôts glyptoclastiques polyréticulaires).

— le labyrinthe de conduits se localise dans un seul banc; l'élargissement des conduits et le recoupement des parois aboutira à la formation de salles très larges dont la hauteur est à peine supérieure à celle des galeries initiales, l'équilibre de la voûte étant conservé par des piliers correspondant aux anciens massifs rocheux séparant les galeries; l'érosion se poursuivant les piliers disparaîtront et la voûte s'effondrera, les *blocs de la partie inférieure de l'éboulis portant les marques d'érosion* (4) qui, dans le cas précédent, demeuraient en place à la voûte (dépôts glyptoclastiques monoréticulaires).

Cette analyse des éboulis a le mérite de situer les accumulations de blocs dans leur cadre morphologique, mais cet exposé demeurerait très incomplet si nous l'arrêtons ici. Depuis quelques années des méthodes précises, à base statistique, ont été créées et permettent une analyse détaillée des remplissages de blocs. Enumérons ces méthodes, sur lesquelles il est inutile de s'étendre, de nombreux ouvrages leurs ayant été consacré (5):

- granulométrie: liée à la structure de la roche encaissante, aux facteurs climatiques, à la répartition des tensions dans la zone d'effondrement, aux migrations de blocs,
- pétrographie des blocs,
- morphoscopie des blocs,
- caractères de surface des blocs: états de surface (lustrage, enduits, etc...) et accidents de surface (craquelures de gel, empreintes de racines, vermiculures, cupules, etc...),
- disposition des blocs: à l'échelle du bloc (pente et orientation) et à l'échelle du dépôt (empilements anarchique et ordonné, stratification, etc...),
- cimentation.

Ces méthodes offrent de larges possibilités. Elles ont été utilisées par les pétrographes opérant sur les coupes des champs de fouilles préhistoriques (Bonifay, Chavaillon-Dutrievoz, Lais, etc...) c'est à dire dans la région d'entrée des grottes, mais rarement dans les parties profondes des cavernes.

2° Façonnement des galets:

Les mécanismes hydrodynamiques exercent leur action sur certains blocs issus des éboulis karstiques — qu'il s'agisse d'éboulis en milieu sec dont les éléments sont repris par une circulation aquifère ou bien d'éboulements concomitants à cette circulation: (« démolition » ou éboulements par les chocs du matériel transporté, ondes de choc des

(2) Le même processus peut être envisagé pour expliquer le creusement des puits; dans ce cas particulier Bretz (Caves of Missouri, *Missouri géol. survey*, 1956) considère comme spécialement actif le surcreusement aux limites des blocs délimités par des fissures; si l'on admet que ce surcreusement s'effectue principalement par dissolution, le mécanisme paraît très proche de l'affaissement-dissolution défini plus haut.

(3) Voûte arrondie, accidentée de coupoles, lapiaz inverses, etc...

(4) Ce dernier caractère n'a pas une valeur générale d'interprétation; la base du vide occupé par l'éboulis peut être parcourue par un ruisseau qui façonnera les blocs inférieurs [observé dans la grotte de Peillot (Ariège, France)].

(5) Voir par exemple Cailleux (A.) et Tricart (J.) - 1959 - Initiation à l'étude des sables et des galets (SEDES éd., Paris, 772 p.), Bonifay (E.) - 1956 - Les sédiments détritiques grossiers dans les remplissages de grottes (*Anthrop.*, Paris, t. 60, n. 5-6, p. 447-461), Bonifay (E.) - thèse, etc...

crues, détentes de décroes) — aussi bien que sur les éléments grossiers exogènes (quartz, granite, etc...). Les processus de façonnement étant les mêmes dans tous les cas nous examinerons dans le même chapitre le façonnement des blocs ayant l'une ou l'autre de ces origines.

Les possibilités de façonnement hydrique s'exercent sur les gros blocs aussi bien que sur les sables jusqu'à la dimension 0,3-0,1 mm; audessous de cette dimension la pellicule d'eau adsorbée autour du grain rend pratiquement nul le façonnement. Le façonnement du sable en caverne commence à être connu (acquisition d'une morphoscopie ovoïde luisante en marmite de géant — Tricart et Cailleux); dans le cadre limité de cet exposé nous nous limiterons à cette mention.

Il faut mentionner également les galets d'argile, beaucoup plus répandus qu'il ne semble au premier abord et qui correspondent à l'érosion d'une formation argileuse traversée par des fentes de retrait et qui est remaniée par un écoulement rapide.

* * *

Nous insisterons sur la granulométrie et la morphoscopie des galets de caverne. La granulométrie, liée à la compétence du courant sera très variable. Des galets, parfaitement arrondis, de 1 m de grand axe, sont connus à la grotte de Lombrive (Ariège, France) par exemple.

Les variations granulométriques le long d'un cours d'eau souterrain, en particulier si l'on considère les plus gros éléments rencontrés, permettent d'évaluer la capacité de triage et d'usure d'un courant. La méthode du pénécintile de J. Tricart donne une plus grande rigueur statistique à cette évaluation.

Nous avons appliqué cette méthode à l'étude du remplissage de la rivière souterraine du Saut de la Pucelle (Lot). Il s'agit d'une perte absorbant un ruisseau aérien, dont on peut suivre sous terre le cours torrentiel jusqu'au siphon terminal à 2 800 m de l'entrée. La perte se localise au contact des marnes liasiques et des calcaires jurassique moyen ce qui garantit l'unité d'alimentation du remplissage. Le lit est formé de galets calcaires; la surface patinée de ces galets montre que, à l'heure actuelle, l'alimentation par éboulements de parois est, sinon arrêtée, du moins très réduit.

Nous avons trouvé les valeurs suivantes:

Distance à l'entrée	Ln du plus gros bloc	Médiane des 10 plus gros blocs	Médiane des 20 plus gros blocs
85 m	Ln = 70 cm	L = 37,5	L = 28,5
110 m	Ln = 18 cm	L = 14,5	L = 13,0
1 570 m	Ln = 14 cm	L = 8,7	L = 7,5
2 800 m	Ln = 8 cm	L = 7,5	L = 6,0

La station I (85 m) formée de blocs anguleux est très hétérométrique, mais le classement est rapide puisque à 110 m les blocs toujours anguleux ne montrent plus qu'un écart de 5 cm entre le centile et les blocs de rang 20. A partir de ce point le classement peut être considéré comme effectué, l'écart entre le centile et les blocs de rang 20 oscillant entre 6 et 7 cm. A 2.800 m l'écart entre pénécintile et galet de rang 20 est légèrement supérieur à 2, ce qui est un caractère torrentiel.

La nature pétrographique des blocs intervient évidemment dans ce processus de réduction: les galets de quartz nécessiteront évidemment un très long parcours pour subir une réduction de taille, les galets de granite évoluent plus vite, s'arénisant et se transformant par disjonction des minéraux altérés.

La morphoscopie, très étudiée pour les dépôts aériens, a fait l'objet de quelques recherches concernant les galets de cavernes. Parmi les diverses méthodes proposées, nous utiliserons la méthode Cailleux (6) qui définit, en particulier, un indice d'aplatissement et un indice d'émoissé.

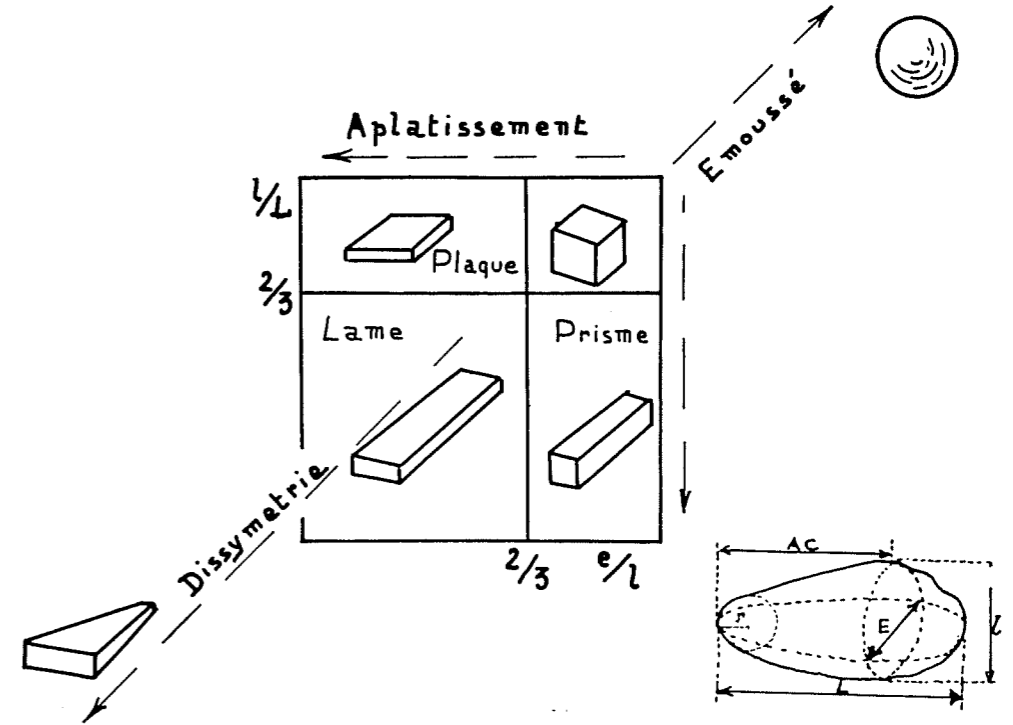


Figure 2 - Morphoscopie des blocs- Tableau synthétique des dénominations classiques d'après les rapports largeur/longueur et épaisseur/largeur. Mentions de deux formes particulières: sphère et polyèdre. Rapports de ces formes avec les indices morphométriques: en bas à droite: paramètres permettant le calcul des indices L, I, E, AC. Indices: Aplatissement: $\frac{L + I}{2E}$ Emoussé: $\frac{2r}{L}$ Dissymétrie: $\frac{AC}{L}$

Ces indices numériques permettent de suivre l'évolution d'un fragment de roche initialement anguleux. En milieu sec par corrosion, passage animal, etc... les blocs peuvent acquérir un léger émoissé. Les gouttes d'eau tombant toujours au même endroit sur le sol arrondissent les blocs sous-jacent qui arrivent à prendre un émoissé appréciable (Bonifay).

Soumis à l'action des eaux courantes, deux types d'évolution morphoscopique des blocs (Corbel) sont à considérer:

a) Entraînés par une rivière souterraine, l'aplatissement augmente et simultanément l'émoissé se développe. Les mesures que nous avons faites dans la rivière souterraine du Saut de la Pucelle sont très parlantes à cet égard. Il est bien connu que l'évolution des galets obéit à une loi exponentielle: l'émoissé est acquis rapidement dès les premiers kilomètres, puis tend vers une valeur stable.

(6) Tricart et Cailleux - Introduction à l'étude des... galets, op. cit.

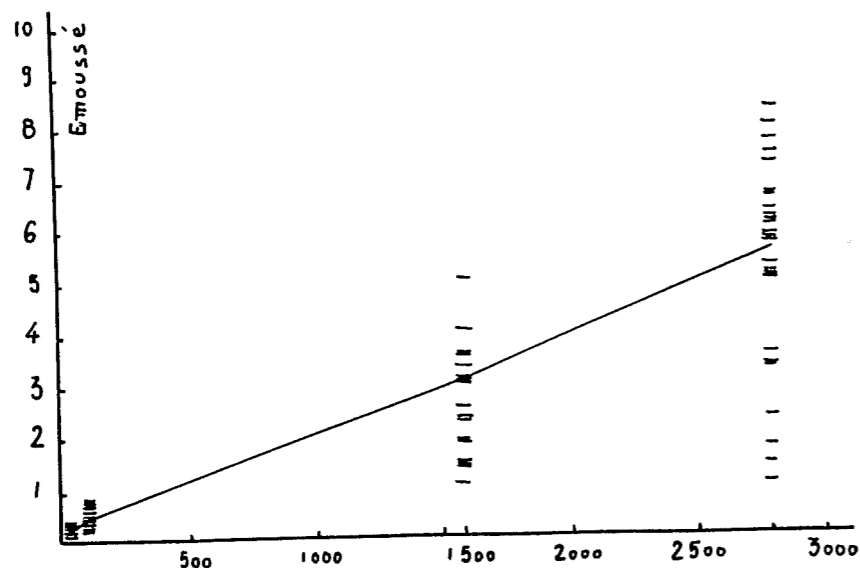


Figure 3 - Variation de l'indice d'émoissé, en ordonnées, par rapport à la distance à l'entrée, en abscisses, de la rivière souterraine du Saut de la Pucelle (Lot). Les tirets horizontaux correspondent aux différents indices mesurés dans chaque station; le trait presque rectiligne relie les médianes des spectres d'indice correspondant à chaque station.

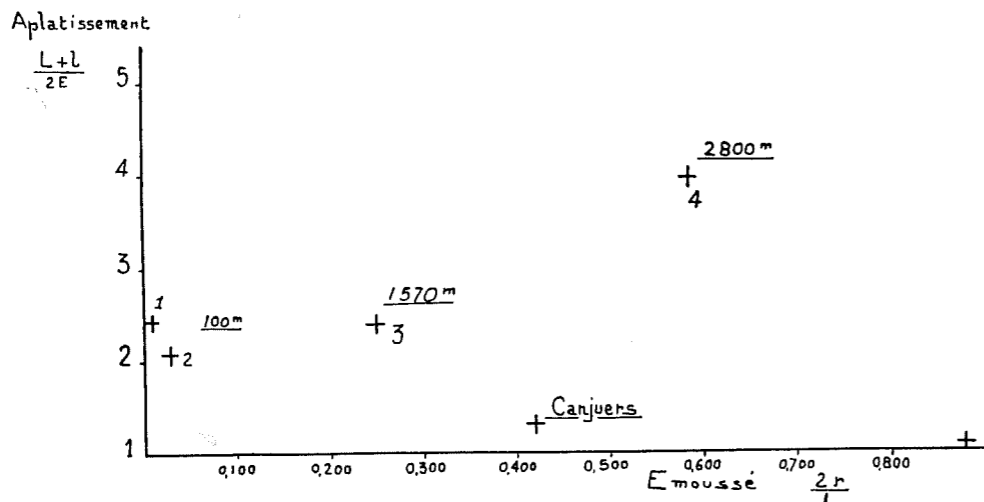


Figure 4 - Corrélation émoissé-aplatissement (J. Tricart, p. 266). Les points 1, 2, 3, 4 caractérisent les indices des stations de la rivière souterraine du Saut de la Pucelle. Le point « Canjuers » correspond aux mesures des galets de la Bétonnière du Grand Aven de Canjuers, mentionné dans les Conclusions de la séance « Phénomènes physiques en relation avec les remplissages de grotte ».

b) En d'autres points d'un réseau les galets évolueront sur place: en région de cascades, dans les marmites de géant ou bien dans certains conduits remontant, partiellement colmatés par les galets, et parcourus par un écoulement rapide. Les galets tendent alors vers une forme sphérique et dans certain cas se présentent comme une sphère parfaite, cette forme se rencontrant uniquement en caverne. Le gisement type peut être situé au Trou du Drac (S. E. de la France).

Enfin un mot sur les pseudo-galets: certains bancs, par exemple le Coniacien dans la grotte du Pech d'Azé (Dordogne, France) a tendance à se déliter en boule sur les parois. Cet arrondi pourra se régulariser par dissolution et le remplissage paraîtra contenir de vrais galets. Certains cherts pourront prendre la même apparence. Un examen des parois encaissantes permettra d'éviter toute erreur.

3° Sables, limons et argile:

Dans ce chapitre nous envisagerons uniquement les matériaux mobilisés par un agent hydrique, laissant de côté le transport éolien, très limité en caverne.

Les sédiments détritiques fins se subdivisent granulométriquement en sables de 2 à 0,02 mm, limons de 0,02 à 0,002 et argiles au dessous de 0,002 mm. Si l'on envisage la représentation granulométrique de ces dépôts souterrains, de nombreux procédés s'offrent à nous: histogrammes, courbes cumulatives, etc... (Tricart et Cailleux). Mentionnons plus particulièrement les courbes canoniques (notion de faciès granulométrique de A. Rivière) déduites de la courbe cumulative semilogarithmique d'un sédiment clastique. La comparaison des courbes de différents sédiments permet de distinguer plusieurs faciès:

- faciès linéaire: sédiment non évolué,
- faciès parabolique: intermédiaire entre le cas précédent et le cas suivant,
- faciès logarithmique: évolution par transport très avancée (dépôt par excès de charge par de la diminution de compétence du véhicule),
- faciès hyperbolique: décantation.

Ce principe a été appliqué par Tomballe et Dor aux dépôts de la grotte d'Esneux et montre, dans ce cas, à la base d'un niveau limoneux, un faciès parabolique dénotant une action locale de délitage, et au sommet du même niveau, un faciès logarithmique impliquant un triage par transport. Cette méthode, apportant un critère net de l'intensité des actions de ségrégation, paraît riche en possibilités.

Chacune des phases citées plus haut possède des propriétés spéciales. Rappelons que les blocs étudiés dans le chapitre précédent sont formés de roche et non de minéraux et possèdent les propriétés hydrodynamiques des roches perméables en grand; par contraste les éléments des fractions fines sont formés de minéraux isolés et présentent des propriétés particulières au point de vue perméabilité, transport et caractères physico-chimiques.

Dans la nature les sables sont principalement formés de quartz; dans le cas particulier des cavernes leur composition pourra être plus variée. Nous distinguerons:

a) Les sables quartzeux épigés — Ces derniers faciles à identifier comme le montre, par exemple, l'analyse par H. Tintant des sables de la grotte de Bèze, près de Dijon, dérivant des sables albiens sus-jacents.

Nous rangerons dans le même type l'arène grossière colmatant les grottes de Quer Blanc près d'Alos et provenant du lessivage, par un ruisseau disparaissant sous terre, des produits de décomposition du massif granitique formant son bassin d'alimentation.

b) Les sables quartzeux endogènes — Ceux ci proviennent de la décomposition de la roche encaissante lorsqu'il s'agit d'un calcaire gréseux ou d'un grès calcaire.

c) Les sables dolomitiques — La décomposition de la dolomie aboutit à la formation d'un sable formé de granules irréguliers, parfois à contours rhomboédriques. Le remplissage alluvial des grottes creusées dans cette roche sera principalement formé de ce sable (grotte de Moulis, Ariège). Dans certains conduits, mal aérés, le caractère fétide de la roche encaissante se retrouve dans le remplissage sableux.

d) Les sables calcaires — Il arrive que, localement, s'observe dans les grottes une poussière calcaire, de granulométrie sableuse, qui, examinée au microscope, se montre formée de grains de calcite.

Ce dépôt pourra provenir de l'attaque mécanique de concrétions; dans d'autres cas il dérivera de plaques de calcite flottante entraînées par un léger courant. J. Petrochilos

a signalé que des sables de ce type étaient susceptibles de se former par concrétionnement direct dans une vasque suivant un mécanisme analogue à celui qui préside à la genèse des pisolithes.

A ce sujet il faut signaler l'existence, rare il est vrai, de *calcarénites*, grès formés de grains de calcite, plus ou moins bien cimentés par le calcaire et colmatant certains conduits. Tous les gisements où nous l'avons observé montrent qu'il s'agit d'un dépôt ancien.

Citons quelques exemples: A l'intérieur de plusieurs poches recoupées par les moyennes gorges du Verdon (Baudinard, Var) ces calcarénites s'observent disposées en lits ayant subis des compressions marquées par des microplissements et de petites failles inverses. Il s'agirait d'un paléo-karst antérieur à la dernière déformation tectonique et qui *pourrait* être Miocène.

Dans la grotte de Montclar (Lot) la calcarénite constitue un placage à la voûte d'une galerie supérieure. Dans le réseau de la grotte de Moulis (Ariège) ce dépôt colmate une salle isolée dont la base est recoupée par la galerie principale de la grotte.

Nous interprétons ce dépôt particulier comme témoignant d'un ancien régime correspondant à un climat plus chaud qu'actuellement.

* * *

Le sable est facilement mobilisé par le courant, le transport s'effectue principalement par roulage pour une vitesse d'écoulement relativement faible; en suspension, au delà d'une certaine vitesse (régime de turbulence moyenne), pour une taille donnée. Un grain de 1 mm sera entraîné en suspension par un courant de 80 cm/sec (valeur fournie à titre indicatif, et faisant abstraction des lois complexes réglant le débit solide des écoulements), chiffre utile à connaître lorsque l'on envisage le rôle des suspensions sableuses dans les phénomènes d'érosion mécanique.

Donnons quelques renseignements sur les moyens dont dispose le pétrographe pour caractériser un sédiment sableux:

- a) — la granulométrie,
- b) la minéralogie, et en particulier le comptage des minéraux lourds permettant d'établir des corrélations entre niveaux aériens et souterrains, de délimiter un bassin d'alimentation, d'établir l'origine endogène d'un sable par comparaison avec les insolubles de la roche encaissante, etc...
- c) la morphoscopie, ou caractères de la surface des grains et de leur forme, suivant les techniques mises au point par Wadell, Cailleux et plus récemment Tricart.
- d) La texture ou disposition des grains du sédiment figé avec une résine ou par un autre procédé est susceptible d'apporter des renseignements complémentaires sur le mode de dépôt, mais à notre connaissance cette technique n'a jamais été appliquée à un sédiment souterrain.
- e) La stratification par contre doit toujours être analysée; de nombreux travaux, russes en particulier (Strakhov), fournissent les éléments méthodologiques nécessaires. En rapport avec les stratifications il faut mentionner les rides (ripple-marks) accidentant la surface des sédiments sableux. Celles-ci peuvent éventuellement renseigner sur le sens de l'écoulement et sur sa vitesse (8).
- f) Comme dans le cas des galets, les variations de l'indice de élasticité (Carozzi), diamètre maximum des grains d'une nature minéralogique donnée renseigneront sur les valeurs et les variations du régime d'écoulement à l'intérieur d'un réseau.
- g) Enfin la couleur du sédiment ou des grains, l'existence d'enduits permettent de préciser les caractères chimiques du dépôt.

* * *

Les limons sont formés de minéraux variés; leur adhésion à sec est notable; ils peuvent former des boues thixotropiques; leur transport s'effectue en suspension, même pour de faibles vitesses; la perméabilité est faible; les particules sont capables d'adsorber des ions et des molécules; la coagulation est possible par les électrolytes sans formation d'hydrogels; l'indice de plasticité est grand (Bourcart).

Beaucoup de limons sont constitués en grande partie de sables fins (sablon). Par ailleurs leur association presque permanente avec des liants à grain plus fin entraîne le plus souvent des propriétés relevant de la phase argileuse

* * *

Le terme argile a une signification très floue dans le vocabulaire spéléologique; il est même possible de dire que le terme empirique « argile de grotte » comprend tous les sédiments où prédomine un matériel dont le diamètre est inférieur à 0,2 mm. C'est

(8) Pour essayer d'être complet, mentionnons comme autre caractère morphologique d'un sédiment sableux, la présence de cheminées de fées, résultant de suintements de voûte tombant sur un sédiment fin à blocs interstratifiés.

ainsi que les argiles blanches de la grotte de l'Eglise (Baudinard, Var) comprennent environ 30 % de sable, plus de 50 % de limon et le reste en argile vraie, d'après une analyse de l'Institut des Travaux Publics et du Batiment (1952).

La place importante tenue par les argiles dans le remplissage des grottes justifierait de longs développements. Mais un Colloque consacré à ce sujet s'est tenu en 1959 lors du 2^e Congrès National de Spéléologie de Cahors (9) et nous renvoyons à la publication qui a suivie cette réunion.

— III —

REMPLISSAGE et CREUSEMENT

Il existe des rapports étroits entre le remplissage et le creusement. Pour s'en convaincre il suffit de considérer les principales actions morphogénétiques permettant le creusement souterrain. Nous avons montré plus haut comment la formation d'un talus d'éboulis accompagne le développement d'une morphologie clastique. De la même façon les processus de corrosion déterminent l'accumulation de résidus insolubles et le burinage mécanique d'une circulation aquifère rapide sera suivi vers l'aval d'un alluvionnement où se retrouveront tous les éléments abrasifs ayant agis dans la partie amont du cours.

Mais les interactions du remplissage et du creusement se retrouvent également dans un autre domaine et nous considérerons spécialement le rôle joué par le remplissage pour orienter le creusement à l'intérieur du réseau, ainsi que les possibilités d'action directe du remplissage sur les massifs de roche en place se trouvant directement à son contact.

1^o Orientation du creusement par le remplissage:

Un réseau de conduits obstrué par un remplissage imperméable pourra être affecté de deux façons par une reprise des circulations aquifères:

— 1^{o cas} - La compétence de l'écoulement est suffisante pour qu'il puisse déblayer le colmatage qui se trouve sur son trajet. C'est ainsi que l'on retrouve des placages argileux en terrasse sur certains replats de galeries surcreusées. Ou bien la mise en charge à l'intérieur des conduits sera suffisante pour faire sauter un bouchon de produits colmatants. C'est ainsi que en 1935 une crue déplaçait l'amas d'argile qui empêchait jusqu'alors toute progression au fond de l'aven de la Baraque (10) et que, depuis 1920, les conduits de la perte de Thémines (Lot) sont progressivement déblayés par les crues hivernales et qu'il est possible chaque année de pénétrer pour la première fois dans des galeries récemment ouvertes.

— 2^{o cas} - le remplissage n'est pas remanié par l'écoulement et constitue un obstacle. Les circulations aquifères profitent alors des divers exutoires qui se présentent, galeries demeurées ouvertes et servant de dérivation, ou bien utilisent les zones de moindre résistance pour forer de nouveaux conduits, la roche encaissante se présentant alors comme un matériel tendre face au colmatage insoluble. Les possibilités de creusement seront alors doubles.

Ou bien une galerie nouvelle sera creusée. Il semble bien que les galeries étroites et surélevées des parties nouvelles du gouffre de Reveillon se sont ouvertes ainsi (11), à la suite d'un colmatage total des galeries inférieures par des éboulements de voûte.

Ou bien un tassement du colmatage initial ouvrira un passage près de la voûte de la galerie. A ce moment les eaux circulant entre le sommet du remplissage et la voûte

(9) Cavailé (A.), Caumartin (V.), Blanc (J. J.), etc... - Colloque sur les argiles des grottes. *Ann. Spéleo.*, France, t. 15, 1960, p. 383-420.

(10) Joly (R. de) *Spelunca*, 2, VIII, 1937, p. 46.

(11) Voir Cavailé et Renault (*Atti Symposium Int. di Speleologia*, Villa Monastero, Varenna 1960, Memoria V, Tomo II, Como 1961, p. 181 - 184).

toute proche s'attaqueront à cette voûte. H. Trimmel explique ainsi l'évolution de certaines galeries présentant un profil en trou de serrure. La galerie primitive est constituée par la fente verticale s'ouvrant dans la partie inférieure de la galerie actuelle. A la suite d'un colmatage total, la corrosion s'est exercée audessus du remplissage, burinant une galerie en tube surmontant la fente primitive (12).

J. H. Bretz a largement utilisé cet élément d'interprétation en élaborant sa conception personnelle de la « Two cycle theory » à partir des idées davisienne. D'après cette théorie au cours d'un premier cycle le réseau karstique souterrain s'élabore en régime phréatique; la fin du premier cycle est marqué, en surface, par un épisode de pénéplanation accompagné du colmatage du réseau phréatique. Lors du deuxième cycle le creusement reprend à la limite du colmatage et de la voûte, cette reprise étant marquée par certaines formes de plafond caractéristiques: coupoles, lapiaz inverses, etc.. Nos observations (coupoles traversées par des bancs de silex dans la grotte de Miremont en Dordogne, lapiaz inverses de la perte de Thémis) confirment cette interprétation; fréquemment l'évolution du creusement d'une galerie se poursuit vers le haut, audessus du colmatage.

Cette notion une fois admise, il faut envisager deux types de creusement en fonction du remplissage. Dans le premier type les galeries seront forées en plein rocher, celui-ci apparaissant au plancher; les processus de creusement s'exerceront sur tout le pourtour de la galerie (cas de la conduite forcée) ou bien simplement à la partie inférieure (cas de l'écoulement libre). Dans le deuxième cas il y aura simultanément colmatage de la partie inférieure et creusement de la voûte. Un exemple type pourrait être pris à la grotte de Bara-Bahau (Dordogne), constituée par une galerie de 10 m de large et 5 m de voûte audessus du sol. Un sondage effectué récemment dans le remplissage de ce conduit a traversé 20 m d'alluvions sableuses sans atteindre le fond rocheux. La présence, dans ce dépôt, de silex noircis par le manganèse, alors que la voûte est démunie de ce type d'enduit montre que cette évolution a été continue.

Nous n'insisterons pas davantage, et ne parlerons pas des remaniements qui, éventuellement viendront compliquer cette évolution. Disons simplement que, dans une interprétation morphogénétique, le rôle du remplissage doit être attentivement considéré.

2° - Action du remplissage sur la roche encaissante:

Dans certains cas le remplissage pourra avoir une action directe sur la roche encaissante; en particulier lorsque le remplissage est suffisamment perméable pour que les solutions acides le traversant puissent attaquer la paroi. Nous aurons ainsi les substitutions de phosphate au calcaire bien connues dans la grotte de Minerve (Hérault) ou bien les altérations des parois dolomitiques de la grotte de Moulis (Ariège). Dans cette caverne s'observent localement des parois où la dolomie profondément altérée est transformée en sable dolomitique, la paroi conservant, l'allure de la roche en place. La décomposition est malgré tout assez avancée pour que l'on puisse enfoncer la main à travers ce qui fut une paroi rocheuse. L'exécution de coupes dans le remplissage de la grotte nous a montré que cet état de paroi correspondait fréquemment à un ancien remplissage argileux partiellement évacué.

Il peut également arriver que le remplissage permette d'expliquer certains accidents de parois énigmatiques; mentionnons les cupules de rodages, dépressions ovales de plusieurs centimètres de diamètre et d'une dizaine de millimètre de profondeur résultant

(12) Il est classique d'interpréter les galeries présentant une section en trou de serrure comme résultant du surcreusement par un écoulement libre d'une galerie en tube; l'interprétation Trimmel, renversant ce raisonnement, offre des possibilités à retenir (Voir J. Corbel - Karsts du N. W. de l'Europe. *Mém. Rev. Geogr. Lyon*, n. 12, 1957, p. 483).

du frottement des galets (13) signalées pour la première fois à la source du Viaduc d'Escot dans les Basses Pyrénées et que nous avons personnellement observés dans une galerie pénétrable de la source des Garruby (Var).

Apparentées à ces cupules de rodage mentionnons les « vagues d'érosion » (R. de Joly) baptisés le plus souvent « coups de gouges » par les spéléologues français, « scallops » en Grande Bretagne. Elles se présentent comme des cupules allongées, de dimensions variables (5 à 150 cm) de grand axe horizontal ou faiblement incliné, arrondies vers l'amont, en pointe vers l'aval; le profil de la dépression étant également dissymétrique, la dépression présentant une pente forte vers l'amont et une pente douce vers l'aval. Lorsque les parois de la galerie présentent une succession de bancs hétérogènes, les vagues d'érosion se localisent préférentiellement sur les bancs massifs de calcaire pur. Elles s'observent, exceptionnellement, isolées, la plupart du temps coalescentes et couvrant de grandes longueurs de parois, aussi bien à la voûte où elles tendent vers une forme isodiamétrique que sur le sol où leurs dimensions sont plus grandes et leur dissymétrie plus accentuée. Dans beaucoup de cas il apparaît que les cupules de corrosion et certains petits éboulements de parois sont postérieurs à cette forme. Enfin la partie la plus creuse de la concavité est fréquemment soulignée par une tache de manganèse rendant cette forme visible même lorsque le relief est à peine esquissé.

L'interprétation de cette forme varie suivant les auteurs. Citons: plans de clivage de la calcite, cassures conchoïdales régularisées, action de la glace, striage, corrosion, cavitation. Aucune des ces hypothèses ne peut être retenues; la cavitation par exemple, même en éliminant certaines difficultés d'ordre hydraulique, n'explique absolument pas la présence des vagues d'érosion à la base d'une galerie en canyon (rivière souterraine

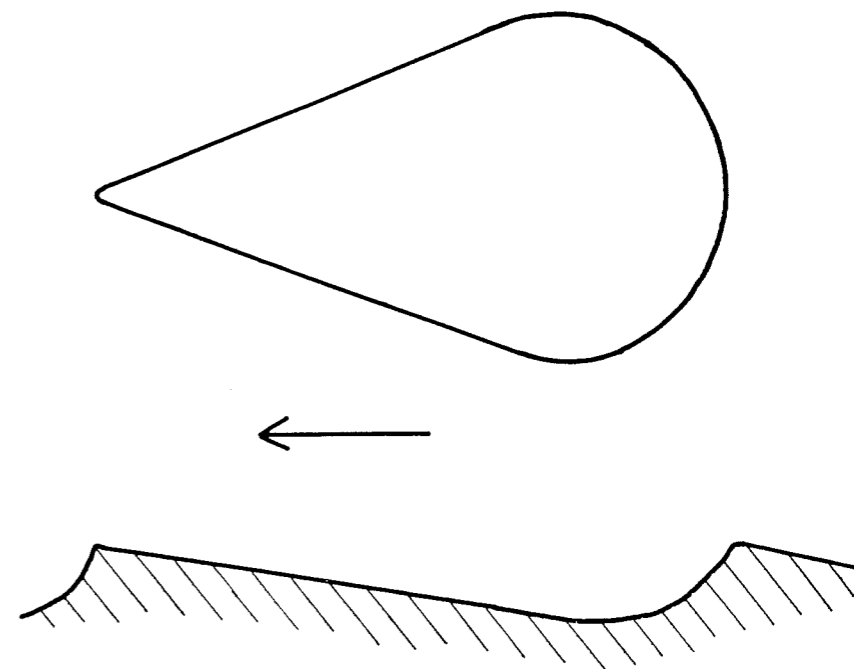


Figure 5 - Vague d'érosion ou coup de gouge. En haut: vue en plan, en bas: coupe à travers la dépression.

(13) Schoeller (H.) - Les galets rodés - *Ann. Spéleo*, t. VII, 1952, p. 7-12.

des Combettes, Lot) ou bien en plein air sur les parois calcaires des gorges du Niari (Moyen-Congo) ou même sur les quartzites des cascades de Banfora (Haute-Volta).

Nous avons personnellement proposé une autre théorie en constatant, dans les massifs pyrénéens, que les vagues d'érosion se rencontraient dans toutes les grottes à galets de quartz ou de granite, les grottes voisines démunies de ce remplissage exogène ne montrant pas cette forme de paroi. Afin de contrôler cette hypothèse nous avons mesuré la largeur d'un certain nombre de vagues et les avons comparées à la granulométrie des galets de la même caverne. L'analogie devient alors frappante en constatant, par exemple, que dans le Trou de vent de Bouzic où la médiane des galets est de 2,5 cm, la médiane des largeurs de coups de gouge est de 3 cm, alors que dans les gorges de l'Ardèche où les galets atteignent 50 cm, les vagues d'érosion présentent des dimensions équivalentes.

Si l'on établit un rapport direct entre vagues d'érosion et galets, le fait que ces marques s'observent à la voûte oblige à admettre un colmatage complet de la galerie, alors que celle-ci était active, par un remplissage de galets. Ce colmatage est d'ailleurs prouvé par l'existence de brèches cimentées en certains points de la voûte de la grotte de Niaux (Ariège), par exemple, et d'autres cavités.

Ces quelques remarques montrent l'importance que l'on doit accorder aux états et caractères de parois dans l'analyse géomorphologique d'une caverne.

— IV —

LOCALISATION DU REMPLISSAGE

Les sédiments souterrains ont une répartition précise à l'intérieur des réseaux et cette répartition relève de facteurs complexes: creusement, colmatage et phases d'arrêt alternant et s'influençant mutuellement comme nous venons de le voir. De plus, à une époque donnée, la morphologie orientera l'évolution en fonction des conditions climatiques.

Citons quelques exemples: la grande salle au sol d'éboulis pourra se transformer en bassin de décantation et stocker un important matériel argileux ou bien s'acheminer lentement vers un colmatage plus ou moins complet par les concrétions. Le torrent souterrain sera régularisé par des gours et se transformera en rivière souterraine calme.

A un type morphologique donné correspondent ainsi plusieurs milieux de sédimentation possibles. Inversement l'analyse morphologique est inséparable de la prise en considération de ces facteurs sédimentaires. D'un point de vue élémentaire le simple fait que ce colmatage dissimule une partie des formes au rocher justifie cette investigation. Sous une forme plus analytique cette notion de milieux sédimentaire dépasse le point de vue « rapports du creusement et du colmatage » et conduit à approfondir la place des processus sédimentaires dans les processus morphogénétiques.

La définition des milieux sédimentaires fut esquissée, il y a déjà un certain temps par les biospéologues donnant les caractères des divers milieux écologiques en caverne. Cette synthèse répond à son objet biologique, mais d'un point de vue géologique cette première démarche néglige les enchaînements de processus qui sont l'objet des recherches karstologiques.

La définition des divers milieux sédimentaires conduit à délimiter des zones de sédimentation souterraine.

La première tentative zonéographique distinguera la région d'entrée et les parties profondes d'un réseau (14).

(14) Voir analyse détaillée dans Kukla (J.) et Lozek (V.) - 1958 - To the problems of investigation of the cave deposits. *Ceskoslovensky Kras*, XI, p. 1983 (en tchèque et en anglais).

La région d'entrée, proche de la surface, est soumise aux influences extérieures; les mécanismes présidant à la mise en place des dépôts externes opèrent encore sous terre dans cette zone. Parmi les sédiments propres à cette région, citons: les éboulis, le loess, l'humus et les débris organiques. Ceci pour nos climats.

Les parties profondes ne communiquent avec la surface que par des passages rétrécis (étroiture ou réseau de fentes) ou bien par de longues galeries où les variations externes sont stabilisées. Dans cette zone les éboulis sont très localisés; la sédimentation argileuse et les concrétions dominent. Les sédiments biologiques sont représentés par le phosphate et le guano.

A l'intérieur de ces parties profondes des zones horizontales et verticales pourront être identifiées et mises en rapport avec des caractères morphogénétiques. Comme exemple de *zonalité horizontale* mentionnons le torrent souterrain (Ex: Rivière souterraine du Saut de la Pucelle, Lot) avec une partie amont de bloc anguleux, suivie d'une longue zone à galets, coupée par des bassins de décantation à colmatage argileux devant les chaos de blocs. Il existe un rapport direct entre cette répartition sédimentaire et la morphologie.

Les *zonalités verticales*, ou étagements, mettent en évidence l'enchaînement de certains processus opérant verticalement entre zones superposées. Citons un premier exemple concernant les phénomènes d'alluvionnement. Dans certaines rivières souterraines (Vitarelles, Lot) le cours principal circule sur un lit de galets, mais les replats susjacentes ou les galeries de l'étage supérieur touchées par les crues (fait constaté) montrent un dépôt argileux qui dénote un ralentissement du courant lors des crues; ce ralentissement est déterminé par les diaphragmes (siphons) connus à l'aval et qui transforment le réseau d'écoulement en réservoir par mise en charge lorsque le niveau de l'eau dépasse une certaine limite.

Autre type d'étagement: J. Montoriol-Pous a constaté, dans un aven, la superposition d'une salle en cours de colmatage par les concrétions surmontant une cavité inférieure où s'accumulent des éboulis d'origine chimique. Exemple à rapprocher du dispositif fréquemment observé: paroi concrétionnée faisant face à une paroi corrodée.

Cette notion d'étagement sédimentaire conduit à discuter la notion d'étagement cyclique. Dans un réseau complexe il sera possible de rencontrer, superposées, des galeries supérieures partiellement colmatées par les concrétions, un étage moyen de morphologie et à remplissage clastique, un réseau inférieur occupé par un ruisseau charriant des galets. Il est classique de considérer l'étage supérieur comme ayant atteint un stade sénile, l'étage moyen comme arrivé à maturité alors que l'étage inférieur serait en pleine jeunesse.

Il est également possible de rencontrer des réseaux où ces éléments cycliques se combinent de façon anarchique. Il faudra alors recourir à une interprétation polycyclique (rajeunissement de formes mûres, etc...).

La réalité de ces étagements cycliques est contestée par plusieurs auteurs. L'obligation de tenir compte d'une part des incidences climatiques, en outre des facteurs structuraux qui entraîneront des zonalités horizontales ou verticales, viennent en effet compliquer singulièrement l'interprétation cyclique. Quelle est la part de la succession et du dépôt simultané?

Sans insister davantage sur ce sujet, disons qu'une étude sédimentologique implique la datation des principales unités de remplissage.

Cette prise en considération du facteur temps introduit l'objet du chapitre suivant.

— V —

COLMATAGE DU RESEAU

L'intervention du facteur temps se traduit à l'intérieur du réseau par des alternances de déblaiement et de remblaiement en zones variées. Jusqu'à présent nous examinons les conditions de sédimentation à une époque donnée. Nous verrons maintenant, de façon sommaire, comment s'organisent accumulations et déboulements au cours de l'histoire du réseau.

1° *Remaniements* :

Nous insisterons d'abord sur l'importance des remaniements à l'intérieur d'un réseau. Ceux-ci s'effectueront selon trois mécanismes (15).

a) *Action des eaux courantes* - Un cours d'eau reprenant son activité évacue les matériaux se trouvant sur son trajet. Cette action pourra s'exercer le long d'un trajet horizontal; ce qui se traduira par des tranchées creusées naturellement dans le remplissage, par des planchers stalagmitiques suspendus, etc...; cette action pourra s'exercer également de bas en haut à la sortie d'un siphon (Ex: siphon amont de la grotte de Moulis).

b) *Solifluction* - Ce mécanisme est bien connu. En région froide il est attribué à l'action d'un sous-sol gelé, la tranche superficielle, lors des phases de réchauffement se dégelant et se mettant en mouvement sur la tranche gelée sous-jacente. Ce processus fonctionnera dans la « zone d'entrée » ou dans le réseau cutané (Ciry). Dans les régions profondes, les alternances de gel et dégel sont plus difficiles à concevoir. Mais un phénomène voisin peut être envisagé. Des couches imprégnées d'eau reposant sur une surface lisse et imperméable telle qu'un plancher stalagmitique pourront se déplacer, quelles que soient les conditions climatiques (Méroç).

c) *Soutirage par action du vide* - Le réseau karstique comporte habituellement plusieurs étages de galeries réunies par des puits ou la disparition des planchers intermédiaires. Un colmatage reposant sur des bouchons obstruant ces conduits verticaux pourra être ultérieurement aspiré vers le bas lorsque ces conduits se dégageront. Éventuellement un processus d'affaissement dissolution s'exerçant dans la zone fissurée sous-jacente à un remplissage aura le même effet. Ces effets de soutirage se traduiront par de grands entonnoirs interrompant le parcours de la galerie tels que l'on peut en observer dans les grottes de Peillot et du Cap de la Bouiche (Ariège), de Cabreret (Lot), à l'aven du Marteau (Ardèche), etc...

Ces remaniements prenant des couches anciennes et venant les redéposer dans un milieu en cours de sédimentation avec « l'allure d'honnêtes couches en place » (Méroç) parfois datées par des éléments transportés et redéposés, sont une possibilité à considérer attentivement dans une étude stratigraphique.

2° *Répartition du colmatage dans l'espace.*

La répartition du colmatage sera irrégulière à l'intérieur du réseau. En général les explorations montrent l'existence d'un étage supérieur colmaté rapidement ou semi colmaté et d'un réseau inférieur en activité, largement dégagé sur de longs parcours. En beaucoup de régions il faudra explorer de nombreuses cavités qui se révéleront bouchées à -30 ou à -80 m avant de trouver un passage permettant d'accéder à un système pénétrable au niveau des circulations actives. Il existe même des secteurs où, en l'absence de travaux artificiels ces réseaux profonds seraient demeurés inconnus (Ex: rivière souterraine des Vitarelles, Lot).

En de nombreuses régions ces colmatages seront particulièrement développés près de la surface. Ainsi dans le bassin de Paris les coulées de solifluction dissimulent les entrées de caverne. L'absence d'ouvertures ne correspond pas obligatoirement à une absence de formes karstiques souterraines.

Dans certains cas il est possible de dater l'époque du colmatage externe. La grotte de Cougnac, la grotte de Villards, etc. furent parcourues par les hommes de l'Aurignacien qui tracèrent des peintures maintenant célèbres sur les parois. Ultérieurement la voie d'accès fut obstruée. D'autres exemples, nombreux, pourraient être cités.

L'obstruction des fonds de gouffres et des pertes actives est due à des causes variées.

(15) Voir en particulier Méroç (L.) - 1954 - Note sur les migrations du remplissage des cavernes. *Bull. Soc. Et. Rech. Prehist., Les Eyzies*, France, 4 p.

Citons les coulées de blocs, consécutives à un épisode de gélifraction, et qui sont entraînées sous terre par gravité, ruissellement, etc. Un cas d'obstruction par éboulis, consécutif à un séisme, a été signalé en Algérie (16). Les débris végétaux, les squelettes facilitent la constitution de bouchons. Ces colmatages sont le plus souvent attribuables à des actions propres à la zone d'entrée.

En profondeur, à côté de galeries ou de niveaux presque totalement obstrués, nous aurons des espaces largement dégagés, sauf en certains points que l'on peut assimiler aux voûtes mouillantes des réseaux aquifères. Il s'agira d'une arrivée verticale, du type « trémie », ou bien d'un véritable « siphon alluvial », où le remplissage vient toucher la voûte. Ces obstructions sédimentaires sont liées à une particularité topographique locale, Elles protègent les parties profondes du réseau contre les influences externes, ou de nouveaux apports de sédiments.

3° *Colmatage total du réseau.*

Le colmatage du réseau commencera dès le « stade phréatique » (Bretz) lorsque le karst souterrain se réduit à un réseau de fentes et que les premiers conduits commencent à s'esquisser. Les résidus de dissolution s'accumulent et les éléments fins épars en surface ou dans la partie amont du bassin d'alimentation seront absorbés par les méats d'infiltration.

Ultérieurement, le régime hydrologique du réseau se modifiant, le colmatage pourra être évacué alors que le creusement se poursuit.

Si le karst se développe dans un massif calcaire surmonté par un niveau meuble (argile à silex, formations sableuses, alluvions, etc.) il continuera à évoluer sous forme colmatée en absorbant les éléments meubles du niveau sus-jacent. Evrard en Belgique, Moneymaker aux U.S.A. ont décrit des karsts de ce type.

Certaines incidences climatiques paraissent susceptibles de déterminer une évolution du même type. Les karstifications qui se développent sous la forêt équatoriale évolueraient ainsi de préférence sous forme colmatée.

Qu'il s'agisse d'un karst sous-jacent ou d'un karst nu certaines variations du régime hydrologique amèneront un décolmatage au moins partiel des galeries. Dans le cas des karsts tropicaux, une phase de sécheresse modifiera l'évolution dans ce sens. Un soulèvement tectonique pourra avoir le même résultat.

A partir de ce moment le karst évoluera avec des galeries dégagées ou colmatées suivant les points. Si l'on considère les divers éléments en notre possession il faut bien constater que nos connaissances sont peu avancées en ce domaine. La plus grande partie XII, 1957, p. 47-54 (p. 49).
des galeries, noyées, échappent aux explorations et certains indices, tels que les vagues d'érosion, montrent que l'évolution en régime colmaté serait plus fréquente qu'il ne semble au premier abord.

En fin d'évolution, le plus souvent à la suite d'un mouvement régional négatif, le fonctionnement hydrologique du réseau deviendra colmatant et les conduits se rempliront par apport vertical ou horizontal. Cette fossilisation (17) pourra devenir totale et le karst se recouvrir « de sédiments continentaux, lacustres ou marins permettant de le dater géologiquement » (B. Gèze). Nous aurons alors un paléokarst.

Les plus anciens seraient Antéviséens dans le Minervois (S. E. de la France), Rhétien

(16) Renault (Ph.) - Effondrements, séismes et failles vivantes. *Ann. Spéleo*,

(17) Llopis-Llado (N.) - Karst holofossile et mérofossile. *Congr. Spéleo Int. Paris* 1953, t. 2, p. 41-50.

La fossilisation par colmatage est le stade ultime du réseau souterrain dans la majorité des cas. Lorsque la lithologie et la disposition des lieux (proximité de la surface) s'y prêtent un canon ou un bassin fermé pourra se substituer aux parties maîtresses d'une caverne, mais cette tendance paraît surtout marquée dans les régions périglaciaires humides (Corbel).

dans le Boulonnais (N. de la France), Crétacé en Provence, Eocène-oligocène dans le Quercy, etc... Le paléokarst sera daté par les fossiles recueillis à l'intérieur des poches, d'après l'étage géologique scellant le gisement, éventuellement par une déformation tectonique postérieure au colmatage (Gorges de Baudinard, Var). Certains indices, moins sûrs peuvent être utilisés c'est ainsi que, dans le Boulonnais et à Baudinard, nous avons constaté l'association fréquente du paléokarst et de poches contenant des scalénoèdres de calcite de grande dimension (karst holofossiles à sédimentation autochtone de Llopis-Llado).

Quel est l'avenir d'un paléokarst? Un rajeunissement est possible, mais nous avons vu plus haut que le remplissage est susceptible d'orienter le creusement vers de nouvelles voies, mais que inversement un écoulement suffisamment rapide peut amener l'évacuation d'un remplissage ancien. En général cependant l'induration des vieux remplissages limite les possibilités de remise en activité. Le plus souvent le paléokarst est recoupé par le recul des versants de la surface topographique. Ceci explique les fragments de concrétions corrodées épars à la surface de certains plateaux calcaires et constituant autant d'indices paléokarstiques.

Pour finir rappelons que tous les intermédiaires existeront entre: l'étage colmaté d'un karst actif, le karst couvert totalement colmaté, mais non daté, le paléokarst daté, et le paléokarst remanié. L'identification, si elle s'appuie sur des éléments de datation précis, permettra de préciser ce caractère géologique.

— VI —

CONCLUSION

Dans ce bref exposé nous avons considéré successivement les mécanismes de sédimentation souterraine, la répartition dans l'espace de leur zone d'action, l'enchaînement dans le temps de ces différentes actions. Nous avons été guidé en permanence par un principe fondamental: l'analyse de la nature et de la genèse des sédiments constitue simplement une *introduction au problème central de la karstologie*: connaître le rôle du colmatage dans l'évolution morphogénétique d'un réseau karstique.

Ce problème peut être abordé de divers points de vue: stratigraphie et datation permettent de retracer les étapes de cette évolution dans un cas précis, l'analyse climatique conduit à faire la part des facteurs locaux. L'analyse géodynamique, telle que nous l'envisageons ici, doit permettre, tout d'abord de préciser les limites de l'analyse climatique et de préciser ses limites; ensuite de mettre au point les normes de la description et de l'interprétation d'un réseau.

Les études régionales ne manquent pas; les études de méthode sont beaucoup plus rares et c'est pourquoi les réunions, tel que ce Symposium en permettant de soumettre les idées générales au crible de la critique de spécialistes d'origines variées, sont extrêmement précieuses.

Cette rareté de l'effondrement comme stade final d'un réseau karstique s'explique facilement par les raisons suivantes:

— 1) Quand des éléments climatiques particuliers n'interviennent pas (cas d'un karst périglaciaire humide soumis à gélifraction) les effondrements à l'intérieur du réseau se limitent à certains points préfigurés par la structure.

— 2) Le creusement d'un conduit s'accompagne de l'établissement d'un équilibre mécanique de la voûte; l'arrêt du creusement assure la permanence de cet équilibre.

— 3) Le creusement superficiel se limite à une surface avec concentration le long de lignes préférentielles: les vallées; le creusement souterrain s'effectue dans un volume à trois dimensions. Il commence dans la zone du lapiaz, reprend en profondeur de long des conduits verticaux et à certains niveaux de galeries. Cet éparpillement limite considérablement le taux d'excavation en un point donné. Seule l'absorption sous terre d'une rivière aérienne peut amener une concentration locale du creusement.

Presidente GÈZE:

Je remercie M. Renault de son brillant exposé. Il nous a présenté, d'une façon que l'on peut considérer comme à peu près complète, tous les problèmes physiques du comblement. C'était un programme immense; bien sûr, M. Renault ne nous a pas caché qu'il ne pouvait pas tout traiter à fond, mais il nous a tout de même retracé le schéma général et il a su ajouter un grand nombre d'observations personnelles.

J'avouerai que j'ai été tout spécialement intéressé par le point de vue, rarement traité, de l'influence du comblement sur le type de creusement. C'est une chose qui est, en somme, peu classique, et que M. Renault a su mettre en évidence d'une façon remarquable. Enfin, mon but n'est pas, personnellement, d'adresser des observations, pour ou contre, à l'exposé de M. Renault, mais de demander qui, dans l'assistance, désire sur ce sujet bien particulier, quoique large, faire des observations.

Messieurs Boegli, Corbel, Siffre, Bauer, Ciry, Parenzan, Pasa, Cigna, Choppy et Barral s'inscrivent.

Je donne donc, en premier lieu, la parole au Professeur Boegli.

BOEGLI développe le problème des argiles des cavernes; voir la publication Boegli: *Der Höhlenlehm*, pages 11 à 29 (Tome II).

Presidente GÈZE:

Je remercie le prof. Boegli qui nous a vivement intéressés et nous a permis d'admirer un grand nombre de belles photographies auxquelles notre temps très limité nous a malheureusement empêché de prêter toute l'attention nécessaire. Je donne maintenant la parole à M. Corbel.

CORBEL: Un premier point sur lequel je voudrais insister: c'est la *position des calcaires* par rapport aux autres roches. Deux cas en gros peuvent se produire: dans un *climat humide*, très généralement le calcaire est en creux, si l'on a une masse de granite; ici, le calcaire se présente à un niveau inférieur à celui du granite, et les rivières qui sont dans le calcaire proviennent de l'extérieur. Dans ce cas-là, qui est le cas de toutes les régions humides, il y a une masse de sédiments plus grands qui remplit les cavités, en particulier des sables arrachés aux roches cristallines ou des dépôts de cailloux plus gros. Au contraire, dans les *climats secs*, le calcaire, généralement, forme des buttes séparées; à ce moment-là seulement l'eau tombant dans le calcaire donne des grottes alimentées par des rivières; l'apport mécanique de sédiments, est beaucoup plus faible et le remplissage est beaucoup moins important dans ces grottes situées en relief.

Un autre problème: celui des *galets*. Il faut d'abord distinguer les galets calcaires des galets non calcaires, qui ne peuvent provenir que des formations extérieures. Ces formations extérieures donnent surtout des galets quand il y a une fragmentation préalable par le gel, ce qui fait que dans ces calcaires où arrivent des rivières de l'extérieur, (je pense au *Karst de Postoina*, par exemple), on a une grande quantité de galets non calcaires. Au contraire, dans les régions isolées qui sont purement calcaires, les galets sont beaucoup moins nombreux et, uniquement, calcaires. Dans les régions très froides il y a très peu de galets calcaires en raison de la vitesse de dissolution, mais dans les régions chaudes, inversement, on ne trouve que des fragments calcaires arrachés aux parois. Il y a aussi très peu de galets bien roulés.

Un mot maintenant à propos des « coups de gouge », des « scallopes », des « vagues d'érosion » comme les appellent divers auteurs. C'est une question intrigante. Y a-t-il un rapport avec la taille des galets? peut-être; mais la courbe de similitude ne reflète-t-elle pas simplement un rapport entre les « coups de gouge » et la vitesse du courant, la

taille des galets étant également fonction de cette vitesse. Plus le cours d'eau est rapide, plus les galets d'une part, les « coups de gouge » d'autre part prennent de grandes dimensions. J'ajoute qu'une ressemblance m'intrigue, c'est celle avec les formes des parois dans les glaciers, voire les icebergs. Cette ressemblance est étonnante et m'incline à penser que la dissolution pure doit avoir un grand rôle. Il y a peut-être un rôle des projections fines, un genre d'embruns?

Un dernier mot, maintenant, sur les sédiments. Ces sédiments en grottes paraissent être en fonction du climat, en ce sens, que dans un climat très humide, à faible évaporation, le débit des cours d'eau est très grand. Quand le débit des cours d'eau est très grand, la vitesse est très grande et, à ce moment-là, le torrent peut charrier des éléments beaucoup plus gros, en particulier des galets. Et il y a un véritable tri des éléments qui s'opère: des galets d'un côté, puis des sables, puis des argiles. Quand, au contraire, les précipitations sont plus faibles, les gros éléments cessent d'être transportés et on a, pratiquement, seulement des sables ou des argiles, et pour terminer, sous un climat, vraiment sec, le transport ne se fait presque plus et on a simplement les argiles et les limons qui sont transportés.

Presidente GÈZE:

Je remercie M. Corbel, qui s'est limité pour des questions pourtant importantes et je donne la parole à M. Siffre.

M. SIFFRE: Je voudrais faire quelques observations sur la communication de M. Renault d'abord sur les galets souterrains:

A) à propos de l'Aplatissement.

L'indice d'Aplatissement $\left(\frac{L+1}{2e}\right)$ décroît dans la résurgence (ou bien la perte) du

Saut de la Pucelle.

a) S'agit-il en effet d'une perte ou d'une résurgence? Le problème est d'importance.

b) En disant que dans les marmites torrentielles les galets tendent vers la sphère, M. Renault est d'accord en cela avec la plupart des auteurs.

Or, en introduisant en France la morphoscopie dans l'étude des alluvions souterraines j'ai montré dès 1958, que les opinions admises par la plupart des géographes contemporains pouvaient être mises en défaut dans le domaine souterrain.

En effet:

1° - Dans les marmites torrentielles « le tourbillonnement donne des galets bombés » (A. de Cayeux), l'aplatissement varie entre 1,3 et 1,7. Il est donc très faible; c'est la conception classique. Or, j'ai constaté que dans certains cours d'eau souterrains les alluvions calcaires prélevées dans des marmites de géants ont un aplatissement énorme qui augmente avec la taille des éléments passant de 3,8 vers 8,10 mm à 4,3 (13-15) et 4,6 (20-26 mm) puis se stabilise pour des dimensions plus élevées.

Les valeurs de ces indices sont nettement supérieures à celles indiquées par les spécialistes anglo-saxons et ceux de l'École française.

2° - L'indice d'émoussé dont la valeur médiane est de 600 et qui ne descend jamais au-dessous de 200 est certainement un des plus élevés connus.

Plus de 30 % des graviers ont un indice supérieur à 700; beaucoup d'entre eux s'approchent de 1000; leur forme tend donc vers le disque (certains galets sont absolument circulaires et sont semblables à des pièces de monnaie) et non vers la sphère, ou bien vers l'aile d'avion (profil hydrodynamique).

Ce façonnement est donc poussé très loin, et l'association EMOUSSÉ-APLATISSEMENT est absolument unique (fig. 1).

B) à propos de la dissymétrie.

M. Renault n'a pas parlé de la dissymétrie qui est le troisième indice qu'emploient, notamment, les spécialistes de granulométrie et de morphométrie.

3° - « Dans les marmites torrentielles, la dissymétrie est très faible » et « l'usure tend à rendre un galet symétrique » (A. Cailleux). Comme nos galets ont des indices de dissymétrie très élevés qui décroissent avec la taille passant de 620 (10-15 mm) à 615 (15-20 mm) et à 600 (20-30 mm) je pense qu'il existe un façonnement spécifique (que j'ai appelé dans diverses publications « FAÇONNEMENT KARSTIQUE ») au domaine souterrain. D'autres recherches m'ont montré que ce façonnement n'était point unique. Car on peut trouver sous terre d'autres types de galets modelés différemment.

En particulier des sphères parfaites décrites par M. Renault.

Ces sphères, où les valeurs limites théoriques des auteurs qui ont établi les formules morphoscopiques, sont atteintes, nous les avons étudié et mesuré dès 1958 et nous avons présenté nos résultats à la section de Spéléologie Physique du 11^{ème} Congrès National de Cahors

Les valeurs de l'Indice d'Emoussé sont évidemment les plus élevées connues, pour certains galets, puisqu'elles voisinent 1000, plus exactement 999 ± 1 , à l'erreur de mesure près.

Dans ces conditions l'Aplatissement est proche de 1 et la Dissymétrie gravite autour de 500.

Mais ces galets de l'exurgence du Drac, dans l'Hérault (Réseau de la Clamouse) ont été façonnés sur place, au milieu de blocs plus ou moins anguleux, et non dans des marmites torrentielles, semble-t-il.

Les renseignements exposés par M. Renault ont donc surtout une valeur d'exemple et complètent les recherches que je poursuis depuis plusieurs années sur les alluvions souterraines.

L'étude morphoscopique des galets est indispensable à une meilleure compréhension des processus exacts de karstification, mais elle n'est pas suffisante.

Les résultats quantitatifs, tirés des formules numériques doivent être employés avec précaution et ne doivent pas faire oublier l'étude des conditions hydrodynamiques régnant dans une cavité donnée.

Ainsi on doit toujours distinguer le type de grotte auquel on a affaire, gouffre d'absorption, exurgence, résurgence etc., parce que les agents de façonnement qui s'y exercent ne sont pas nécessairement les mêmes et n'ont pas la même ampleur.

Je crois en effet, que les forces hydrodynamiques qui s'exercent sur des particules endogènes sont plus importantes dans les parties inférieures que dans les parties supérieures d'un réseau.

Ce qui d'ailleurs n'est pas toujours vrai, puisqu'on peut trouver dans certaines résurgences des alluvions qui n'ont subi qu'un faible façonnement.

Ma seconde observation portera sur les sables souterrains:

Les sables, et les galets aussi, reflètent, lorsqu'il s'agit de matériaux allochtones, la nature minéralogique des bassins-versants d'origine.

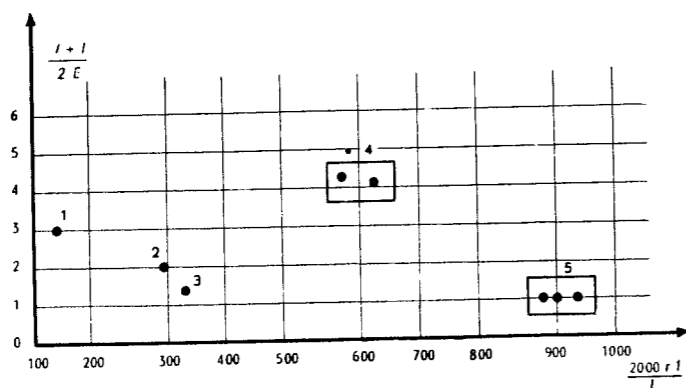
Mais ceci est surtout vrai lorsque l'on sépare la fraction lourde des éléments légers.

La détermination des minéraux lourds souterrains, permet de connaître la province pétrographique d'origine des éléments et donc de faire des reconstitutions paléogéographiques.

Parmi les minéraux lourds que nous avons étudiés figurent: le cuivre, l'or, le fer, etc. Des concentrations de ces minéraux dans les cavernes sont très possibles car celles-ci peuvent servir de « pièges à sédiments ».

Autre fait non signalé: les sables peuvent être modelés en Ripple-marks.

Dès 1957 j'ai publié des coupes effectuées sur le sol sableux (rides) de résurgences.



GRAPHIQUE MIXTE : Comparaison de quelques formations alluviales subaériennes et souterraines.

- 1 - Fluviale en climat-froid.
 2 - Fluviale en climat tempéré ou chaud.
 3 - Marmites de torrents.
 4 et 5 - Fluviale souterrain en climat tempéré, méditerranéen
 (4 : Foux de St-Cézaire, A.M. ; 5 : Trou du Drac, Hérault.
 (1, 2, 3 : d'après A. CAILLEUX et J. TRICART pour des galets calcaires de 50 mm in *Initiation à l'étude des Sables et des Galets*. Paris. C.D.V.)
 (4 et 5 : d'après M. SIFFRE).

Récemment, nous avons repris l'étude des rides sableuses souterraines avec l'Académicien R. H. CHARLIER. Les résultats sont sous presse dans des revues américaines.

Nous avons observé que les ripple-marks pouvaient être constitués par des couches de matériaux de nature et de granulométrie différentes.

Des concentrations d'éléments, les plus légers, mais les plus gross on été mises en évidence à la base des rides.

Ma dernière observation porte sur la sédimentation souterraine dans les siphons, étude qui, me semble-t-il, n'a encore jamais été effectuée.

Je viens de découvrir, il y a quelques mois dans une exurgence, dont je fais le plan au tableau: la sortie est ici, l'eau va dans ce sens, ici une voûte mouillante générale qui se trouve à toutes les périodes de l'année, en particulier pendant les périodes sèches (in: *Sédimentation en Caverne - Symposium Internazionale di Speleologia - Memoria V della Rassegna Speleologica Italiana - 8 p.*). L'eau sort périodiquement de cette cavité, qui débite 5000 l. d'eau-sec. et est totalement remplie. Nous avons observé dans cette partie de la cavité, que je représente sur mon schéma, les dépôts suivants: 1° les dépôts en profondeur. On observe une répétition sur 2 m de hauteur d'argile, (cest-à-dire d'éléments fins) et d'éléments grossiers, galets, sables etc. Je fais la coupe. Sur 2 m d'épaisseur nous voyons se répéter des couches fines et des couches grossières. Nous interprétons cette disposition par le fait suivant: nous considérons qu'il s'agit là d'une *sédimentation rythmique*.

Lorsque la cavité exurge, elle est remplie, la compétence du liquide est très grande et elle permet à un même point sur cette verticale, un apport de galets, un apport de matériaux grossiers. Lorsque la cavité s'arrête de fonctionner, elle reste, pendant un certain temps remplie, l'eau décroît petit à petit dans le gouffre par une perte qui est située ici, en ce point-là. La compétence du liquide diminue, est pratiquement nulle. A ce moment-là se déposent les argiles. Or, on sait que les fontaines vauclusiennes sont soumises à un rythme plus ou moins régulier, saisonnier, c'est-à-dire que cette résurgence fonctionne

une ou deux fois par an. Je pense qu'on peut interpréter cette disposition des sédiments par le fait suivant: les parties fines se déposent seulement lorsque l'eau ne sort plus de la cavité, i e, pendant les périodes de sécheresse.

On observe aussi dans cette cavité une couche, la dernière, mise en place, qui montre un *granulo-classement vertical*. Ainsi, la couche supérieure de tous ces dépôts est constituée comme suit: au sommet des argiles, ensuite des sables, ensuite des granules, enfin des graviers et des galets. Nous pensons que cette disposition des sédiments est bien un *granulo-classement vertical*, effectué quand la cavité a cessé de fonctionner. Ainsi, ici, il y a une limite très nette: un matériau, un galet, une particule qui arrive dans cette partie-là, à la sortie du siphon, est envoyée en l'air; lorsque sa densité est trop grande elle retombe au fond et se classe par ordre de densité ici et les particules les plus fines qui peuvent être entraînées le plus haut possible, collent au plafond et se trouvent ici (voir plan dans: *Sédimentation en Caverne*).

Cette disposition des sédiments permet de montrer la complexité de l'étude des sédiments souterrains. Il faut faire très attention lorsque l'on étudie la disposition des alluvions souterraines. Il faut faire très attention lorsque l'on étudie la disposition des couches, des disposition en couches comme ceci ou en couches comme cela, on peut se demander s'il s'agit d'une exurgence fossile ou d'un autre type de cavité. type de cavité.

Presidente GÈZE:

Je remercie M. Siffre de ses quelques points précis, qu'il nous a exposés, et je donne la parole à M. Bauer.

F. BAUER: In einer kurzen Diskussionsbemerkung wird auf die Bedeutung der in aufsteigenden Siphonstrecken abgelagerten Sande und Gerölle für die Ausweitung der Evakuierung dieser Höhlenstrecken nach oben hingewiesen.

Dieser Beitrag ist in extenso in den Akten des Symposiums unter dem Titel « Sédimentation und Konvakuationserweiterung in aufsteigenden Siphonstrecken » auf Seite 171 abgedruckt.

Presidente GÈZE:

Je remercie le Dr. Bauer pour sa contribution et je donne la parole au professeur Ciry.

CIRY: Le très intéressant rapport de M. Renault me paraît appeler quelques remarques.

Je crois, en premier lieu, qu'il y aurait avantage, à propos des remplissages de grottes, à distinguer ceux qui proviennent du milieu extérieur et que j'appellerai *exogènes*, de ceux qui se sont élaborés dans le milieu souterrain lui-même et qui peuvent être dits *endogènes*.

Ces derniers nous fournissent des données sur les conditions physiques qui régnaient dans le domaine souterrain à l'époque de leur formation. Les remplissages exogènes nous éclairent sur le monde extérieur, sur son évolution, sur son climat. Pour beaucoup d'entre nous, les Géologues, c'est là un des aspects les plus intéressants de l'étude de ces sédiments.

Les matériaux exogènes gagneraient d'autre part, et toujours dans le même esprit, à être classés non pas du point de vue minéralogique mais plutôt d'après leur origine en distinguant, par exemple, les remplissages d'origine fluviale des remplissages dûs au ruissellement etc. De ce point de vue les remplissages de grottes sont souvent com-

plexes et j'ai distingué autrefois (Sésame... ouvre-toi... Contribution à l'étude des grottes. *Cahiers du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Dijon* 1952) des remplissages monogéniques résultant d'un seul mode de formation et des remplissages polygéniques constitués de matériaux ayant des origines différentes. Dans le premier cas, l'apport pouvant s'être opéré en une seule fois ou en plusieurs temps il est permis de séparer des sédiments monogéniques monophasés de sédiments monogéniques polyphasés. Relativement aux remplissages polygéniques, chaque épisode peut être lui-même mono ou polyphasé.

Relativement aux alluvions fluviales des grottes à propos desquels il a été dit d'excellentes choses, on ne doit pas être surpris de la grande variété qu'ils présentent et dont nous a parlé M. Renault. Les cours d'eau hypogés ne travaillent pas toujours de la même façon que nos cours d'eau de surface. S'ils peuvent leur être comparés lorsqu'ils coulent librement, ce qui leur arrive souvent, il n'en est plus ainsi par contre lorsqu'ils circulent en conduites forcées et notamment en siphons. Les matériaux qu'ils véhiculent subissent alors un tri qui peut être comparé à celui qu'ils connaîtraient dans un tube en U.

Parmi les divers modes de remplissages offerts par les grottes, M. Renault a été obligé de faire un choix, il a dû laisser de côté une catégorie de sédiments qui ne sont cependant pas sans intérêts pour qui s'occupe des climats quaternaires, je veux parler des remplissages par solifluction.

On sait que pendant le Quaternaire, dans les régions périglaciaires, le sous-sol est resté constamment gelé et imperméabilisé sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Les horizons supérieurs, par contre, connaissent avec les saisons des périodes de dégel. Gorgés d'eau, en raison de l'imperméabilité du soubassement gelé, ils ont pu, lorsque les conditions topographiques s'y prêtaient, se mettre en mouvement sous forme d'une boue fluente et pénétrer dans les cavités souterraines.

J'ai observé de nombreux remplissages de grottes qui avaient cette origine.

Avec la boue ont été entraînés souvent des restes d'ossements ou des pièces archéologiques provenant de gisements superficiels et pour lesquels les remplissages de grottes ne constituent donc que des gisements secondaires.

Ces phénomènes ne peuvent naturellement intéresser que le karst superficiel ou comme je l'ai appelé: cutané. (*Annales de Spéléologie* t. XIV, 1-2, 1959).

Dans ce karst, l'action du climat périglaciaire peut avoir d'ailleurs d'autres conséquences. Le gel et le dégel, suivi d'une remise en mouvement, peuvent effectuer des remplissages antérieurs et d'une origine quelconque.

Les traces de solifluction ou d'écoulement à l'état boueux sont fréquents dans les remplissages. Elles s'y manifestent par la position redressée qu'offrent les éléments plus grossiers, les cailloux, emballés dans le remplissage. La découverte, à quelques mètres de distance, des deux moitiés d'une hache taillée illustre bien le phénomène: d'abord l'action du gel qui a fragmenté la pièce, puis celle de la solifluction qui en a entraîné à des distances un peu différentes des deux fragments.

Il a été question, il y a un instant, de l'existence sur les parois de certains conduits souterrains de formes en creux de « coups de gouge » à propos desquelles on a évoqué les accidents de même type produits par les glaciers. N'est-il pas possible d'imaginer que dans des conditions particulières, lorsque le remplissage de ces conduits se met en marche, encore partiellement gelé et armé à sa surface de fragments de roches, de telles érosions puissent se produire tant sur le placher que sur les parois latérales? C'est peut-être une hypothèse à envisager.

Presidente GÈZE:

Je remercie le prof. Ciry qui nous a particulièrement intéressés, grâce à ses observations dans la région de Dijon sur les phénomènes périglaciaires, où ils sont fort importants, et je vais donner maintenant la parole au prof. Parenzan.

PARENZAN: A proposito dei sedimenti argillosi desideravo ricordare un fenomeno particolare che non è stato ricordato poc'anzi, e che ha attratto l'attenzione di vari studiosi, specialmente negli ultimi anni, ed anche alcuni dei nostri, come l'Ing. Perna, il Prof. Holt, il Pozzi, ecc. Si tratta di formazioni caratteristiche che danno degli aspetti particolari alle pareti ed alla volta delle grotte, ricordati e descritti sotto vari nomi: « pelle di leopardo », « formazioni vermicolari », « vermicoliti », « formazioni dendritiformi », « a geroglifici », ecc. Sono delle formazioni caratteristiche, curiose, la cui origine rappresenta ancora un'incognita, sebbene, secondo me, non occorre andare a cercare, almeno per certune di esse, origini tanto complicate; perchè ho notato, esaminando i materiali che danno luogo ad alcune di queste formazioni, che, in generale, sono costituiti di materiali del terreno soprastante e giunto nelle grotte attraverso microfessurazioni, macrofessurazioni o in vario altro modo, perchè ho trovato, p. es., addirittura degli uncini di Echinococco di indubbia provenienza umana, provenienti quindi dall'alto, dall'ambiente aerico.

Lasciando ai geologi lo studio e la soluzione dei problemi relativi, desideravo soltanto precisare questo: che nel mentre ho letto nei vari studi che questi fenomeni si notano nella tale o tal'altra delle caverne in varie regioni, attribuendo i fatti al clima, alle correnti d'aria, ecc., ho trovato che nelle caverne dell'Italia meridionale, questi fenomeni, in ben otto aspetti diversi, sono presenti in pressochè tutte le grotte, purchè umide; in tutte le grotte sia interne che costiere. Ma c'è di più: mentre si invocano fenomeni chemiogenetici, che non sono di mia competenza, ricorderò il seguente fatto: avendo istituito una Stazione Biologica Sperimentale Sotterranea nel sottosuolo di Napoli, approfittando dei locali di un teatro romano che risale a 20 secoli or'sono, ho notato che una sua saletta, completamente rivestita di tufo (« opus reticulatum »), è tutta tappezzata da queste formazioni vermicolari, che danno a tutte le pareti l'aspetto, appunto, di pelle di leopardo, come si può veder bene nelle riproduzioni in gesso che presento.

Il locale in parola, di origine artificiale, è ormai naturalizzato. E' però tutto in tufo, e nel materiale esaminato, delle formazioni vermicolari, ho trovato, come già detto, vari elementi eterogenei, fra i quali cisti protozoarie ed uncini di parassiti umani (tenia echinococco).

In conclusione, desideravo quindi ricordare: la frequenza del fenomeno per lo meno in quasi tutte le caverne dell'Italia meridionale, e perfino in ambiente di antica origine artificiale, non calcareo, bensì tufaceo. La Stazione Biologica Sperimentale Sotterranea di Napoli, se qualcuno avesse interesse di esaminare il fenomeno in questione, è a disposizione di chiunque.

Presidente GÈZE:

Je remercie le prof. Parenzan de nous avoir présenté ce problème, peut-être réduit, mais tout de même « taquinant » pourrions-nous dire en français, car plusieurs d'entre nous, et M. Renault en particulier, s'étaient déjà intéressés à lui, en proposant des explications, mais, à vrai dire aucune qui soit absolument certaine. Je crois que les exemples que vient de nous montrer le prof. Parenzan sont encore plus remarquables que ce que nous pouvons avoir vu dans les cavernes françaises. Ses formes bulleuses, notamment, ainsi que les peaux de tigre ou de léopard, sont tout à fait saisissantes. Je donne la parole au prof. Pasa.

PASA: Accennerò solo ad alcuni particolari morfologici che si ritengono dipendenti dai rapporti: erosione-natura dei riempimenti.

In un condotto originariamente riempito da depositi variamente permeabili, che schematizzeremo: ciottoloso-sabbiosi alla base, limoso-argillosi, croste stalagmitiche, guano, si nota come il profilo originario della grotta si modifica sensibilmente a seconda della variabile circolazione delle acque acide.

In corrispondenza della stalagmite e delle argille si conserva il profilo originario del condotto; sopra e sotto si formano due nuove ellissi dovute a corrosione chimica. La demolizione del riempimento mette allora in luce un cerchio rilevato, dove la roccia appare indurita per riempimento calcitico dei vuoti, com'è stato indicato in precedenza.

Nei sedimenti ad alto contenuto organico (guano) che conferisce alle acque una notevole acidità, si osserva spesso una secondaria alterazione delle superficie di grotta. L'aggressione chimica sembra procedere dal deposito verso la roccia, penetrando nelle leptoclasti, isolando dei blocchi calcarei che si rovesciano lentamente nel riempimento. In queste zone della grotta talvolta non si riesce più a rilevare l'originaria stratigrafia che simula una crioturbazione (e non saprei dire se questo fenomeno possa assumere tale denominazione).

In depositi argillosi con alto contenuto organico (tipici gli strati a guano) la sezione di grotta viene generalmente modificata per effetto della corrosione, assumendo nuovi profili, dove cerchioni e truogoli sono spesso sincronizzabili con livelli di sedimenti databili conservati in certe zone non denudate da successivi dilavamenti.

A fenomeni di questo tipo sono in realtà riconducibili, a nostro giudizio, molti profili di grotta che in letteratura sono attribuiti a riduzione di portata o a erosione differenziale.

Presidente GÈZE:

Je remercie le prof. Pasa, qui vient de nous montrer encore une influence du comblement sur le type de creusement et, cette fois-ci, avec le rôle des organismes, avec le rôle du guano, etc. Peut-être, malheureusement, n'avons-nous pas dans cette réunion suffisamment de biologistes. Nous avons beau étudier un point de vue physico-chimique, il est incontestable que les relations avec la vie sont très grandes sous terre comme à l'extérieur. Un bel exemple vient de nous être exposé; je souhaite qu'il soit développé ultérieurement. Peut-être d'ailleurs, lors de son rapport général, M. Pasa reviendra-t-il là-dessus. Je donne la parole au dr. Cigna.

CIGNA: Vi è una certa evidenza, a proposito della granulometria dei depositi in grotta, che la distribuzione delle particelle che li compongono, in base alle loro dimensioni, sia data da una relazione del tipo:

$$D = D_1 x^{-a}$$

dove D è il diametro medio delle particelle alla distanza x del punto di origine del deposito, D₁ è il diametro medio delle particelle alla distanza unitaria da tale origine ed a è un coefficiente a priori ignoto.

Se ora prendiamo i logaritmi di ambo i membri della relazione sopra scritta, otteniamo:

$$\ln \frac{D}{D_1} = -a \ln x$$

cioè si trova una relazione lineare tra il logaritmo del diametro medio delle particelle dei punti del deposito ed il logaritmo della distanza di tali punti dal luogo d'origine del deposito.

Se questa legge, che sembra valere per i depositi eolici ed alluvionali all'esterno, è valida anche all'interno delle grotte, la relazione ora scritta può costituire un aiuto per gli studiosi di preistoria o comunque per chi è interessato a determinare la posizione del luogo d'origine di un deposito.

Infatti riportando in diagramma su carta logaritmica i diametri medi delle particelle di vari punti del deposito in funzione delle distanze del rispettivo punto da vari presunti luoghi d'origine si può giudicare, in base al maggior allineamento dei punti

del diagramma lungo una retta, quale dei luoghi d'origine presunti ha maggiori probabilità di essere quello vero.

E' da notare che ai fini di questo calcolo non occorre conoscere nè D₁ (altrimenti sarebbe già determinata la posizione del luogo d'origine) nè il coefficiente a. Altre notizie su questo metodo sono state riportate nella comunicazione « Solid Particle Transport by Fluid Streams » presentata a questo Symposium.

Presidente GÈZE:

Je remercie M. Cigna de son exposé, qui nous fera réfléchir. J'ajouterai qu'il est tradition de considérer qu'une science n'existe que quand il y a des mathématiques. Nous trouvons les mathématiques en spéléologie; nous pouvons donc maintenant être rassurés: nous faisons bien de la science! Je donne la parole à M. Choppy.

CHOPPY: Je désire faire quelques remarques:

1° - à propos de l'influence du dépôt sur le creusement, j'ai observé deux ou trois fois des cannelures de corrosion qui, au lieu d'être hémicylindriques, étaient en forme de V; chaque fois, ces cannelures se poursuivaient sous l'argile.

2° - pour le « sable » calcaire des cavernes, je suis surpris que l'on admette qu'il puisse provenir seulement de la dégradation mécanique des concrétions, car on trouve très rarement les termes intermédiaires de cette destruction, galets et graviers; il faut plutôt penser à des origines multiples de ces sables: on connaît des micro-pisolithes, de diamètre inférieur à 1 mm, qu'il est donc possible de confondre avec un sable; une fois, j'ai trouvé dans une grotte, à proximité d'une faille, un sable calcaire; il s'agit évidemment du rassemblement d'éléments broyés, très fins.

3° - Voici maintenant une observation plus générale: Comment ne parle-t-on pas plus souvent du remplissage qui se rencontre dans ce que l'on nomme, de plus en plus, le *réseau de fentes*, par opposition au *réseau de conduits*? On y trouve du sable, mais il est constitué surtout d'argiles.

Ce remplissage est très important car, — inutile d'en dire plus que les têtes de chapitre —,

— il rebouche une grande partie des fissures, que l'on considère très souvent comme largement ouvertes, ce qui intéresse évidemment l'hydrologie du karst,

— il est souvent repris par l'érosion, et on le trouve, comme sédiment secondaire, dans les cavités,

— enfin, mais cela VAN den BROEK l'avait déjà dit, il présente une importance hygiénique, puisqu'il peut assurer un filtrage.

Presidente GÈZE:

Je remercie M. Choppy d'avoir attiré notre attention sur quelques problèmes, auxquels M. Renault répondra sans doute dans la séance de clôture. Je donne la parole à M. Barral.

M. L. BARRAL: Mesdames et Messieurs,

Dans un brillant exposé relatif aux remplissages des grottes M. Renault a fait état de remaniements verticaux.

Je voudrais, pour mon compte, insister plus particulièrement sur ce point et m'efforcer de définir quelques facteurs susceptibles de produire ces remaniements. A mon sens, il convient surtout de retenir: la gravité, la dissolution, la corrosion, la succion.

Le géologue doit alerter l'archéologue centré sur ses recherches stratigraphiques et lui rappeler que l'état actuel des choses n'est pas l'état originel.

Au cours de fouilles pratiquées dans divers gisements holocènes: grotte de la Madeleine (Hérault), grotte Barriéra (Alpes-Maritimes), Pertus II (Basses-Alpes), j'ai eu

l'occasion de me rendre compte que des perturbations, d'ordre divers, subies par les sédiments étaient nécessairement imputables à des actions exercées postérieurement à leur dépôt.

Il ne s'agit pas d'enfoncer des portes ouvertes, en donnant une simple nomenclature des agents susceptibles de modifier la nature physique ou chimique des sédiments, la position relative des éléments composants sous l'effet de la gravité ou de forces tangentielles (microtectonique). Sans être géologue averti, on sait que rien dans la nature n'est immuable.

Il s'agit plutôt de marquer combien ce brassage incessant, jusqu'à réduction du dépôt initial à l'état squelettique, est de nature à rendre malaisé le repérage d'une couche s'étendant à l'ensemble du gisement. Le passage entre deux secteurs contigus, mais individualisés (compris entre des blocs éboulés de la voûte), laisse déjà planer un doute sur la permanence de certaines couches, en dépit d'éventuelles analyses granulométriques, et par conséquent sur le raccordement de l'ensemble; de proche en proche les corrélations risquent de devenir plus problématiques. Il faut encore noter que la répercussion des facteurs de troubles n'est pas uniforme sur l'ensemble d'un gisement, leurs effets peuvent varier considérablement selon les secteurs envisagés.

Je m'arrêterai plus particulièrement aux rapports entre le substratum et les dépôts qu'il supporte. Le sol en place peut-être physiquement homogène ou composé d'éléments plus ou moins jointifs. Le remplissage comprend des particules diversement calibrées; elles vont du plus fin au plus gros (série type: argile, sable, gravier, cailloutis, blocaille, blocs).

Je n'ai pas eu l'occasion de fouiller des gisements holocènes dont le fond ne fasse peu ou prou office de passoire.

Les fonds sur lesquels reposent les remplissages du Pertus II et de la Madeleine sont parfaitement identiques à celui de Barriéra. Dans chaque cas, nous avons pu passer à l'étage inférieur par des étroites fissures et nous rendre pertinemment compte que les sédiments avaient emprunté les mêmes voies pour rejoindre le niveau le plus bas. La cadence de chute est fonction de la nature du remplissage, de la dimension moyenne des éléments constitutifs, du nombre et de la praticabilité des voies offertes. D'où variations concomitantes quant à l'épaisseur et à la composition des portions de remplissage situées à la verticale. Ce phénomène est d'ailleurs très sensible au contact des parois; à ce niveau le plancher présente des fissures plus larges (les plus gros éboulis glissant contre les parois) et il en résulte une confusion de strates le plus souvent irrémédiable.

Quelquefois, et c'est le cas à la Madeleine, des témoins d'un remplissage souvent synchrone de celui en place (à en juger par les poteries qu'il contient) sont collés le long des parois (hauteur moyenne: 1,50 m à Madeleine). On veut y voir d'ordinaire des vestiges de fouilles antérieures; il serait plus logique, en général, d'y reconnaître un stade d'arrêt dans l'abaissement progressif des sédiments jusqu'au niveau actuel.

À la Madeleine le processus de vidage de la grotte se trouve encore accéléré. Le seuil est sensiblement situé au sommet d'un cône d'éboulis qui vient se terminer en bordure d'une pièce d'eau presque immobile alimentée par une rivière.

Cette eau, à niveau variable selon les saisons, active la succion des sédiments et la dissolution de la blocaille de base.

Lors des fouilles entreprises en mars 1955, après de longs tâtonnements nous trouvâmes un lambeau en place reposant sur deux larges dalles, protégé à la partie supérieure par deux blocs effondrés.

Voilà un secteur qui présentait toutes garanties et où les couches étaient impeccablement conservées.

Pour mener la fouille, à mesure de l'avancement des travaux nous avons été contraints de nous engager à mi-corps sous la dalle effondrée. Pour comprendre notre légère appréhension, il n'est pas inutile de dire que nous ne pouvions reconnaître les

limites exactes de cette dalle, ni surtout la valeur de ses points postérieurs de sustentation. Dans cette position inconfortable on s'aperçut qu'en réalité le lambeau était une banquette d'un mètre de largeur, suivie d'un entonnoir de succion entièrement vide. Les couches stratifiées se voient d'ailleurs sur le pourtour de l'entonnoir et se continuent sur l'arc de cercle symétrique au nôtre. Ainsi une portion de remplissage peut être sujette non seulement à son amenuisement mais encore à sa disparition totale. Les exemples pourraient être multipliés, il me semble que ce dernier est suffisamment probant.

Dans son excellente publication relative aux fouilles préhistoriques, A. LEROI GOURHAN nous dit « la stratigraphie est, à l'inverse de ce qu'on imagine souvent, plus nécessaire et plus fructueuse à mesure que les couches sont plus récentes. Un beau sol moustérien est rare, un sol aurignacien ne l'est guère moins; au Magdalénien, on trouve déjà souvent les surfaces mêmes sur lesquelles l'homme a traîné les pieds, mais, à partir du Néolithique et jusqu'au Moyen-Age, on peut réellement vivre l'histoire d'un terrain, d'autant plus aisément que la géographie actuelle apporte une base de lecture encore fidèle ».

Cette opinion est parfaitement défendable en ce qui concerne les gisements holocènes de plein air, il semblerait qu'elle le soit moins pour ce qui est des habitats sous grotte. Bien entendu les sols existent, mais leur reconstitution met la sagacité du préhistorien à rude épreuve. Sauf cas exceptionnel, où la roche en place forme un tout continu sur lequel les sédiments sont conservés en bon ordre, il semble préférable de cantonner son étude stratigraphique à quelques secteurs privilégiés.

Presidente GÈZE:

Je remercie M. Barral de son exposé qui nous a montré le point de vue du préhistorien, de l'archéologue, devant les complexités que nous essayons d'étudier.

Personne ne désirant plus faire d'observations concrètes à l'exposé de M. Renault, j'ajouterai quelques mots d'observations personnelles.

Une première question, qui nous inquiète un petit peu tous, d'après ce qu'on vient de voir, est celle des sables calcaires, que l'on appelle encore des « calcarénites ». Il est incontestable que le problème de leur genèse est posé mais non résolu. Pour ma part, là où j'en ai vu, et en particulier avec M. Renault dans la grotte de Moulis (où se trouve une « Salle du sable »), je me suis demandé s'il ne s'agissait pas, dans une certaine mesure tout au moins, de dépôts comparables à ceux que l'on voit souvent dans des fonds de gours, c'est-à-dire une sorte de sable formé de grains de calcite, parfois coalescents, parfois isolés et qui restent alors meubles. Cela supposerait que les salles dans lesquelles nous voyons les comblements actuels auraient été, à une certaine époque, soit totalement remplies par l'eau, soit tout au moins remplies dans une proportion non négligeable, même si des remaniements ultérieurs expliquent des accumulations particulièrement importantes. Mais, si cette hypothèse est exacte, il est alors curieux qu'il n'y ait pas davantage de concrétionnements en liaison avec l'accumulation sableuse.

Pour la question des « pendants » et des « coupes », c'est-à-dire de ces formes en bosses et en creux qui se trouvent aux voûtes des cavernes, j'ai trouvé extrêmement intéressante l'explication proposée par M. Renault, d'après laquelle c'est au dessus d'un comblement argileux que leur genèse serait possible. J'ajouterai que l'idée de M. Renault me semble étayée par une observation du prof. LEHMANN dans les Karsts de Cuba, de la Jamaïque et autres régions tropicales humides. Les cavernes y présentent souvent un large comblement argileux au dessus duquel on trouve des plafonds à « pendants ». Ceux-ci, au moins d'après les photographies que j'en connais,

paraissent plus grandioses que tous ceux de France, où nous en avons pourtant de spectaculaires. Je pense qu'en Italie il en est de même.

Je terminerai par une remarque en complément à l'intervention de M. Corbel. Celui-ci a noté qu'en général, en climat sec, les calcaires forment des reliefs; en climat humide, les calcaires sont, au contraire, corrodés plus profondément et ont par conséquent tendance à donner une morphologie en creux par rapport à celle des roches non calcaires. Cette observation est tout à fait incontestable et importante. Je l'ai faite moi-même très souvent, mais je crois cependant qu'il convient de ne pas en tirer une loi absolue. Il ne faut pas oublier, en effet, le cas des reliefs tout particulièrement spectaculaires qui constituent les « karsts à pitons », ou « Kegelkarst », dans les régions comme Cuba ou la Jamaïque, dont je parlais il y a un instant. Bien que situées dans des contrées très humides et qu'elles soient perforées par des galeries très nombreuses et fort compliquées quelquefois, les masses calcaires se montrent tout à fait en relief et dominant tout le paysage.

M. Trombe demandant encore la parole, j'ai le plus grand plaisir à la lui accorder puisque notre horaire nous le permet.

TROMBE

Il s'agit d'une observation au sujet des remplissages. Je suppose qu'il est implicite, dans tout ce qui a été dit, que l'on tient compte du niveau de remplissage dans un réseau souterrain.

Dans une montagne existent des galeries qui sont comme ceci et, qui sont de plus en plus, avec, éventuellement, des résurgences étagées. Les remplissages de la galerie « a », sont différents de ceux de la galerie « b » et de ceux de la galerie « c », qui, elle est, par exemple, active. Et je voudrais insister sur l'intérêt des remplissages des galeries moins fossiles, comme la galerie « b », ou de ceux des galeries actives qui sont très remaniés. Dans une même galerie on peut d'ailleurs trouver profils avec sédiments étagés. J'en ai des exemples dans les Pyrénées, dans des grottes à long parcours horizontal, avec seulement des galeries d'une dizaine de mètres de haut. On trouve, dans les planchers surélevés, des remplissages qui sont tout à fait différents du remplissage actuel des rivières. Il y aurait intérêt à essayer de différencier ces divers étages, et si cette idée est implicite dans tout ce qui a été dit, parce qu'on a, en réalité parlé beaucoup des remplissages des galeries fossiles beaucoup plus que des remplissages de galeries actives, je voudrais qu'on précise plus nettement, les étages de galerie, leurs remplissages ne refléteront pas les mêmes transports. En particulier, si le sol superficiel a été, progressivement, balayé, débarrassé de certains dépôts, on peut trouver dans les galeries fossiles des témoins de ces dépôts, par exemple, les remplissages de quartz de la grotte de *Gournier*, (Isère), qui sont des remplissages-témoins des niveaux qui n'existent plus sur la surface des massifs. Je pense qu'il faudrait insister sur ce point, parce que c'est dans les galeries fossiles que le remplissage est le plus intéressant pour le géologue, sinon encore plus pour l'archéologue. Parfois également, ces remplissages-là se trouvent sous des croûtes stalagmitiques importantes, dans les galeries fossiles où le régime de l'eau n'existe plus; et où il n'y a plus de transports par l'eau, importants.

Un autre point se rapporte à la communication de ce matin: il s'agit de l'aragonite, et je voulais poser une question, d'accord avec M. Gèze, d'ailleurs, à ceux qui ont dit que la formation d'aragonites était favorisée par la présence de sel de strontium, si je me souviens bien. En particulier de carbonate. Il existe du strontium, nous en avons convenu avec M. Gèze, partout, puisque c'est un moyen de dater les concrétions, seulement, il en existe fort peu. Dans les cas où on a trouvé de l'aragonite, le titre en strontium serait-il plus élevé que dans le cas normal ?

Presidente GÈZE

Contrairement à ce qui a été établi comme usage, je me permets de demander aux personnes qui ce matin ont pris la parole sur ce sujet de bien vouloir répondre brièvement à M. Trombe, en précisant si l'on a une teneur de strontium vraiment importante, ou bien seulement une quantité faible associée à l'aragonite.

SKRIVANEK: Ich habe durch chemische unseren Analysen festgestellt, dass das Strontium in Kalksteinen und Aragoniten enthalten ist. Der Prozess der Kristallisierung des Aragonits aus kalten Lösungen ist klar dass Strontianit zuerst kristallisiert. Dieses Strontianit, welches rhombisch ist, bildet erste Kristallisationszentrum, und nach diesem Zentrum kristallisiert das CaCO_3 , nicht in ditrigonal Symetrie aber in rhombischer Symetrie, das ist Aragonit.

Der erste Fall ist Strontianit in Zentrum dieses Aragonitkristalls und der zweite Fall ist Strontianit in der Mischung von 1% SrCO_3 und 99% CaCO_3 .

WARWICK: In answer to Professor Trombe's question, the North of England example that I quoted is given in Professor K. Dunham's Geological Survey Memoir on the Northern Pennine Orefield, which quotes actual analyses. Unfortunately the mine, in which the aragonite was found, in a natural cavern, is no longer open. The paper I quoted from, by Wray and Zeller is in the Journal of Sedimentary Petrology for 1956. These authors carried out strictly controlled laboratory experiments and they very definitely produced aragonite, at low temperatures in the presence of strontium. I cannot remember whether they gave a precise figure for the actual strontium content in the formation. I believe that it acted more in a catalytic fashion than contributing directly to the formation of aragonite.

Presidente GÈZE:

Messieurs, puisque l'ordre du jour est terminé, la séance est levée.

T E R Z A S E D U T A

Mattino del 4 Ottobre 1960 in VARENNA

PRESIDENTE : Hubert Trimmel

RELATORE UFFICIALE : Herbert W. Franke

Presidente TRIMMEL

Das Präsidium unseres Symposiums hat mich eingeladen, bei der heutigen Vormittagsitzung den Vorsitz zu führen. Ich danke für die grosse und unverdiente Ehre, die mir dadurch zuteil geworden ist, und ich danke vor allem auch den Herren Professoren Tongiorgi und De Lavaur, die mich bei dieser Aufgabe heute unterstützen werden.

Der offizielle Berichterstatter des heutigen Vormittags ist Herr Dr. Herbert Franke, der uns ein Referat über die Methoden der Altersbestimmung an Höhlensedimenten halten wird. Ich bitte Herrn Dr. Franke, das Wort zu ergreifen.

HERBERT W. FRANKE

DATIERUNG DER HOEHLensedimente

1. Speläologie als Alterswissenschaft
2. Relative und absolute Datierung
3. Die Datierung organischer Einschlüsse
4. Bestimmung der Paläotemperaturen mit Aragonit
5. Absolute Datierungsmöglichkeiten mit Jahresschichten
6. Die Isotopenmischung als Indikator
7. Die Radiokarbondatierung
8. Ausblick

1. *Speläologie als Alterswissenschaft*

Ein Grossteil der Speläologie ist Alterswissenschaft - das heisst, sie beschäftigt sich mit der Rekonstruktion und Analyse von Ereignissen, die auf vorgeschichtliche Zeiten zurückgehen. Die Höhlen haben zuerst als Fundplätze von Artefakten und Fossilien der Prähistorik und Paläontologie unschätzbare Dienste geleistet, später entdeckte man sie als Hilfsmittel für die Erforschung der jüngeren geologischen Vergangenheit und zuletzt als Schlüssel zum Vorzeitklima.

Wie auch an der Erdoberfläche, ja vielleicht noch mehr als dort, spiegelt sich in den Schichten der Höhlenablagerungen das Schicksal ihrer Umgebung. Aus der Art des Sediments kann man auf die Geschehnisse schliessen, die zu seiner Bildung geführt haben. So deutet Rollschotter auf bewegtes Wasser, Blockwerk auf Versturz, Frostboden auf Eiserfüllung, Lehm auf jene komplexen, von Bögli¹⁾ untersuchten Vorgänge, die zu seiner Produktion führen, Sinter auf Lösungs- und Ablagerungsvorgänge unter den bekannten Bedingungen, mit denen wir uns noch beschäftigen werden, usw. Nach und nach versuchte man, diese qualitativen Informationen zu differenzieren und

gelangte zu Ergebnissen, die zwar nur grobe Einschätzungen der klimatischen und hydrografischen Grössenwerte brachten, aber immerhin die erste Näherung zur Reproduktion von Quantitäten darstellten. So kann man z. B. das spezifische Gewicht und die mittlere Grösse von Rollschotterstücken als Anhaltspunkte für die Bewegungsenergie des Flusslaufes verwenden oder die Beschaffenheit von Bruchschutt nach Lais²⁾ als Hinweis für die Temperatur zur Zeit des Abbruchs — je kleiner die Stücke sind, um so grösser war der damalige Wärmegrad.

Die Sedimente geben aber noch mehr Aufschluss. Vorausgesetzt, dass sie sich schichtenweise abgesetzt haben, liefern sie auch gleich den Kalender jenes Zeitraums mit, in dem sie sich abgelagert oder zum letzten Mal umgelagert haben. Er verrät uns die Aufeinanderfolge jener Ereignisse, die für das Absetzen der einzelnen Schichten verantwortlich waren.

Diese vielversprechenden Anfänge liessen weitere Untersuchungen als wünschenswert erscheinen. Deren vordringliche Ziele waren: neue Folgerungsmöglichkeiten aufzudecken, qualitative Angaben in quantitative umzuwandeln und aus dem relativen Schichtenkalender ein Mittel absoluter Datierung zu machen.

Dem erstgenannten Ziel, dem Erschliessen des bisher unbeachteten Beobachtungsmaterials für den Einsatz als Indizien für Vorgänge aus der Vergangenheit, kommt man am besten dadurch näher, dass man alle Erscheinungen, deren Spuren sich in der Höhlen erhalten, genauestens studiert. Eine solche Erscheinung ist die Kalkablagerung aus der Lösung, die Sinterbildung. So haben etwa Berechnungen von Bögli³⁾ gezeigt, dass jene Konzentration von Kohlendioxyd, die zur Lösung nennenswerter Kalkmengen und damit auch zur Sinterbildung notwendig sind, ohne die Mitwirkung von Pflanzen oder zumindest der im Humus auftretenden Lebewesen nicht erreicht wird. Mit anderen Worten: Sinter kann sich nur bilden, wenn die über der Höhle befindliche Oberfläche Vegetation trägt. So deuten die Tropfsteinreste in der Dachsteinmammuthöhle darauf hin, dass die heute darüberliegende öde Steinwüste einst eine Pflanzendecke trug.

2. Relative und absolute Datierung

Schon beim Einzelereignis taucht der Wunsch nach einer zeitmässigen Einordnung auf. Die primitivste Art einer Zeitangabe ist die Unterscheidung «früher» oder «später» als ein anderes Ereignis. Trotzdem besitzt sie ihren Wert, denn die naturwissenschaftliche Analyse stützt sich meist auf kausale Gesetzmässigkeiten, und daher kann es durchaus bedeutungsvoll sein, die Reihenfolge zweier Erscheinungen festzustellen. Gelingt es, in diese Kette noch weitere Glieder einzufügen, dann haben wir bereits eine erste Information über die Entwicklung der Höhle, dazu aber noch etwas: die Basis einer relativen Zeitskala. Die erwähnten Ereignisse kann man als Zeitmarken gebrauchen, auf die man alle Phänomene, die eingeordnet werden sollen, zu beziehen versucht. Bekannte Beispiele sind das Spektrum der Eis- und Zwischenzeitalter von der Günz- bis zur Würmeiszeit und die prähistorischen Kulturepochen vom Abbevillien bis zum Magdalénien.

Solche relativen Zeitskalen haben leider einen Nachteil: Sie gelten nur für einen beschränkten Rahmen. Dieser Rahmen kann klein sein — z. B. nur einen einzigen Höhlenraum umfassen, in dem man separierte Sedimentationsreste einiger Ueberschwemmungen gefunden hat; dann lässt sich jedes Ereignis, dessen Spur sich in der Schichtenfolge abzeichnet, relativ zu diesen Ueberschwemmungen datieren. Manchmal ist der Rahmen aber auch gross, unter Umständen kann er die ganze Erde umfassen — nämlich dann, wenn die zugrundeliegenden Erscheinungen weltweite Spuren zurückgelassen haben. Ein Beispiel ist etwa die Sonnenflecktätigkeit, die sich in der Baumringdicke auswirkt.

Eine relative Zeitskala bewährt sich um so besser, je umfassender sie anwendbar

ist und je kontinuierlicher sie ist. Besser als Einzelereignisse wie Ueberflutungen oder Eisbedeckungen eignen sich dazu ununterbrochen verlaufende quantitativ erfassbare Ereignisse wie etwa der Temperaturgang, der überdies eine direkte Folge weltumspannender Erscheinungen ist. Er drückt sich in der Strahlungskurve von Milankovitch aus⁴⁾.

Gelingt es, wie in diesem Beispiel, von zwei verschiedenen Ausgangspunkten zum Verlauf einer und derselben Grösse zu kommen, dann sind wir in der Lage, zwei relative Zeitskalen zu parallelisieren. Dazu braucht man einige Abschnitte, an denen die beiden Kurven eindeutig übereinstimmen. Die restlichen Bereiche können dazu dienen, um fehlende Abschnitte zu ergänzen, Unsicherheiten auszumerzen, Fehler festzustellen usw. Je mehr relative Zeitskalen vereinigt werden können, um so genauer wird das Bild, das sie vermitteln.

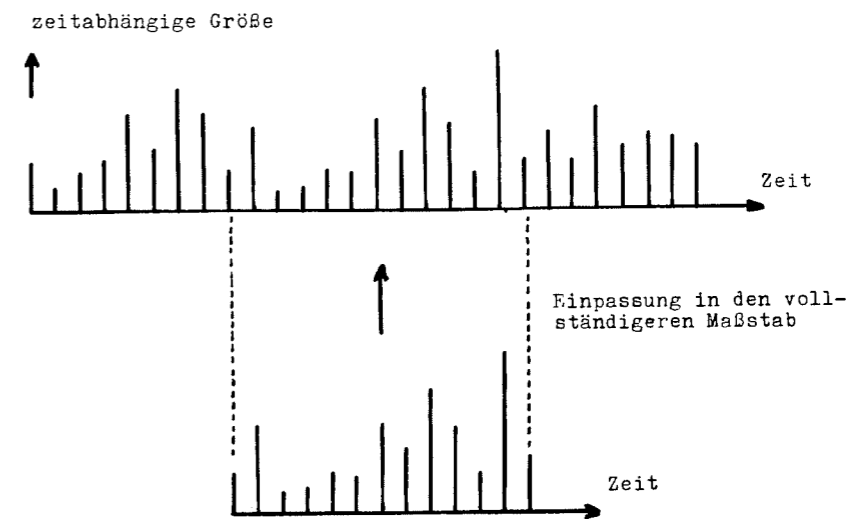


Fig. 1 - Der Vergleich zweier Zeitmarkenskalen.

Einige Erscheinungen hinterlassen Spuren, deren Alter mit dem normalen Zeitmass bestimmbar ist. Ausser diesen sind noch alle jene Erscheinungen absolut datierbar, deren Gleichzeitigkeit mit dem Entstehen dieser Spuren feststeht. Finden wir also z. B. einen Knochensplitter in einer Sinterschicht, deren Alter bekannt ist, dann ist auch dessen Alter bekannt, da die örtliche Koinzidenz der Ereignisse in diesem Fall auch die zeitmässige bedingt. Beispiele für absolute Datierungsverfahren sind die Radiokarbonmethode, die wir noch eingehend behandeln werden, weiter die für Höhlen leider nicht brauchbare Baumringchronologie und der Bändertonkalender, für den wir in manchen Höhlen, z. B. im Hölloch (Muotatal), etwas Entsprechendes besitzen. Wie weit Höhlenlehmschichten indes wie die Tonschichten als Jahresmarken anzusprechen sind, steht noch nicht fest.

3. Die Datierung organischer Einschlüsse

Trotz aller Neuerungen haben die klassischen Methoden der Altersbestimmung von Sedimentschichten ihre Gültigkeit behalten — die relative Einstufung in Kulturepochen aufgrund von Artefakten und eine Grobeinschätzung des Klimas mit Hilfe von Ueberbleibseln wärme- und kälteliebender Tiere. So deutet beispielsweise diehältnisse. Diese Methode ist von A. Pasa in Italien, F. Heller in Deutschland, D. Janossy in Ungarn und K. Kowalski in Polen auf eine quantitative Basis gestellt worden. Dabei

wird die prozentuale Aenderung des Anteils an Kleinsäugerknochen von Schicht zu Schicht bestimmt. Je nach dem Auftreten der an tiefere oder höhere Temperaturen gebundenen Tiere unterscheidet man Wärme- und Kältezeiten. Ein übersichtliches Referat darüber stammt von Kowalski⁵⁾).

Eine Methode, deren Anwendung in Höhlen nichts im Wege steht, ist die Pollenanalyse. Da sie auf verhältnismässig einfache Art gute Ergebnisse zeitigt, wäre es zu wünschen, dass man sie viel häufiger anzuwenden versucht.

Ueber eine gutgelungene Ableitung berichten Knuchel und Rupp⁶⁾. Die Beatushöhle bei Interlaken enthält gebänderte Ton- und Sandlagen, auf denen Stalagmiten von über einem Meter Höhe sitzen. In den darunterliegenden Sandmengen befinden sich Pollen von Kiefern und nicht näher bestimmten Kräutern. Pollenanalytische Untersuchungen der Umgebung⁷⁾ beweisen, dass die Kiefer dort vor etwa 11000 Jahren auftauchte und erst vor 8500 Jahren die Hasel eindrang. Da in den Höhlenablagerungen kein Haselpollen vorkommt, müssen die Schichten aus diesem Zeitbereich stammen und die Stalagmiten noch jünger sein.

Einige chemische Methoden, die auf der Anreicherung von bestimmten Atomen in Knochen beruhen, haben wenig Bedeutung erlangt. Die bekannteste unter ihnen, der Fluortest, beruht darauf, dass das Kalziumphosphat der Knochensubstanz Fluor bindet, das mit Sickerwasser antransportiert wird. Der Gehalt an Fluor wird als ungefährtes Mass für das Alter gewertet. Die Methode ist aber in Kalkhöhlen nicht brauchbar, da das Höhlenwasser kein Fluor enthält.

4. Bestimmung der Paläotemperaturen mit Aragonit

Alle diese Verfahrensweisen beschäftigen sich mit datierbaren Einschlüssen organischen Ursprungs. Sie dienen vor allem der Einstufung von mechanisch abgelagerten Schichten, während sie bei den aus Lösungen abgeschiedenen Kalken, dem Höhlensinter, nur in Ausnahmefällen brauchbar sind. Gerade die physikalisch-chemische Natur des Auskristallisationsvorgangs, die in vielfacher Hinsicht von der klimatischen Situation abhängt, lässt bei Sinter auf gute Aussichten für die Analyse der Bildungsbedingungen und für Datierungen hoffen.

Eine Eigenschaft des Kalksinters, die Rückschlüsse auf die Bildungsbedingungen erlaubt, ist seine Fähigkeit, sich in zwei Kristallformen ausscheiden zu können, in der hexagonalen Form Kalzit und in der rhombischen Form Aragonit. Bei tiefen Temperaturen entsteht Kalzit, bei höheren Temperaturen Aragonit.

Der Schauplatz eines wenig bekannten, aber aufschlussreichen Versuchs auf dieser Basis waren die westlichen Vereinigten Staaten von Amerika⁸⁾. Dort wurden 29 Höhlen auf ihren Gehalt an Kalzit und Aragonit geprüft. Die Entnahmeplätze lagen ausnahmslos so tief, dass an ihnen kein jahreszeitlicher Temperaturgang herrschte; wie bekannt ist, stimmt die konstante Temperatur an solchen Stellen mit der Jahresdurchschnittstemperatur der Aussenwelt überein. Das Ergebnis war eine Einteilung in drei Zonen:

1. Zone — Höhlen, in denen nur Aragonit auftritt und in denen sich Kalk auch heute noch als Aragonit ausscheidet;
2. Zone — Höhlen, in denen Kalzit und Aragonit auftreten, sich heute aber nur noch Kalzit bildet; der Aragonit sitzt dort unter dem Kalzit;
3. Zone — Höhlen, in denen nur Kalzit auftritt und in denen sich auch heute nur Kalzit bildet.

Wie zu erwarten war, befinden sich die aragonithaltigen Höhlen im Süden, die kalzithaltigen Höhlen im Norden. Diese Feststellung lässt sich sogar quantitativ fassen: Ein Vergleich zeigt, dass die Grenzen zwischen diesen Zonen mit den heutigen Isothermen der Jahresdurchschnittstemperatur übereinstimmen, und zwar liegt die Grenze zwischen der ersten und der zweiten Zone auf der 16° C- Isotherme und die Grenze zwischen der

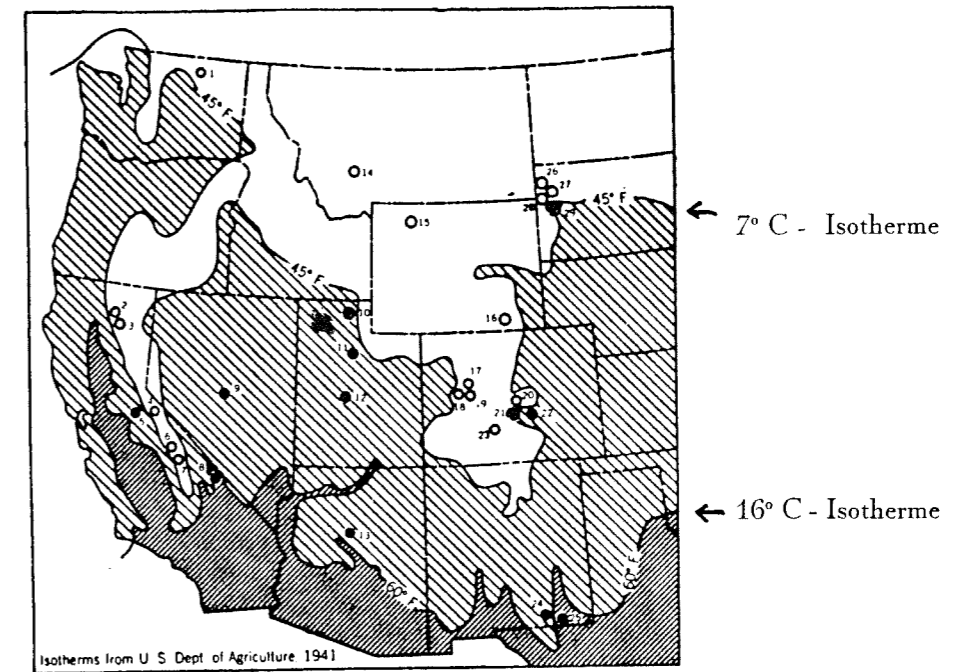
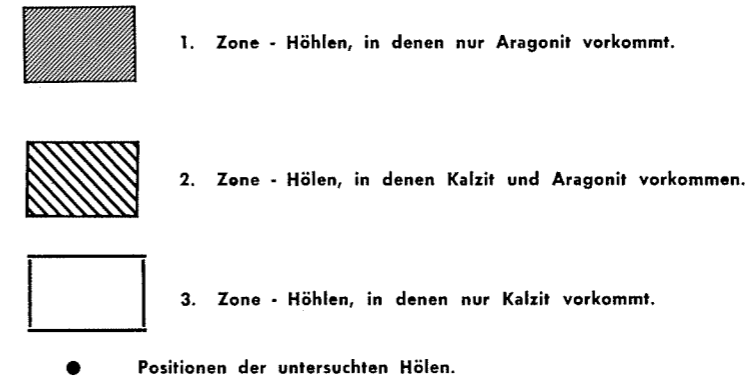


Fig. 2



zweiten und der dritten Zone auf der heutigen 7° C-Isotherme. Das lässt einige Schlüsse zu:

a) Aragonit bildet sich unter den übrigen in Höhlen normalerweise zutreffenden Bedingungen bei Temperaturen oberhalb von 16° C.

b) In der ersten Zone herrschten stets Durchschnittstemperaturen über 16° C und in der dritten Zone solche unter 16° C. In der zweiten, der Zwischenzone, lag die Durchschnittstemperatur zuerst oberhalb von 16° C, später sank sie auf Werte unterhalb von 16° C. Das heisst:

c) Früher folgte die 16° C-Isotherme dem Verlauf der heutigen 7° C-Isotherme. Eine Ueberlegung, auf die wir gleich zu sprechen kommen werden, machte

wahrscheinlich, dass alle untersuchten Ablagerungen nach der letzten Eiszeit entstanden. Nach Flint⁹⁾ gab es seither nur eine Warmzeit im Zeitraum vor ungefähr 5000 Jahren. Die Aragonitvorkommen im Zwischengebiet dürften aus dieser Epoche stammen. Eine genauere Datierung könnte durch die Radiokarbonmethode erfolgen. Die Temperaturdifferenzen, die sich aus pollenanalytischen und paläozoologischen Untersuchungen für Skandinavien den heutigen Werten gegenüber ergaben, sind zwar kleiner als die durch die beschriebene Methode angezeigten, das könnte jedoch darauf zurückzuführen sein, dass im kontinentalen Klima des untersuchten Gebietes grössere Temperaturschwankungen auftreten als im marinen Klima Skandinaviens.

5. Absolute Datierungsmöglichkeiten mit Jahresschichten

Verschiedene Arbeiten über Bodensinterformen haben gezeigt, dass in erster Näherung für die Breitereckung nur die zugeführten Wassermengen, für die Höherreckung dagegen nur die Konzentrationsverhältnisse des Kohlendioxyds und die Zeit, die sie zum Wachsen benötigt haben, massgebend sind^{10), 11), 12)}. Bei konstanten Bedingungen ist beispielsweise die Höhe eines Bodenzapfens ein direktes Mass für sein Alter — vorausgesetzt, dass er seit seinem Anfangsstadium immer in Aktion war.

Diese Einschränkung deutet schon auf eine häufige und schlecht erkennbare Fehlerquelle hin: Pausen in der Entwicklung verfälschen das Ergebnis. Das gilt — sofern man sich nicht mit relativen Werten begnügt — auch für jahreszeitlich bedingte Ruhestadien. Darf man aber kontinuierliche Bildung voraussetzen, dann lässt sich aufgrund der Gesetze, die für die Sinterausscheidung gelten, ein ungefährender Wert berechnen: Coleman und Hicks geben als jährlichen Höhenzuwachs 2,5 mm an. Wenn man bei Abschätzungen mit Hilfe dieses Wertes auch vorsichtig sein und stets auch Ueberprüfungsmöglichkeiten suchen müssen wird, so erweisen sie sich in einigen Fällen doch als wertvoll. Ein Beispiel ist der im vorigen Kapitel behandelte Versuch, Paläotemperaturen mit Aragonit festzustellen. Hier deuteten die Schichtdicken auf postglaziales Alter der Ablagerungen hin und bewiesen somit die Identität der vorgefundenen Warmzeit mit dem Flintschen postglazialen Temperaturoptimum.

Hier ist auch die Stelle, um jene naheliegenden Möglichkeiten zu diskutieren, die der Schichtenaufbau des Sinters und auch mancher lockeren Höhlensedimente bietet: dabei denken wir an die Vorbilder der Baumringchronologie und des Bänder-tonkalenders. Bisher sind aber keine Beispiele dafür bekannt, dass ein solches Vorgehen zu einem Ziel geführt hätte.

Obwohl wegen der Verschiedenheit der örtlichen Verhältnisse keine grossen Uebereinstimmungen zu erwarten sind, könnte sich ein systematischer Vergleich einer grösseren Anzahl von Querschnitten heute noch aktiver Stalagmiten aus einer klimatisch einheitlichen Region lohnen. Jedenfalls besteht kein Zweifel daran, dass es klimatologische Einflüsse sind, die die verschiedenen Färbungen der Schichten hervorrufen. Hier läge eine besondere Aufgabe für den Sedimentologen: festzustellen, welche Ursache diese Ringe haben und ob sie sich einem klimatischen Zyklus zuordnen lassen.

Ich möchte hier noch auf eine weitere prinzipielle Möglichkeit hinweisen, deren Basis der Polymorphismus des kristallisierten Kalziumkarbonats ist. Beim im vorigen Kapitel beschriebenen Versuch hat sich Moore auf Höhlenteile gestützt, die so weit im Inneren liegen, dass in ihnen die konstante Jahresdurchschnittstemperatur herrscht. Für meinen Vorschlag sind dagegen gerade jene Partie brauchbar, in denen sich die jahreszeitlichen Schwankungen noch bemerkbar machen. Sie können zwar gedämpft sein, Voraussetzung aber ist, dass sie sich über den Wert von 16° C hinwegbewegen. Das heisst mit anderen Worten: Für diese Methode kommen nur solche Gegenden infrage, in denen es im Sommer wärmer, im Winter kälter als 16° C ist. Die Folge dieser Temperaturschwankungen ist dann ein jahreszeitlicher Wechsel von Aragonit- und Kalzitschichten.

Beim Erwärmen einer geglätteten, nicht polierten Oberfläche mit zehnpromzentiger Kobaltnitratlösung sollten sich die Aragonitschichten schneller violett färben als die Kalzitschichten. Wenn sich die Schichtendicke auch nur ungefähr an den von Coleman¹⁰⁾ und Hicks¹¹⁾ angegebenen Wert hält, sollten die hervortretenden Streifen mit freiem Auge erkennbar sein. Sie sind Jahresmarken und können abgezählt werden.

6. Die Isotopenentmischung als Indikator

a) Das Verhältnis $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$.

Während man die Prozentanteile der Isotopen in einem Element zuerst für natürliche Konstanten hielt, stellte sich bald heraus, dass fast bei allen physikalisch-chemischen Vorgängen Entmischungen eintraten. Die Entmischungsgrade sind allerdings äusserst gering und nur schwer messbar. Sie hängen von den physikalischen Bestimmungsdaten während der Umsetzung ab und können, wenn der Effekt überhaupt messbar ist, zu deren Rekonstruktion herangezogen werden.

Urey hat auf dieser Basis ein Verfahren zur Bestimmung der Bildungstemperaturen von Meereskalken entwickelt¹³⁾. Dazu zog er die beiden Sauerstoffisotope ^{16}O und ^{18}O heran, deren Mengenverhältnis im gewöhnlichen Sauerstoff 500:1 beträgt. Beim langsamen Absetzen von Kalziumkarbonat aus der wässrigen Bikarbonatlösung erfolgt eine Entmischung, u. zw. so, dass der ^{16}O -Anteil im ausgeschiedenen Bestandteil grösser wird. Dieser Effekt hängt von der Temperatur ab, bei 0° C beträgt das $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ -Verhältnis in der festen Phase 500:1,026, bei 25° C 500:1,022.

Die von 1° C veranlasste Entmischung beträgt demgemäss nur 0,0176 % und die Abweichung jener Grösse, die man messen muss, des durchschnittlichen Atomgewichts, 0,0000007 elementare Einheiten. Demnach ist es auf diese Weise möglich, Bildungstemperaturen bis auf 1° C genau zu ermitteln.

Dieses Verfahren erscheint auch für Höhlensinter brauchbar¹⁴⁾. Eine Aenderung gegenüber der Anwendung an Meereskalken ergibt sich beim Sinter dadurch, dass dieser ein sekundäres Gestein ist und also schon zwei Absetzungsvorgänge hinter sich hat. Wenn man sich nicht nur mit relativen Werten begnügt, darf man also nicht vom $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ -Normalverhältnis ausgehen, sondern von jenem Wert, der im darüberliegenden Gestein gemessen wird. Und auch dieser Wert muss noch einmal moduliert werden — nämlich durch jenen durch den Pflanzenkörper gewanderten Anteil an Sauerstoff, der vom frischen, bei den Auflösungs- und Ausscheidungserscheinungen mitwirkenden Kohlendioxyd her stammt. Solche Probleme treten auch bei der Radiokarbonmethode auf und sind dort mit Hilfe eines weiteren Verfahrens, das wir als nächstes besprechen, weitgehend gelöst. Jedenfalls könnte die Ureysche Temperaturbestimmungsmethode, in den Höhlen angewandt, ein Hilfsmittel zur Aufdeckung paläoklimatischer Verhältnisse werden.

b) Das Verhältnis $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

Auch vom Kohlenstoff sind mehrere Isotope bekannt, ausser dem häufigsten Isotop ^{12}C etwa auch das seltenere Isotop ^{13}C . In Meereskalken beträgt das Verhältnis $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 1:0,01123. Es gilt als Standard, andere ^{13}C -Konzentrationen werden als Abweichung davon angegeben, z. B. = -7‰ für das Kohlendioxyd der Atmosphäre.

Der Kreislauf des Kohlendioxyds ist sehr kompliziert. Er kann z. B. von der Luft ins Meer, vom Meer in die Sedimentgesteine, von diesen in Lösungen und daraufhin in sekundäre Gesteine führen, oder auch von den Karbonaten in den Pflanzenkörper, von dort in Lösungswässer und dann in sekundäre Gesteine. Bei jeder Reaktion verschiebt sich das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis ein wenig, je nach dem Schicksal des Gases besitzt es einen anderen Wert. Die Theorie der mitspielenden Vorgänge ist noch nicht vollständig, doch sind die charakteristischen Zahlen für die wichtigsten Materialien in Abhängigkeit vom Entstehungsweg bekannt.

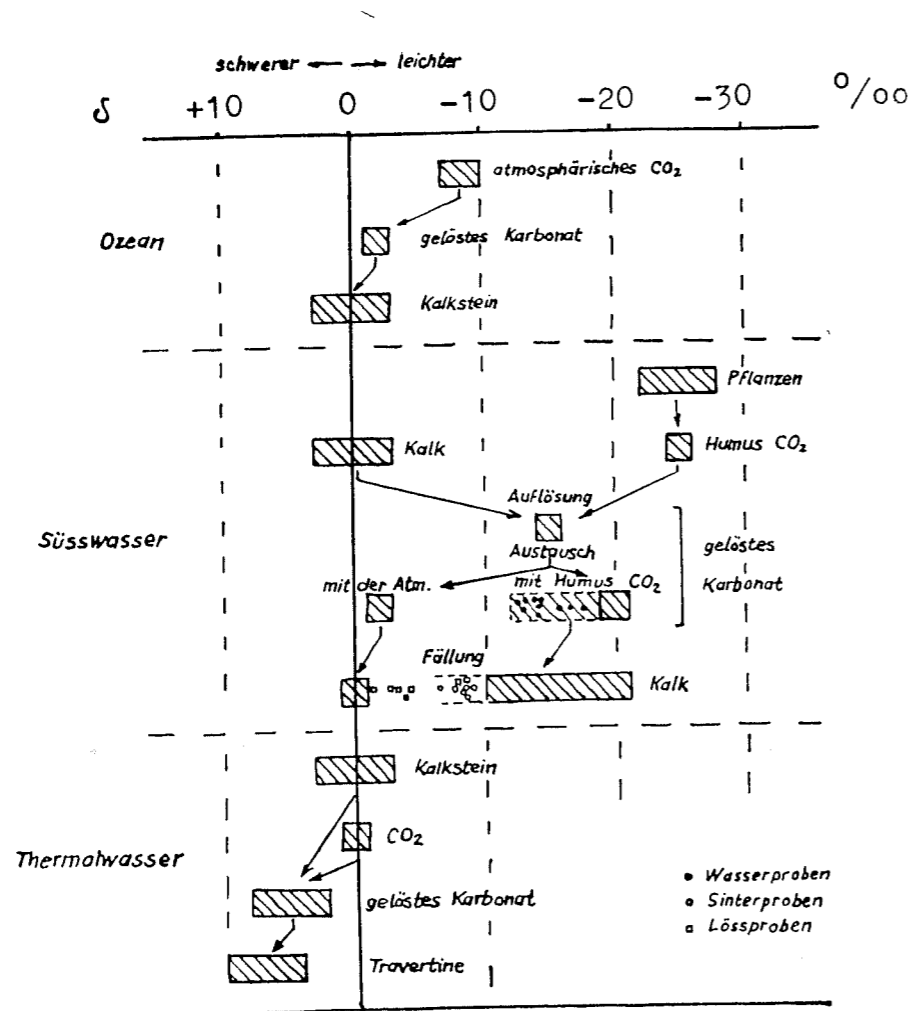


Fig. 3 - Diagramm der $^{13}C/^{12}C$ -Verhältnisse und die Bildungsschemata von Kalksedimentgesteinen nach Vogel ¹⁶⁾. Die Schwankungsbreite kommt durch die Horizontaler Streckung der Kästchen zum Ausdruck.

Die Messungen von Craig ¹⁵⁾ wurden durch Angaben von Vogel ergänzt, der zum ersten Mal Sinter und Wasser aus Höhlen untersuchte ^{16), 17)}. Sie bestätigten die Vorstellungen über das Bildungsschema des Sinters, z. B. die Erkenntnis, dass die Kohlendioxydkonzentration der Luft nicht ausreicht, um grössere Sinterlager zu erzeugen. Dazu ist — wie schon erwähnt — die Mitwirkung von Pflanzen und evtl. auch von Mikroorganismen nötig.

Messungen des $^{13}C/^{12}C$ -Verhältnisses haben sich als wichtige Kontrollmöglichkeit der Radiokarbondatierung erwiesen, da sie darüber Aufschluss geben, ob die geprüften Probestücke auf gewöhnlichen Weg entstanden sind oder nicht. Ist letzteres der Fall, dann lässt sich dem Messwert entnehmen, welche veränderten Voraussetzungen einzusetzen sind, um richtige Ergebnisse zu erhalten.

7. Die Radiokarbondatierung

Die sicherste und direkteste Art der physikalischen Datierung beruht auf radioaktiven Zerfallsvorgängen, die ihrem Zeitgesetz absolut unbeeinflussbar folgen. Leider sind ihre klassischen Methoden für Höhlen nicht brauchbar, da sie einen Zeitraum erfassen, der weit vor der Bildungszeit der Höhlen liegt und die ihnen zugrundeliegenden Elemente in Höhlen auch nicht vorkommen.

Der erste Schritt zur Aenderung dieser Situation war 1949 die durch Libby erfolgte Entdeckung eines neuen Verfahrens, das auf radioaktivem Kohlenstoff ^{14}C beruht ^{18), 19)}. ^{14}C entsteht durch Einwirkung der Höhenstrahlung auf die Stickstoffatome der Luft. Es ist ein radioaktives Isotop mit der Halbwertszeit 5760 ± 100 Jahre. Zwischen den neuentstehenden und zerfallenden ^{14}C -Atomen besteht ein Gleichgewicht, so dass die ^{14}C -Konzentration bis in die jüngste Zeit als praktisch konstant gelten kann.

^{14}C kommt in der Natur als Kohlendioxyd vor. Mit ihm tritt es durch die Assimilation in den pflanzlichen Organismus und von dort in den tierischen Körper. Mit dem Tode der Lebewesen erlischt der Nachschub an frischem Kohlendioxyd und damit an radioaktivem Kohlenstoff — der Gehalt an ^{14}C -Atomen nimmt ab und damit die Intensität der radioaktiven Strahlung. Findet man später Tier- oder Pflanzenreste, dann lässt sich durch eine Messung der Strahlenintensität die Zeit feststellen, die seither vergangen ist. Da auf 10^{12} gewöhnliche Kohlenstoffatome nur ein radioaktives kommt und weil überdies die Strahlung äusserst schwach ist, liegt auch hier die Schwierigkeit in der Messgenauigkeit. Die Fehlergrenze des Verfahrens liegt bei etwa fünf bis zehn Prozent, die Messgrenze bei etwa 30000 Jahren.

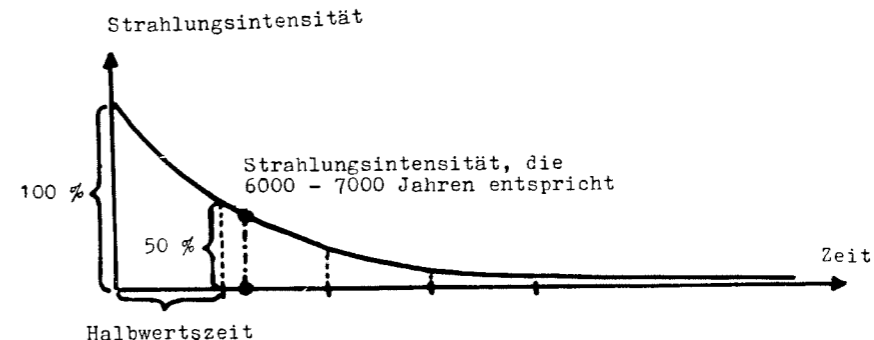
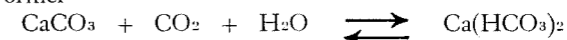


Fig. 4 - Die Zerfallskurve von Radiokohlenstoff.

Dieses Verfahren erwies sich von Anfang an als wertvoll für die Speläologie: zum Datieren von organischen Höhlenfunden. Ich konnte 1951 darauf aufmerksam machen, dass sich die Anwendbarkeit der Methode in Höhlen aber keineswegs auf organische Einschlüsse beschränkt; wie eine einfache Überlegung zeigt, bringt auch der Kalksinter ähnliche Voraussetzungen für Radiokarbondatierungen mit wie tierische und pflanzliche Substanzen ^{20), 21)}.

Das von der Erdoberfläche absickernde Wasser enthält Kohlendioxyd mit jenem Anteil an radioaktivem Kohlenstoff, der für die Atmosphäre gilt. Beim Auflösen von Kalk nach der Formel



mischt sich aktiver Kohlenstoff aus der Luft mit inaktivem des alten Kalkgesteins. Man könnte annehmen, dass damit der Gehalt an ^{14}C auf die Hälfte sinkt — das ist

jedoch nicht der Fall, da zur Auflösung nach der obigen Formel ein Ueberschuss von physikalisch gelöstem Kohlendioxyd notwendig ist ^{3) 22) 23) 24)}. Nach dem Henryschen Gesetz ist die Menge des physikalisch gelösten Kohlendioxyds der Kohlendioxydkonzentration der Luft proportional. Zwischen allen diesen Anteilen besteht Gleichgewicht, das durch die Dissoziationskonstanten und Löslichkeitsprodukte der Reaktionen beherrscht wird. Die Verhältnisse sind im Bild durch ein Diagramm veranschaulicht.

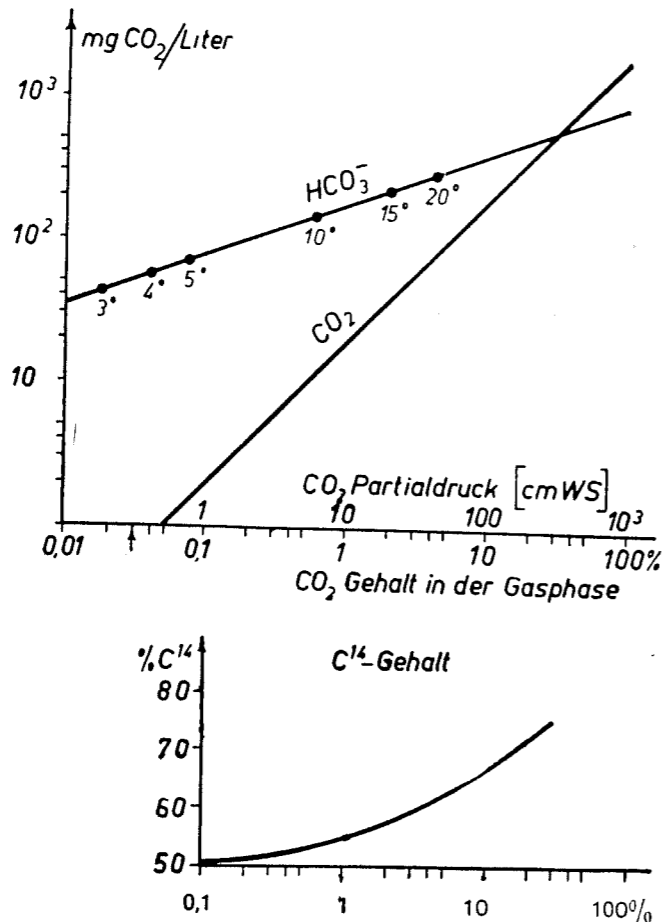


Fig. 5 - Die Lösungsverhältnisse von CO₂ nach Münnich ²²⁾

Diagramm: Gehalt des Wassers an CO₂: als Gas gelöst = Gleichgewichts- oder "freie zugehörige" Kohlensäure (untere Gerade) und als HCO₃ gebunden = Bikarbonat- oder "halbgebundene" Kohlensäure (obere Gerade), jeweils gemessen in mg. CO₂/Liter Wasser. Der gesamte CO₂-Gehalt ist die Summe beider Werte. Die Werte gelten in Gleichgewicht unter der Voraussetzung, dass das Wasser mit CaCO₃ in Berührung steht und keine weiteren, das Gleichgewicht beeinflussenden Salze (z. B. CaSO₄ oder MgCO₃) enthält. Die Werte sind gegeben als Funktion des CO₂-Partialdruckes über der Lösung. Als Abszissenskala ist der entsprechende prozentuale CO₂-Gehalt (bei Atmosphärendruck der Luft eingezeichnet. Der normale CO₂-Gehalt der Atmosphäre ist durch einen Pfeil (0,03%) gekennzeichnet. Temperatur = 15° C. Die entstehende Kalkhärte ist in

[° deutsche Märkte] angegeben.

Unteres Diagramm (Abszissenskala wie oben): C¹⁴-Gehalt in Prozenten des Gehaltes biogenen Kohlenstoffs unter der Annahme, dass der Kohlenstoff aus dem CaCO₃ C¹⁴-Gehaltes im Wasser infolge Isotopenaustausches mit der Gasphase keine Rolle spielt. Die beobachteten C¹⁴-Gehalte liegen durchwegs höher.

Eingehende Messungen an rezemtem Sinter und an hartem Wasser haben gezeigt, dass hier der Gehalt an radioaktivem Kohlenstoff zwischen 70 % und 85 % liegt. Die letzte Unsicherheit kann man unterdrücken, indem man die ¹⁴C-Konzentration in rezemtem Sinter misst, wobei man annimmt, dass sich die geologischen und hydrologischen Bedingungen während der Sinterbildung nicht geändert haben. Und wenn das nicht feststeht, informiert eine ¹²C/¹³C-Verhältnisbestimmung über die fraglichen Entstehungsbedingungen. Diese Methode hilft auch, um Material zu erkennen, das mehrfache Versinterungen und Wiederauflösungen erlebt hat.

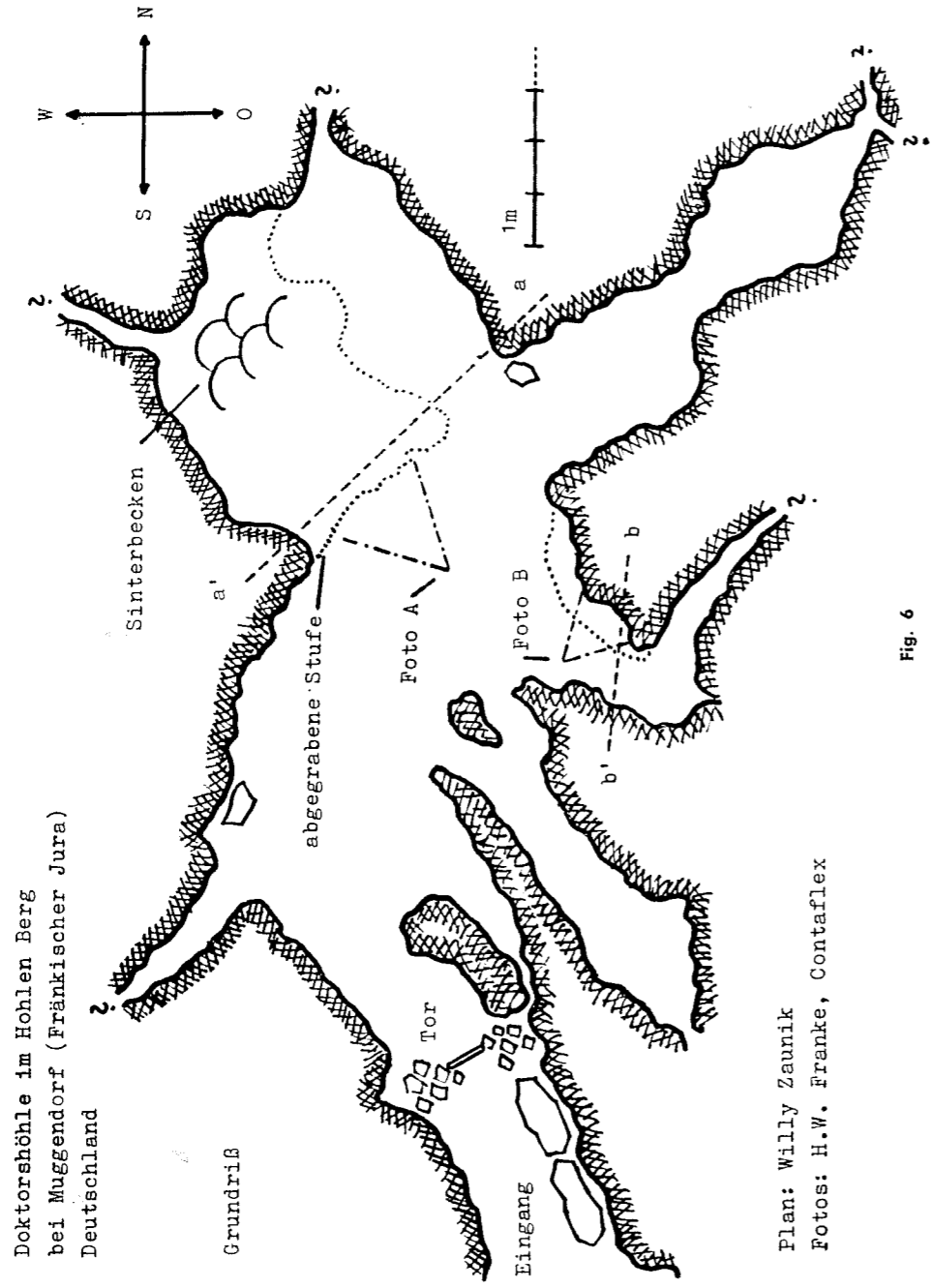
Die ersten Sinterdatierungen wurden im ¹⁴C-Labor des II. Physikalischen Instituts der Universität Heidelberg von Münnich und Vogel ^{25), 17)} an einigen Proben aus deutschen Höhlen vorgenommen. Sie entsprachen den in sie gesetzten Erwartungen. Das einzige unerwartete Ergebnis brachten einige Deckensintergebilde mit sich, die dem visuellen Eindruck nach als rezent beurteilt wurden und sich als über 8300 Jahre alt erwiesen. Es hat sich gezeigt, dass die grösstmögliche Fehlerquelle für die Radiokarbonmethode Austauscherscheinungen am toten Material mit der Umgebung sind, wie sie besonders bei porösen, oft feuchtigkeitsdurchtränkten Knochen leicht vorkommen können. Solche Effekte sind aber bei kompaktem Sinter so gut wie ausgeschlossen.

Tabelle der bisher erfolgten Datierungen von Sinter und hartem Wasser aus dem ¹⁴C-Labor des II. Physikalischen Instituts der Universität Heidelberg ¹⁷⁾.

Proben Nr.	¹⁴ C-%-Gehalt	¹³ C-Abweichung (‰)	Alter (Jahre)
Doktorshöhle bei Muggendorf (Fränkischer Jura)			
einzelne kleine Deckenzapfen 347 - 510	71	-4,9	1500
Stalagmit, aussen 348 - 319	82	-8,6	(300) +)
Stalagmit, innen 348 - 320	56	-8,6	3300
poröse Sinterschicht 349 - 316	43	-6,5	5000
dicke Kalkspat-Sinterschicht,			
Oberkante 350 - 327	0	-8,7	30000
do., zweitunterste (vorletzte) Schicht 350 - 321	0	?	30000
Wiehler Tropfsteinhöhle (Rheinland)			
Sinterschicht 412 - 363	60	-8,5	3000
Sinterschicht 414 - 417	0	-9,2	30000
Todsburghöhle bei Wiesensteig (Schwäbische Alb)			
Wasser aus Sinterbecken 529/5 - 465	95	-8,1	(-) ++)
Sinterbecken, rezenter Rand 536 - 469	94	-4,6	(-) ++)
« rezenter » Deckensinter 538 - 471	30	-7,8	8300
Tuffwerk Höfer, Wiesensteig (Schwäbische Alb)			
frische Tuffbildung, weich 540 - 462	77	-9,8	(800) +)
Tuff darunter, hart 541 - 470	34	-10,2	7400
Blautopf, Blaubeuren (Schwäbische Alb)			
Wasser 530/6 - 454	79	-12,8	(600) +)
rezente Tuffbildung vom Stauwehr . 544 - 474	81	-8,4	(400) +)
Steinbruch Nussloch bei Heidelberg			
Kalkspat-Kluftfüllung 334 - 311	44	-7,7	5300

+) Innerhalb der Streubreite von 70 bis 85 % des Standardgehaltes; wahrscheinlich Alter = 0.

++) ¹⁴C-Gehalt erhöht durch Austausch mit atmosphärischem CO₂.



Plan: Willy Zaunik
Fotos: H.W. Franke, Contaflex

Fig. 6

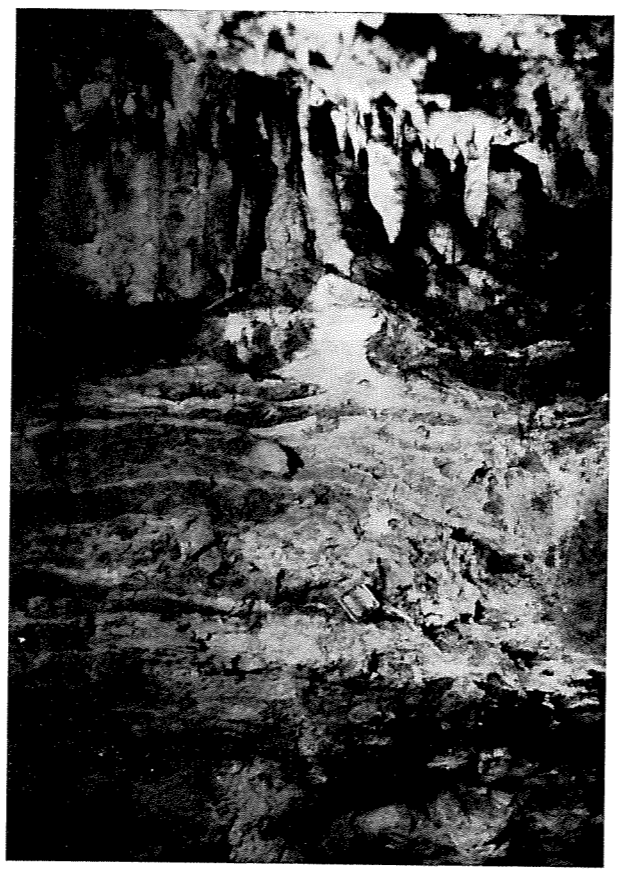


2

Fig. 6

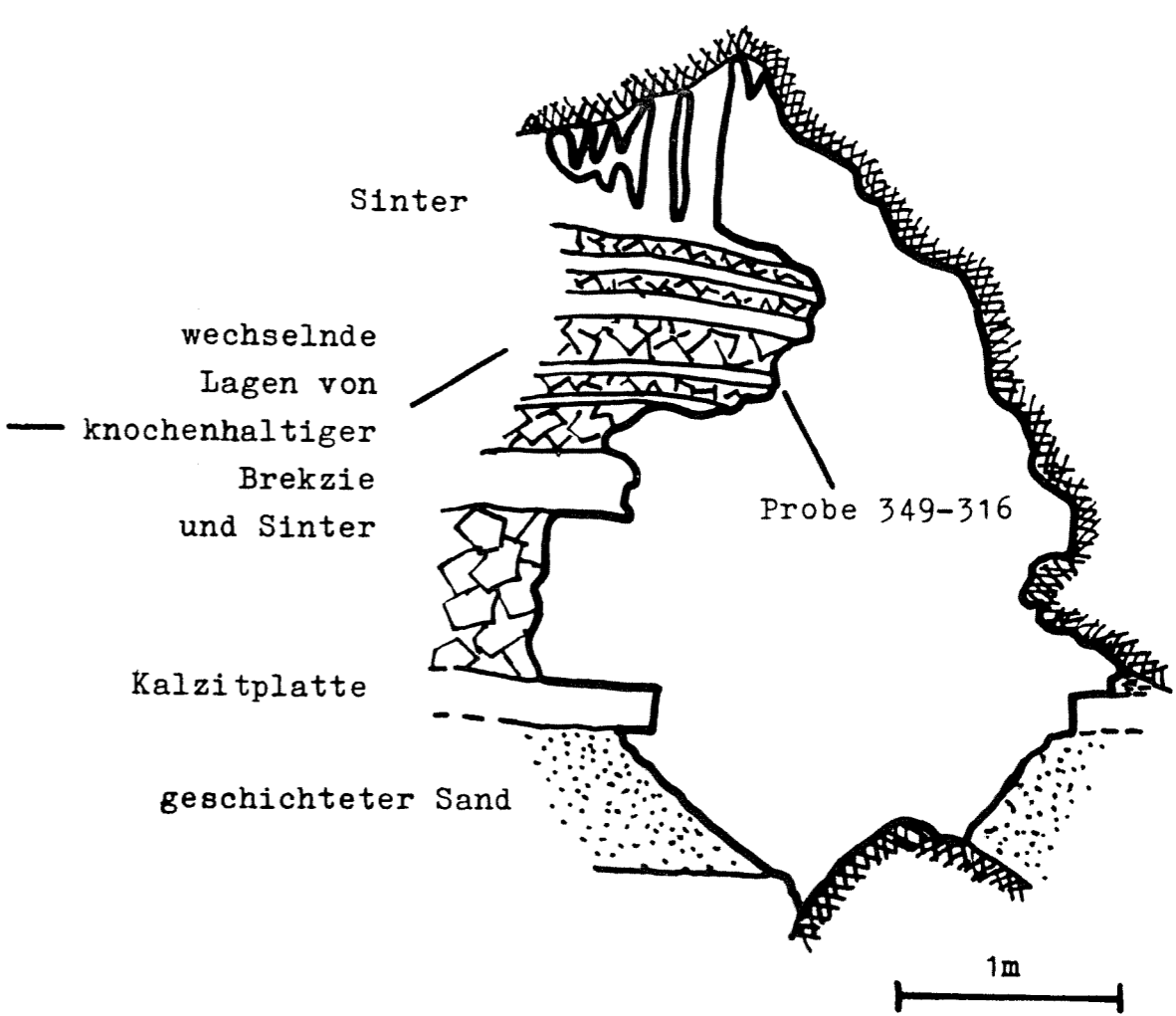
Fotos: H.W. Franke, Contaflex

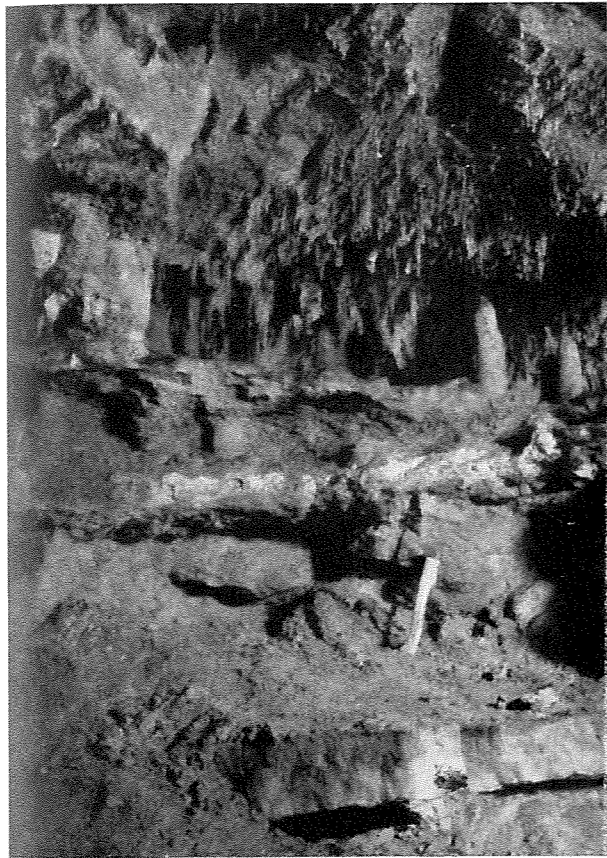
Foto B



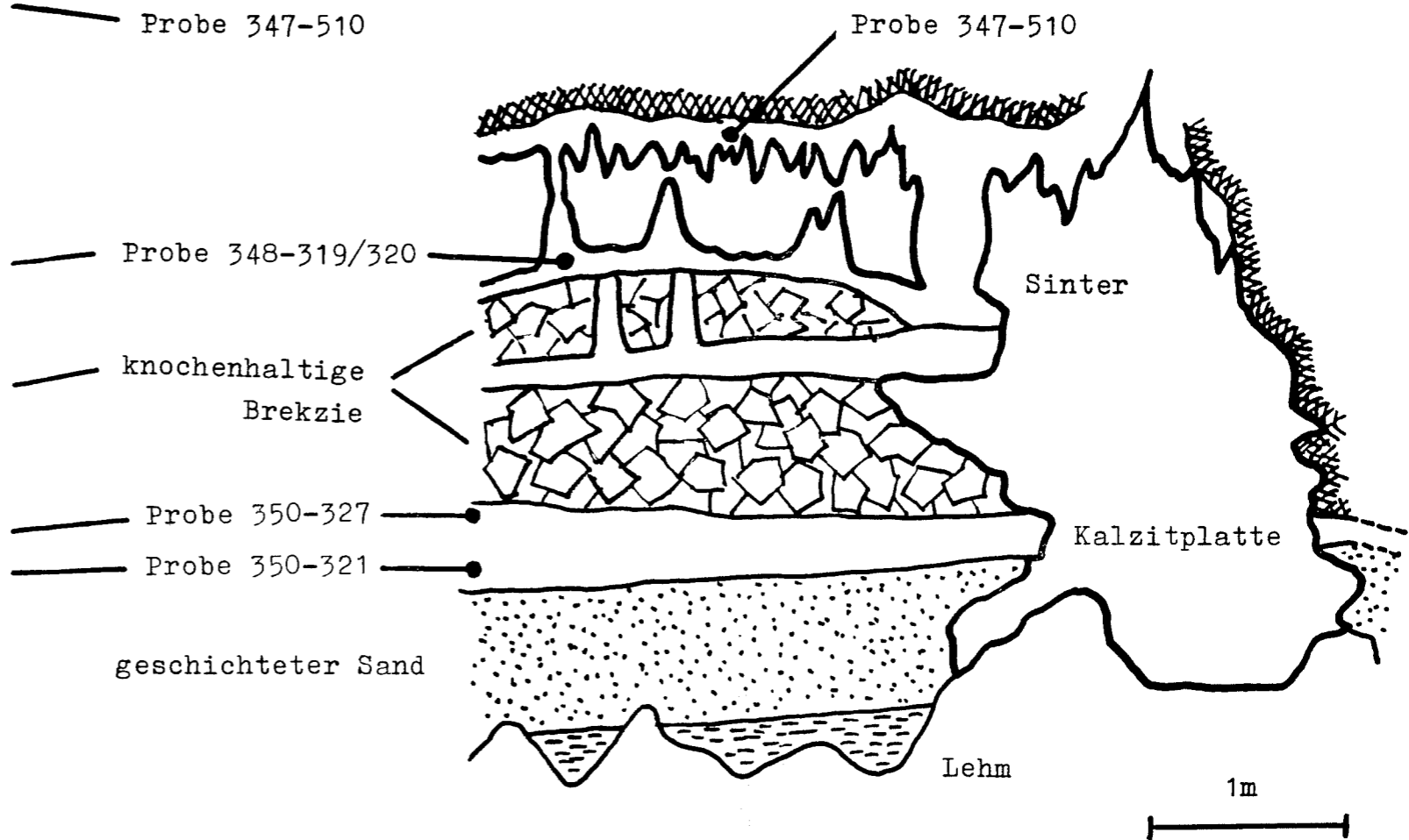
Probe 349-316

Profil b-b'





Profil a-a'



8. *Ausblick*

Die Wissenschaft der Datierungen ist ein verhältnismässig junges Gebiet, und gerade die aufschlussreichen chemischen und physikalischen Verfahren stecken erst in den Kinderschuhen. Von manchen jener Phänomene, die man hier praktisch zu verwerten sucht, wusste man noch vor wenigen Jahren nichts — man denke nur an die Isotopenmischung. Das erklärt, dass von manchen Methoden nur wenige, oft nicht gerade überzeugende Ergebnisse vorliegen, das entschuldigt vielleicht auch manche Mängel — Ungenauigkeit, Umständlichkeit, Kostspieligkeit — und lässt darauf hoffen, dass sie beseitigt werden. Es lässt weiter erwarten, dass die wenig gebräuchlichen Verfahren steigende Anwendung finden und dass neue Verfahren für jene Probleme entwickelt werden, an die die bestehenden noch nicht heranreichen.

Trotz aller Neuheiten behalten aber auch die klassischen Arbeitsmethoden ihre Geltung, ja sie gewinnen sogar an Bedeutung; sie schaffen die Grundlage für weitere Forschungen. Oft genug hat sich in letzter Zeit aber auch herausgestellt, dass im Verständnis jener Vorgänge, die mit den üblichen althergebrachten Methoden zu erfassen sind, noch grössere Lücken bestehen. So kann der volle Erfolg erst durch die Zusammenfassung aller Mittel, der alten und der neuen, erzielt werden.

LITERATUR

1. BÖGLI A., Der Höhlenlehm; Memoria V della Rassegna Speleologica Italiana, Como 1961.
2. LAIS, R., Ueber Höhlensedimente; Quartär 3, 1941, 56.
3. BÖGLI, A., Das Verhalten von Karbonaten in der Natur; Die Höhle 5, 3/4, 1954, 36.
4. KÖPPEN, W. und WEGENER, A., Die Klimate der geologischen Vorzeit; Gebr. Borntraeger, Berlin 1924.
5. KOWALSKI, K.: Palaeozoological Dating of Cave Sediments, im Erscheinen.
6. KNUCHEL, F. und RUPP, R., Altersbestimmung von Höhlensinter in der Beatushöhle (Schweiz); Die Höhle 5, 1, 1954, 5.
7. WELTEN, M., Pollenanalytische, stratigraphische und geochronologische Untersuchungen aus dem Faulenseemoos bei Spiez; Verlag Hans Huber, Bern 1944.
8. MOORE, G. W., Aragonite Speleothems as Indicators of Paleotemperature; American Journal of Science, Vol. 254, 1956, 746.
9. FLINT, R. F., Glacial Geology and the Pleistocene epoch; New York, John Wiley & Sons, 1947.
10. COLEMANN, J. C., Stalactite growth in the New Cave, Mitchelstown County, Cork; Irish Naturalist's Journal 8, 1945, 254.
11. HICKS, F. L., Formation and mineralogy of stalactites and stalagmites; Nat. Speleol. Soc. Bull. 12, 1950, 63.
12. FRANKE, H. W., Formgesetze des Höhlensinters; Memoria V della Rassegna Speleologica Italiana, Como 1961, Tomo secondo, p. 185-209.
13. UREY, H. C., Oxygene Isotopes in Nature and in the Laboratory; Science 108, 1948, 489.
14. FRANKE, H. W., Bestimmung der Bildungstemperatur von Sinter; Höhle 4, 1953, 29.
15. CRAIG, H., Geochim. et Cosmochim., Acta 3, 1953, 53.
16. VOGEL, J. C., Ueber den Isotopengehalt des Kohlenstoffs in Süsswasser-Kalkablagerungen; Geochim. et Cosmochim. Acta 16, 1959, 236.
17. FRANKE, H. W., MÜNNICH, K. O., VOGEL, J. C., Erste Ergebnisse von Kohlenstoff-Isotopenmessungen an Kalksinter; Die Höhle 2, 1959, 489.
18. LIBBY, W. F., ANDERSON, E. C., ARNOLD, J. R., Age Determination by Radiocarbon

- Content; World-Wide Assay of Natural Radiocarbon; Science 109, 2827, 1949, 227.
19. ZEUNER, F. E., Dating the Past by Radioactive Carbon; Nature 166, 4227, 1950, 757.
 20. FRANKE, H. W., Altersbestimmungen von Kalzitkonkretionen mit radioaktivem Kohlenstoff; Naturwissenschaften 38, 1951, 527.
 21. FRANKE, H. W., Altersbestimmungen an Sinter mit radioaktivem Kohlenstoff; Die Höhle 2, 1951, 527.
 22. MÜNNICH, K. O., Messung natürlichen Radiokohlenstoffs mit einem CO₂-Proportional-Zählrohr; Dissertation Heidelberg 1957.
 23. MÜNNICH, K. O., Erfahrungen mit der C¹⁴-Datierung verschiedener Arten von Sedimenten; Verhandlungen der vierten Internationalen Tagung der Quartärbotaniker 1957, Verlag Hans Huber, Heft 34.
 24. FRANKE, H. W., MÜNNICH, K. O., VOGEL, J. C., Auflösung und Abscheidung von Kalk - C¹⁴-Datierung von Kalkabscheidungen; Die Höhle 9, 1, 1958, 1.
 25. MÜNNICH, K. O., VOGEL, J. C., C¹⁴-Altersbestimmung von Süsswasser-Kalkablagerungen; Naturwissenschaften 46, 5, 1959, 168.

Anschrift des Verfassers: Herrsching am Ammersee, Lehrstrasse 5, Deutschland.

ZUSAMMENFASSUNG

In den Schichten der Ablagerungen spiegelt sich das Schicksal ihrer Umgebung. Aus der Art des Sediments kann man auf die Geschehnisse schliessen, die zu seiner Bildung geführt haben. Darüber hinaus informiert uns die Schichtenfolge über die Aufeinanderfolge der einflussnehmenden Vorgänge. Dadurch gewinnt man einen relativen Kalender, in den sich andere Ereignisse einordnen lassen.

Relative Zeitskalen sind beschränkt verwendbar. Sie lassen sich nur parallelisieren, wenn sie zu ein und derselben Grösse führen. Dazu braucht man einige Abschnitte, an denen die beiden Kurven eindeutig übereinstimmen. Günstiger ist es, mit absoluten Zeitskalen zu arbeiten — soweit solche zur Verfügung stehen.

Vor allem sind zwei Arten von Datierungsmethoden zu unterscheiden: Erstens solche, die sich auf Einschlüsse stützen, zweitens solche, die auf den Eigenschaften der Ablagerung selbst beruhen.

Zur ersten Art gehören:

a) die relative Einstufung in prähistorische Kulturepochen aufgrund von Artefakten;
 b) die Grobeinschätzung des Klimas aufgrund von Tierknochen; diese Methode ist von mehreren Autoren auf eine quantitative Basis geführt worden, indem sie den Anteil von Kleinsäugerknochen von Schicht zu Schicht bestimmten;

c) die Klimaeinschätzung aufgrund pflanzlicher Reste, beispielsweise Holzkohlesplinter; der Faunenlistenmethode entspricht hier die Pollenanalyse;

Zur zweiten Art gehören:

a) das Aragonitthermometer nach einem Beispiel von Moore⁸⁾, der Kalkkonkretionen für Schlüsse auf Paläotemperaturen heranzog, und zwar aufgrund ihrer Eigenschaft, je nach der Temperatur als Kalzit oder als Aragonit auszukristallisieren;

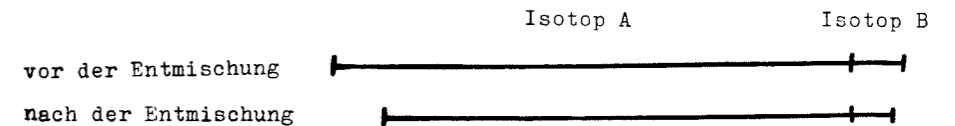
b) der jahreszeitbedingte Wechsel von eingangsnahen Aragonit- und Kalzitschichten in Höhlen aus Gegenden, deren Temperaturen um 16° C herum schwanken;

c) Zeiteinschätzungen aufgrund der Höhen von Stalagmiten^{10), 11), 12)};

d) die Bänderung von Lehm- und Sinterschichten als Zeitmarkenfolge.

Hierzu gehören auch einige Methoden der modernen Physik, die sich auf Isotopenaustauscheffekte und den radioaktiven Zerfall stützen.

Die Isotopenzusammensetzung eines Elements ist nicht konstant, sondern es treten Entmischungsvorgänge auf, die von seinem Schicksal abhängig sind. So erfolgt z. B. beim langsamen Absetzen von Kalziumkarbonat aus der wässrigen Bikarbonatlösung



Schema einer Isotopenentmischung; die Verhältnisse wurden hier übertrieben dargestellt. Da der Entmischungseffekt bei den fraglichen Vorgängen um viele Grössenordnungen kleiner ist, ändert er das Mengenverhältnis der Isotopen A/B, auf das es ankommt, nicht wesentlich.

eine Entmischung der Isotope ¹⁶O und ¹⁸O, die temperaturabhängig ist und unter Umständen die Bestimmung der Bildungstemperaturen erlaubt. In ähnlicher Weise ändert sich das Verhältnis von ¹³C zu ¹²C im Kohlendioxyd je nach dem Weg, der es an Ort und Stelle geführt hat (siehe Fig. 2). Messungen von Vogel an Höhlensinter bestätigten die Erkenntnis, dass Sinter ein Indikator für oberflächlichen Pflanzenwuchs zur Bildungszeit ist³⁾.

Eine sichere und absolute Zeitbestimmung ermöglicht die Radiokarbondatierung. Ihre Grundlage ist folgende: Radioaktiver Kohlenstoff ist überall in der Luft verbreitet, und zwar steckt er im Gas Kohlendioxyd, das etwa 0,03 % der Atmosphäre ausmacht und im Humus in wesentlich höheren Konzentrationen vorkommt. Dort wird es von absickerndem Wasser gelöst und mit in die Tiefe genommen. Das kohlendioxydhaltige Wasser ist imstande, Kalkgestein aufzulösen. Dringt es weiter unten auf seinem Weg in Höhlen ein, dann kommt es oft zu einer Umkehrung des Vorgangs: Kalk scheidet sich ab, Tropfstein ist entstanden. In diesem sekundären Kalk befindet sich zu Beginn ein bestimmter Anteil an radioaktivem Kohlenstoff. Im Laufe der Zeit zerfällt er, die Zahl der aktiven Atome nimmt ab und damit die Strahlungsintensität. Sie ist somit ein Mass für das Alter der Ablagerung. Einige Ergebnisse, die im ¹⁴C-Labor der Universität Heidelberg gemessen wurden, sind in der Tabelle angegeben.

Bei diesen Datierungen hat sich das ¹²C/¹³C-Verhältnis als eine wichtige Kontrollgrösse erweisen. Mit seiner Hilfe lassen sich die Einflüsse von Vorgängen, die normalerweise Fehler hervorrufen würden, wie z. B. mehrfache Auflösung und Wiederabscheidung, erkennen und berücksichtigen.

Es ist zu erwarten, dass alle diese Methoden weiterentwickelt und verbessert werden und dass für jene Probleme, an die sie noch nicht heranreichen, neue Bestimmungsmöglichkeiten gefunden werden. Trotzdem behalten auch die klassischen Verfahren ihren Wert. Erst die Zusammenfassung aller Mittel kann den vollen Erfolg bringen.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Dr. Franke für sein ausführliches Referat, das uns mit den verschiedenen Methoden der Altersbestimmung in nähere Verbindung gebracht hat und bitte nun um Ihre Wortmeldungen für die Diskussion. Es melden sich die Herren Tongiorgi, Bögli, Warwick, Trombe, Cigna, Corbel und Gèze.

TONGIORGI:

Solo una domanda. Vorrei cioè chiedere come pensa il Dr. Franke che sia possibile applicare il metodo di Urey delle paleotemperature per la determinazione delle temperature di formazione delle concrezioni in grotta. Perchè questo discorso sia comprensibile a tutti vorrei richiamare semplicemente un presupposto di questo metodo. La reazione a cui prima è stato accennato è una reazione di doppio scambio isotopico tra un atomo di ossigeno 16 contenuto nel carbonato di calcio e un atomo di ossigeno 18 contenuto nell'acqua. In questo modo si scambia semplicemente di posizione un atomo di ossi-

geno 18 dell'acqua con quello corrispondente del carbonato. Ora la possibilità di determinare, in base alla costanza di equilibrio di questa reazione isotopica, una temperatura, dipende dalla conoscenza della composizione isotopica del carbonato di calcio, che noi possiamo misurare con uno spettrometro di massa, e dalla composizione isotopica dell'acqua. Nel caso della determinazione delle temperature in mare, cioè del metodo delle paleotemperature suggerito da Urey, si supera questa difficoltà considerando costante, nel tempo e nello spazio, la composizione isotopica dell'acqua del mare, cioè uguale a quella che noi possiamo attualmente misurare negli oceani. Il problema non è lo stesso nel caso di una grotta. Cioè, noi dobbiamo, per affrontare un problema di questo genere, porre la questione della composizione isotopica dell'acqua, perchè solamente in questo caso noi potremo discutere di una costante di equilibrio che è essenzialmente fondata sul rapporto ossigeno 18 / ossigeno 16 nell'acqua e rapporto ossigeno 18 / ossigeno 16 nel carbonato. Questa è la costante su cui noi dobbiamo ragionare, ed è questa che è funzione della temperatura. Portate le cose a questi termini naturalmente si può aprire il campo a varie considerazioni che ci possono interessare. Ma siccome mi sembra che questo punto sia stato appena sfiorato, desidererei che innanzi tutto venisse chiarito ed approfondito un momento.

Presidente TRIMMEL

Ich danke Herrn Prof. Tongiorgi für diese ergänzende Bemerkung zur Frage des Verhältnisses O 16 zu O 18. Das Wort hat nun Herr Prof. Bögli.

A. BOEGLI

Jeder Versuch der Altersbestimmung eines Sinters nach der C^{14} -Methode muss durch die Tatsache beeinträchtigt werden, dass hier drei Medien mit entsprechenden Grenzflächen im Spiele sind, oben ein gasförmiges, in der Mitte ein flüssiges und unten ein festes. Kalkausscheidung setzt eine vorangehende Kalkauflösung voraus, wobei der Einfachheit halber angenommen sei, dieser aufgelöste Kalk sei frei von C^{14} . Das atmosphärische CO_2 geht dann mit einem Anteil von 50% in die Lösung ein. Nun besteht ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Luft und Wasser, wobei dauernd CO_2 ausgetauscht wird. Der C^{14} -Gehalt nähert sich asymptotisch jenem der Luft, den wir als 100% bezeichnen wollen. Vermutlich werden diese 100% noch überschritten, weil sich bei diesen Diffusionsvorgängen das höhere Molekulargewicht von $C^{14}O_2$ auswirken muss.

Franke hat mitgeteilt, dass als Vergleich rezenter Sinter herangezogen werde, was zu befriedigenden Werten führe. Da der C^{14} -Gehalt der Lösung und damit auch des ausgeschiedenen Sinters eine Funktion der Zeit und der Diffusionsgeschwindigkeit ist, die ihrerseits wiederum von vielen Faktoren abhängt (Temperatur, Durchmischung mit Luft etc.) so weisen rezente Sinter sicherlich verschiedene C^{14} -Werte auf, da die Laufwege äusserst verschieden sein können, ganz zu schweigen von den verschiedenen CO_2 -Konzentrationen in geschlossenen Hohlräumen, deren CO_2 durch das Wasser herangebracht wurde und somit einen andern C^{14} -Gehalt aufweisen muss. Es kommt noch hinzu, dass die Frage, ob zwischen der flüssigen und der festen Phase auch ein dynamisches Gleichgewicht bestehe, m. E. nicht geklärt ist, so dass auch die Möglichkeit eines Absinkens des C^{14} -Gehaltes auf weniger als 50% besteht.

Die Massendifferenz von 4,5% zwischen dem Kohlendioxyd mit C^{12} bzw. C^{14} spielt während der Diffusionsvorgänge eine Rolle, doch ist dieser Punkt nach einer Mitteilung von Franke berücksichtigt worden und fällt als Unsicherheitsfaktor weg.

Die vielen Imponderabilien bei der Auflösung und Wiederausscheidung von Kalk beeinträchtigen die Genauigkeit der Altersangabe nach der C^{14} -Methode derart, dass ich heute den so gewonnen Zahlen skeptisch gegenüberstehe.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Prof. Bögli, der einige prinzipielle Fragen angeschnitten hat, zu denen wohl der Berichterstatter in der Schlusssitzung noch näher Stellung nehmen wird. Ich bitte jetzt Herrn Prof. Warwick, das Wort zu ergreifen.

WARWICK:

Ladies and Gentlemen, I am no physicist and so most of my reading is from second hand sources, but I would like just to make a few points arising from this extremely interesting talk. First of all a point regarding the Melankovic curves. I am well aware, that Zeuner in England and Soergel and others in Germany have placed great faith in these curves, and certainly there has been a great deal of additional information which seems to fit in with these calculations. On the other hand, at least one man, a colleague of my own, Dr. Martin Johnson of the University of Birmingham, has recalculated the Melankovic curves using several equally valid assumptions — because many of the calculations are based on assumptions — and obtained a quite different series of curves. So I don't think we have yet sufficient information from the astrophysicists and geophysicists to be absolutely certain of the interpretation of the Melankovic curve. Arising from that is a major point of principle, which I am afraid I missed, it may have come out, and that is this discussion of the determination of paleotemperatures. How does that apply to dating? I would like a little more precision on that point. If one has the temperature of a deposit or of a formation, how does one relate that to its date, especially for periods beyond the carbon 14 range?

In Oxford, Dimpleby, a soil scientist, has been working on pollen preserved in soils which have not been disturbed. He has found pollen for instance under a prehistoric tumulus and is now working on soils in the New Forest. He says that he can only do this in acid environments. Colleagues also working in caves have got other palynologists to examine cave deposits, who find that the alkaline environment found there, does not preserve the pollen. On the other hand I heard a rumour that one man at Cambridge has found some. There may be possibilities, in this method, but it is not of universal application, perhaps we shall hear more information from Prof. Pasa. Dr. Franke said that Fluorine tests could not be used in caves. However Dr. Oakley, of the British Museum (Natural History), who was largely responsible for developing this technique, has informed me verbally that the test was used successfully to establish the authenticity of a *Machairodus* tooth from the Creswell Caves, Derbyshire.

With regard to the dating by rings of stalactites I have very much doubt whether these are annual, we require precise experiments from formation, of known age. I know one instance in Poole's Cavern, Buxton, where small stalagmites, 2-3 cm high, have formed on gas pipes fitted in 1857. Perhaps if we can section one of those and other dated formations we may be able to obtain some more information on this point. I feel that they are simply pauses in sedimentation which may be due, — to non — annual causes, certainly in England where we have damp caves. We wa get our rings but we also get damp all the year. In climates, such as the Mediterranean, with a marked seasonal difference in precipitation, these rings may be annual, but elsewhere they could be formed during shorter or longer periods, probably the latter being more normal.

Turning to Carbon 14 dating, there is also the correction to be made for the use of fossil fuels; I forget the man's name who first pointed this out, but this is a standard correction which I believe is now made which tends to give earlier dates.

With regard to the work of George Moore, which I had intended to cover in the climatic section but which has been admirably covered here, I think there are one or two points against the positive interpretation of the exact coincidence of the isotherms. Firstly I am convinced that there are many more caves in those areas which Moore has not visited and are omitted from those maps. Secondly there is the question that this is

a tectonically active area, parts of which have risen 2,000 metres during the Pleistocene Period, and it is still active, earthquakes being common. Thus the changes in height must have affected the palaeotemperatures.

Measurements of the amount of carbon 14 in modern calcareous sediments in U.S.A., such as *tufa* from tunnels and show caves which can be precisely dated, give dates within 75 % of the correct age. This will enable an approximate date to be given to recent calcite formations. In the original work by *Libby*, he never referred to actual years he always called them carbon 14 years. He still regarded it as a hypothesis and not as absolute dating. I think if that was common practice, a more accurate assessment of the value of such measurements would be made by non-physicists, though I agree with Prof. Bögli that the method is of great assistance and in many instances it is proving very successful. I think too, that Prof. Dr. Franke was a little on the pessimistic side regarding age-dating, we have dates from *De Vries* in Holland for Pleistocene remains in the fluvio-glacial deposits of the English Midlands up to 37,000 years before the present.

Finally, with regard to O^{15}/O^{16} ratios, the relationship between temperature and the value of this ratio, has only been proved for sea-water. *Emiliani* has shown that when sea-water evaporates there is a difference in the vapour pressure of $H_2 O^{18}/H_2 O^{16}$, which makes for a lower O^{18}/O^{16} ratio in the atmospheric water vapour than in sea-water. Rain and snow similarly give lower ratios, and glacier ice on melting lowered the O^{18}/O^{16} ratio in the sea at the end of each glacial period of the Pleistocene.

On a coastal site, a high proportion of the precipitation will be derived from the sea, with a O^{18}/O^{16} ratio similar to that in the air above the sea, but inland the proportion from such a source is very variable. Jung in 1951 has given some valuable figures for the nuclei of raindrops, those formed around common salt being considered to be of marine origin. The number of such nuclei varies very considerably from day to day as also does the proportion to the nuclei of terrestrial origin. This means that if this method is to be applied to the determination of palaeotemperatures, many local measurements of present conditions must be made to establish a local scale. Even when this is established only relative temperature changes may be established, not absolute values, because of the many variables involved. This would render such measurements of little use for dating purposes. In this connexion I would like to ask one final question to Dr. Franke: has this work actually gone forward or is he considering this as a theoretical possibility?

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Prof. Warwick fuer seine Ausfuehrungen zu dem Thema das wir heute besprechen. Bitte nun Herr Prof. Trombe

TROMBE:

Je voudrais d'abord dire que j'ai été très intéressé par l'excellent exposé du Prof. Franke et ce sont des commentaires que je voudrais apporter et non pas des critiques. Il y a une première question, c'est celle des sédiments dans les cavernes, que l'on peut dater par les vestiges préhistoriques. Il y a des grottes dans les Pyrénées, en particulier la grotte de *Narsoulas*, où l'on trouve des vestiges préhistoriques sous les sédiments et des vestiges préhistoriques au-dessus des sédiments. Je pense que quand on veut se servir des test préhistoriques, *magdalénien*, par exemple, des gravures, pour dater un dépôt, il faut se situer assez profondément.

Le remplissage est décroissant à mesure que l'on s'enfonce dans la caverne et on peut trouver ici par exemple au niveau du sol des traces d'ours ou des traces humaines,

mais ici le *magdalénien* se trouve sous 4 m de remplissage. La fréquentation humaine doit jouer un grand rôle dans ce remplissage progressif de la caverne, ce n'est que dans les parties profondes qu'on a des zones stables au point de vue remplissage, si la caverne n'a pas été très fréquentée.

Je voulais indiquer aussi pour l'aragonite, que nous avons fait un certain nombre d'observations sur des cristaux superposés d'aragonite et de calcite; on a, par exemple, un bloc comme ceci, avec des efflorescences d'aragonite sur la surface, et si l'on analyse les différentes parties de ce bloc qui a l'air d'être de l'aragonite par sa macroforme, (l'analyse que nous employons est l'analyse aux rayons X, le diagramme de *Debye Schoerer*, qui nous permet, étant donné que les deux formes cristallines sont différentes, de faire un dosage dans chaque cas d'aragonite et de calcite), on trouve que ce qui était anciennement, de l'aragonite, est devenu en grande partie de la calcite, mais pas toujours entièrement; on peut avoir une base de calcite, ici, et très progressivement des pourcentages d'aragonite qui sont de plus en plus importants.

On trouve dans certains cas, par exemple, une partie macroforme aragonite et microforme (rayons X) entièrement calcite. Evidemment je suis d'accord avec le Dr. Franke: c'est la température qui doit jouer un très grand rôle dans cette évolution. Je voudrais citer un exemple. Nous avons trouvé de très beaux cristaux d'aragonite dans la grotte de Moulis en *Ariège*, où il y a un laboratoire souterrain du Centre National de la Recherche Scientifique, mais nous en avons trouvé de plus beaux encore dans une grotte dont le régime de température est de 14° Centigrades, alors que dans le régime moyen des cavités de la région est de 11° Centigrades. Je souligne ce fait: l'aragonite semble bien se former dans les grottes un peu chaudes, plus facilement que dans les grottes froides.

Presidente TRIMMEL:

Herr Prof. Trombe hat uns einige interessante Einzelheiten zur Ergänzung des Themas vorgebracht. Ich danke ihm dafür. Als nächster Diskussionsredner ist Herr Cigna vorgemerkt. Ich bitte ihn nun das Wort zu ergreifen.

CIGNA:

A proposito dell'applicazione del metodo del radiocarbonio alla datazione di concrezioni vorrei ricordare una comunicazione presentata alla 16ª Assemblea Annuale della National Speleological Society nell'Aprile 1959 a Springfield, Missouri, U.S.A. ed il cui argomento è stato oggetto di un lavoro pubblicato da W. S. Broecker, E. A. Olson e P. C. Orr su « Nature », vol. 185, n. 4706, pag. 93, 1960.

In questo lavoro gli Autori descrivono le ricerche effettuate su di un frammento di concrezione depositata intorno ad un femore umano,

Nella concrezione si potevano distinguere nettamente 1206 straterelli più circa altri 200 meno evidenti. Sono stati prelevati due campioni, uno periferico ed uno centrale, in prossimità dell'osso. L'età di questi due campioni è stata determinata col metodo del radiocarbonio. È stato così possibile ricavare, per differenza, una misura del periodo di tempo intercorso tra le deposizioni degli straterelli del campione più interno e di quello più esterno. Inoltre, siccome all'atto della raccolta la concrezione risultava ancora in fase di accrescimento, è stato possibile datare in modo assoluto i campioni prelevati. Si è così visto che l'intero spessore di 8,8 cm di concrezione ricoprente l'osso si era depositato in 1400 ± 250 anni e che pertanto gli straterelli riscontrati corrispondevano a variazioni annuali del modo di accrescimento della concrezione stessa.

Vorrei poi accennare ad un altro fatto, e cioè alla possibilità di distinguere tra aragonite e calcite con il metodo del nitrato di cobalto. Ho potuto constatare in laboratorio che questo metodo è poco efficiente quando un campione è composto preva-

lentement o di aragonite o di calcite. Per esempio una stalattite contenente circa l'1 % di aragonite, riconoscibile all'esame con in raggi X col metodo di Debye, risultava composta da calcite pura alla reazione col nitrato di cobalto.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Cigna für die Hinweise, die er uns ergaenzend gebracht hat. Herr Prof. Corbel hat nun das Wort zu weiteren Diskussionsbemerkungen.

CORBEL:

Je ne traiterai ici que du point de vue du climat. Notre collègue Franke cite longuement les travaux de mon ami W. Moore avec lequel j'ai travaillé dans le Sud-Ouest des Etats-Unis. J'ai eu l'occasion d'étudier les grottes citées tant en Arizona qu'en Californie ou au Texas. Dans ces grottes bourrées d'aragonite, ce n'est pas seulement la température mais la *sècheresse* qui, a mon sens, est frappante.

Des expériences qui ont été faites en France et qui commencent à être bien connues, ont montré que l'aragonite se produit surtout quand il y a évaporation. Il est tout à fait frappant que toutes les grottes qui ont été étudiées par W. Moore (aussi bien que les grottes voisines que j'ai visitées) présentent exactement le même aspect: grottes bourrées d'aragonite, grottes très sèches. J'ai fait quelques mesures sommaires: on trouve, même ce qui est extraordinaire pour des grottes, seulement 50 % d'humidité. L'expérience suivante peut être faite très souvent: déposez un buvard plein d'eau, gorgé d'eau, sur une paroi de ces grottes; 24 heures après le buvard est sec. Je crois que ce sont vraiment des cas de grottes sèches comme nous en connaissons peu dans nos régions froides. Et il reste l'autre problème de la région où l'on trouve mêlées calcite et aragonite; il semble bien, dans la carte qu'a relevée Moore et dans quelques unes que j'ai pu examiner dans ces régions un peu plus au nord, qu'il s'agisse effectivement de grottes à périodes sèches. Et ici on peut se poser le problème: ce mélange de calcite et d'aragonite, dans quelle mesure n'est-il pas dû plus à une dessiccation ancienne qu'à un changement de température. Si je suis tout à fait d'accord avec Moore pour sa carte, je ne le suis plus du tout pour l'interprétation des températures: de 16° à 7°, cela fait 9° Centigrades de variation en 5000 ans, et cela bouleverse toutes nos connaissances de paléoclimatologie; parce que cela supposerait que, il y a 5000 ans, le climat du sud de Lyon soit monté à 21°, l'équivalent du Congo, et que le climat de l'Egypte, où il y a tout de même 5000 ans il y avait une civilisation humaine, aurait connu des températures moyennes de 10° de plus que la Sahara. Non, cette variation est trop grande. Donc, certainement le changement de concrétions est dû à un changement dans la sécheresse des grottes, plus qu'à la température. Il est évident que température et sécheresse cela va aussi un peu ensemble.

Un point particulier c'est le cas des climats continentaux à très grande différence d'hiver et d'été: -1° Centigrade à +20° Centigrades de moyenne. C'est dans ces climats bien développés dans certaines parties des Etats-Unis que l'on a signalé des cas de stalactites très curieuses. La coupe de la stalactite montrait des cercles alternatifs, mais ces cercles étaient d'aragonite, puis de calcite, puis d'aragonite, puis de calcite; elles étaient alternées, les bandes sombres étant données par des aiguilles d'aragonite et les bandes claires par la calcite. Or, ces bandes correspondent bien à des bandes saisonnières. Dans ces grottes de climat continental il y a peu de changement dans la température mais un changement très net dans l'humidité de l'air entre les diverses saisons.

Dernier point à propos des *paléotempératures*. Je me suis trouvé en contact avec Emiliani pour essayer aussi de voir si l'on pouvait appliquer le rapport O^{16}/O^{15} aux planchers de grottes, et Emiliani, m'a découragé complètement d'essayer toute espèce de mesure en dehors des comparaisons avec le milieu marin, pensant qu'il s'agissait

d'une véritable acrobatie expérimentale dont les résultats risqueraient d'être douteux. Je transmets le renseignement d'Emiliani.

Presidente TRIMMEL:

Herr Corbel hat uns einige weitere Gesichtspunkte zu der Frage der Altersbestimmung gebracht. Ich danke ihm und bitte jetzt Herrn Professor Gèze, zu sprechen.

GÈZE:

Je voudrais faire deux remarques d'ordre différent. La première c'est qu'on nous a parlé beaucoup du carbone 14 qui, sous réserve des causes d'erreur, peut nous permettre de dater ce qui s'est passé dans un Quaternaire relativement récent. Mais, tout de même, le spéléologue ne s'intéresse pas seulement à ce Quaternaire récent. Les Américains nous disent qu'ils arrivent à utiliser le carbone 14, probablement avec de grosses fautes, jusque vers moins 75.000 ans; 50.000 serait à peu près garanti à l'heure actuelle. Au delà, nous devons essayer d'utiliser les autres méthodes pour comprendre ce qui s'est passé, soit dans les phases de creusement, soit dans celles de comblement, au cours du Tertiaire ou antérieurement. Et là, je crois qu'il ne faudrait pas rejeter a priori la méthode à l'uranium. Il est rare, bien entendu, de trouver des dépôts uranifères dans les grottes, mais cela peut exister. En effet, il y a des sels d'uranium qui sont très fréquemment associés avec les phosphates de chaux sédimentaires, sous forme d'autunite, par exemple, et d'autres minéraux. Il est possible que des karsts anciens soient recouverts par une transgression marine; dans les débuts de transgression il y a presque toujours des dépôts phosphatés, quelquefois pas épais, mais il y en a tout de même souvent un petit peu. Je crois que, sous l'angle de l'étude de la présence d'uranium dans ces faciès de transgression, on pourrait dater les karsts antérieurs. J'ignore complètement si l'uranium est associé aussi au phosphate sédimentaire mais continental du type des phosphorites (phosphorites du Quercy, par exemple). S'il y avait là encore une possibilité de liaison, nous pourrions peut-être dater avec plus de précision qu'on ne l'a fait par les méthodes paléontologiques les remplissages de gouffres dans lesquels on trouve des formations phosphatées. Je pose la question; j'ignore si la chose est possible par la méthode de l'uranium.

En second lieu, je voudrais ajouter encore un mot sur la question de la liaison entre la température et la genèse de l'aragonite. A vrai dire, je n'ai pas grand-chose à dire de plus que M. Corbel et j'ai été très heureux des précisions qu'il a apportées. A la lecture du travail, fort intéressant d'ailleurs, de Moore, il est certain que des objections graves viennent tout de suite à l'esprit: petit nombre de grottes étudiées et limitation au territoire des Etats-Unis. Or nous voyons, d'après la précision que vient de nous donner M. Corbel, que la zone qui, il est exact, est chaude et où il y a de l'aragonite, est surtout une zone très sèche: nous sommes presque dans les déserts du sud-ouest des Etats-Unis. Mais si nous allons un peu plus au sud, dans des régions plus chaudes encore, au Mexique, après avoir passé la zone désertique, nous arrivons dans des régions où il y a d'immenses cavernes, dont certaines sont touristiques, classiques (on peut les visiter bien facilement) et on n'y voit pas du tout d'aragonite, au moins au premier coup d'oeil; on trouve des énormes concrétions de calcite dans des régions à température plus élevée encore que celles étudiées par Moore, au moins pour la température moyenne annuelle. Il y a peut-être des extrêmes moins grands que dans la zone désertique, mais la température moyenne annuelle est beaucoup plus élevée et il n'y a pas d'aragonite; il n'y en a pas en masse en tout cas. Donc, je crois qu'il serait très grave que l'on généralise a priori l'idée de Moore. Que les hautes températures permettent plus facilement la genèse d'aragonite, certainement, ne serait-ce que parce qu'habituellement l'évaporation est facilitée par la haute température. Mais, si l'on reprend les exemples des grottes des Pyrénées dont M. Trombe a parlé, et que je connais bien, ou si l'on prend l'exemple des grottes des Causses, nous trouvons une

très grande abondance d'aragonite dans des régions froides à l'heure actuelle, et qui ont été encore plus froides au cours du Quaternaire. J'insiste sur le fait que dans toutes ces grottes il n'y a jamais eu — je crois qu'on peut l'affirmer — les 16° que l'on nous propose comme étant une limite à la genèse d'aragonite. Dans la grotte de Moulis, notre Laboratoire souterrain, que vous a également mentionné notre ami Trombe, nous avons les faits suivants: sur la paroi rocheuse, le début d'une cristallisation est le plus souvent en calcite; ensuite, la solution carbonatée se trouve reportée dans un point plus en avant, plus aéré que la paroi et plus que la base de calcite; l'aragonite peut alors se développer sur cette base de calcite, en formant une touffe d'aiguilles qui recouvre parfois complètement la calcite. Surtout à la suite des expériences de Mlle Pobeguïn que j'ai rappelées hier, je crois pouvoir garantir que la facilité d'évaporation des solutions carbonatées joue pour la genèse de l'aragonite un rôle certainement plus grand que celui qui a été attribué à la seule température.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Prof. Gèze fuer die wichtigen Bemerkungen, die er noch zu unserem Themenkreis gemacht hat. Die rege Diskussion hat, glaube ich, sehr gut gezeigt, dass der Fragenkreis der Altersbestimmung die Speleologen sehr bewegt und sehr interessiert. Ich moechte in Anbetracht der vielen wesentlichen Dinge, die in der Diskussion zur Sprache gekommen sind, Herrn Dr. Franke fragen, ob er — wir haben noch einige Zeit — eventuell jetzt auf die Diskussionsbemerkungen antworten will, oder ob er das in der Schlussitzung des Symposiums besorgen will.

Ich darf feststellen, dass unser Berichterstatter auf einige Punkte, die ihm durch die Uebersetzung schon klar geworden sind, gleich eingehen möchte und die uebrigen Fragen am Schluss des Kongresses zusammenfassend behandeln wird. Ich glaube, dass er uns einige wesentlichste Punkte gleich jetzt an Ort und Stelle klaeren wird.

FRANKE:

Ich möchte zunächst auf einige Bemerkungen von Herrn Prof. Boegli eingehen, und zwar auf die Moeglichkeit eines Fehlers, der dadurch entsteht, dass Austauscherscheinungen in der Loesung zwischen der fluessigen und der Gasphase auftreten. Dazu moechte ich vor allem sagen: Der Schwankungsbereich, den wir in Erwaegung ziehen muessen, bewegt sich von 50 % bis 100 % im Extrem. Das heisst, der Anfangsgehalt an ^{14}C kann um diese 50 % oder 100 % schwanken, und das bedeutet einen Fehler von genau einer Halbwertszeit, denn eine Halbwertszeit ist die Zeit, die notwendig ist, dass 50 % der vorhandenen Substanz zerfallen. Wenn wir ganz junge Ablagerungen messen wollen, dann wird ein Fehler von 5600 Jahren natuerlich sehr erheblich sein; die Methode ist fuer juengere Zeitraeume unbrauchbar. Ich setze dabei voraus, dass wir tatsaechlich mit 50 % Fehler rechnen muessen. Je weiter wir aber zurueckgehen, wenn es sich dann um Zeitraeume handelt, in denen die Radiokarbonmethode ohne weiteres noch brauchbar ist, in Zeitraeume, die etwa auf 10 Halbwertszeiten zurueckgehen, das ist heute etwa die Grenze, dann betraegt dieser Fehler nur mehr 10 % und wir befinden uns dann innerhalb von Fehlergrenzen, die nicht so erheblich sind.

Vielleicht darf ich ganz allgemein zu all diesen physikalischen Methoden sagen, dass sie ueberfordert sind, wenn man von ihren ersten Anfaengen an exakte Daten erwartet. Ich erwachte bereits, dass wir hoffen duerfen — und es ist ziemlich sicher, dass sich auf diesem Gebiet noch einiges ergeben wird —, dass sich die Methoden im Laufe der Zeit verbessern, und ich wuerde vorschlagen, diese ersten Messergebnisse nicht so sehr als Ergebnisse zu werten, die Ihnen, den Geologen und den Sedimentologen, schon exakte endgueltige Daten geben, sondern ich wuerde Sie bitten, diese Ergebnisse als Werte aufzufassen, die zur Ueberpruefung der Methoden selbst dienen sollen. Wenn also ein Physiker eine Methode vorschlaegt, sie auch ausuebt und Ihnen die

Daten gibt, dann ist er Ihnen genau so dankbar dafuer, wenn Sie ihm sagen, dass die Methode nicht funktioniert wie dass sie funktioniert.

Ich glaube, es ist wichtig, auf diese Einstellung hinzuweisen. Wenn wir uns von vornherein durch die Schwierigkeiten geschlangen geben, die bei vielen von diesen Methoden auftreten, wenn wir nicht erst beginnen, Erfahrungen zu sammeln, dann werden wir nie einen Schritt weiter kommen und duerfen auch nicht hoffen, spaeter einmal exakte Werte zu gewinnen.

Ganz kurz moechte ich bemerken, dass Austauscherscheinungen zwischen der fluessigen und der festen Phase gewiss stattfinden, jedoch sind sie so gering, dass man sie bei diesen Problemen nicht zu beruecksichtigen braucht. Anders ist das beim Austausch zwischen Gas und Fluessigkeit; diesen haben wir ja zu erfassen versucht, so gut es geht. Es ist natuerlich auch durchaus moeglich, dass wir weitere Methoden finden, um gewisse Fehler auszuschalten — das ist ja bei der Radiokarbon-Methode schon eingetreten; Fehleinfluss der Austauscherscheinungen ist durch die Ueberpruefung mit der $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Methode eingeschaenkt worden, nicht eliminiert, aber doch eingeschaenkt.

Zu der Moeglichkeit, dass das Wasser seinen Weg oft gewechselt hat, moechte ich sagen: Ein solcher Wechsel ist selbstverstaendlich zu beruecksichtigen; wir muessen immer daran denken, dass Hoehlen, die tiefer liegen, unter Schichten von mehreren 100 Metern vielleicht, vom Wasser auf verschiedenen Wegen erreicht werden koennen. Daher wuerde ich empfehlen, im Anfang des Gebrauchs dieser Methode die Messungen auf solche Hoehlen zu beschaenken, die moeglichst wenig Ueberdachung haben; bei diesen Hoehlen koennen wir mit gewisser Sicherheit annehmen, oder mit groesserer Wahrscheinlichkeit als bei anderen Hoehlen, dass sich der Wasserweg nicht so sehr geaendert hat. Dadurch ist die Moeglichkeit, dass die Loesungen groessere Teile weiter oben aufgenommenen Sinters enthalten, mit einiger Sicherheit ausgeschlossen.

Vielleicht noch etwas Prinzipielles zu physikalischen Methoden, zum Beispiel zur Methode von Moore, die ganz gewiss ihre Grenzen hat. Sie ist aber der allererste Versuch auf diesem Gebiet, und so sollten wir doch nicht so streng sein, wir sollten nicht fordern, und ich will auch Ihre Diskussionsbemerkungen nicht in dem Sinn verstehen, dass man keine Versuche in dieser Richtung mehr machen soll.

Im Gegenteil, ich glaube, aus den Maengeln, die sich aus der Methode ergeben haben, resultiert die Forderung, dass wir gerade mit dieser Methode umso mehr arbeiten, dass wir die Ergebnisse immer wieder vergleichen sollen; und natuerlich noch etwas anderes: wir muessen die Grundlagen dieser Methoden exakt feststellen. Ich erwachte auch, das sich eben bei ihrem Gebrauch erwiesen hat, in wie vielen Faellen diese Grundlagen fehlen. Beispielsweise scheinen mir Ihre Einwaende betreffs der Verdunstung usw. sicher ihre Berechtigung zu haben, aber das sind ja prinzipiell keine Vorgaenge, die nicht experimentell zu erfassen waeren. Eine andere Moeglichkeit eines Fehlers waere der Einschluss, die Beimengung von anderen Ionen im Kristall, wodurch eine andere Kristallform entstehen koennte. Auch hier koennen wir durch Analyse sehr genau feststellen, welche Beimengungen zu beruecksichtigen sind, und es muesste im Laboratorium durchaus moeglich sein, zu sehen, wie weit sich dann die Temperaturgrenze der Bildung Kalzit oder Aragonit verschiebt; genau dasselbe gilt fuer die Moeglichkeit der Verdunstung. Ich weiss auch nicht, ob wir nicht leicht in einen anderen Fehler verfallen, indem wir naemlich gewohnt sind, Ausbluehungen, rein visuell, oft als Aragonit anzusehen, und schichtenweise aufgebaute Tropfstein «ad hoc» als Kalzit. Ich glaube, man sollte auch bei den kompakten Sinterformen die Untersuchung machen und sich zuerst ueberzeugen, ob es wirklich Kalzit, wirklich Aragonit ist.

Und dann noch etwas ganz anderes. Abgesehen von allen moeglichen Fehlerquellen, ueber die wir uns ja auch im klaren sind: Alle diese Methoden duerfen nur dann angewandt werden, wenn wir Moeglichkeiten zur Ueberpruefung und zum Vergleich mit anderen haben. Daher ist es das Streben des Physikers, moeglichst viele physikalische

Methoden zu finden, die miteinander verglichen werden, so dass der Physiker selbst schon einige Moeglichkeiten zur Ueberpruefung hat, und zwar deshalb, weil dann die selben Fehler kaum bei einer und der anderen Methode auftreten koennen. Wenn wir also zwei Methoden gefunden haben, die uns dasselbe Ergebnis vermitteln, dann haben wir schon einen grossen Prozentsatz mehr an Sicherheit, en, und wenn wir drei und vier und fuenf Methoden haben, dann ist die Sicherheit fast 100 %.

Dazu kommt noch etwas: Ich sprach nur von chemischen und physikalischen Methoden; selbstverstaendlich sind wir auch auf jene Methoden angewiesen, die von der Geologie oder Palaeontologie usw. beigesteuert werden; wir muessen jetzt die physikalischen und die chemischen Methoden miteinander verzahnen, miteinander im Einklang bringen, wir muessen immer dort, wo die Uebereinstimmung fehlt, nach dem Fehler suchen und versuchen, ihn auszuschalten, und erst dann koennen wir mit gutem Gewissen die Methode weiter verwenden, oder, wir muessen, wenn sich ein Fehler als nicht eliminierbar erweisen sollte, eben darauf verzichten. Es ist durchaus moeglich, dass auch einige jener Methoden, die ich Ihnen zeigen wollte, zu diesen Methoden gehoeren. Auf weitere Einzelheiten moechte ich dann das naechste Mal eingehen.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Dr. Franke. Wuenscht noch jemand von den Diskussionsrednern nach diesen Bemerkungen seinen eigenen Standpunkt zu praezisieren? Bitte Herr Prof. Tongiorgi.

TONGIORGI:

Vorrei tentare di riassumere alcuni degli aspetti delle questioni trattate finora e cercare di enunciarle, per quanto è possibile, con un linguaggio più speleologico. Cioè partire essenzialmente da un modello che è familiare a tutti coloro che si occupano di studi di grotte. I termini del nostro problema sono rappresentati dall'atmosfera, la quale per noi è una sorgente di anidride carbonica e di acqua e dal suolo; questo è l'elemento più variabile nel quadro del nostro problema. Il suolo può avere una composizione chimica diversa dovuta a una differenza iniziale della roccia madre che ha originato questo suolo.

Per introdurre nella nostra discussione un caso limite, che è normalmente al di fuori del campo del nostro interesse ma che può servire per chiarire le idee a questo proposito, poniamo il caso di un suolo il quale derivi da una roccia assolutamente priva di carbonato di calcio, roccia però silicea, che con la sua alterazione dia origine a degli ioni calcio. Oppure consideriamo il caso che ci interessa, di una roccia tipicamente carbonatica, un calcare. E allora in questo caso noi dovremo tenere presente del carbonato proveniente dalla roccia madre. Il suolo però si differenzia ancora per la sua natura pedologica e, per quello che ci interessa, direi essenzialmente per il suo contenuto in sostanza organica; diciamo per esempio di avere a che fare con un suolo con un accumulo di sostanza organica in superficie e uno strato di accumulo in una certa profondità. Questo suolo, questa sostanza organica, questo *humus* è ancora una sorgente di anidride carbonica. Poi dovremo considerare le vie di percolazione, finalmente la grotta in cui si hanno i nostri depositi. Vediamo ora dal punto di vista isotopico come si presentano queste situazioni e quali sono le combinazioni possibili di questi fatti.

Io utilizzo il modo di esprimermi che è stato usato precedentemente, che è stato usato anche nella relazione, per avere dei numeri con i quali ci si possa intendere. Intendiamoci solamente su che cosa vogliono dire questi numeri. Parliamo del carbonio prima di tutto. Il carbonio, che è stato considerato nella relazione, è quel carbonio che ha quel certo rapporto isotopico che si osserva in un esemplare di *belemnite* di un certo fossile che è stato usato in America come standard e che è diventato per noi uno dei punti di riferimento. Facciamo tutte le misure, confrontando i diversi campioni che

vogliamo studiare con questo standard, ed esprimiamo le variazioni nel rapporto isotopico in variazioni per mille rispetto a questo standard. Esiste uno zero nella nostra scala comunque e a noi interessano le variazioni relative. Il problema che si pone per il carbonio è allora abbastanza semplice. Noi sappiamo riconoscere un eventuale contributo del carbonio dovuto all'atmosfera, o a maggior ragione del carbonio dovuto alla sostanza organica, all'*humus*, ai vegetali, perchè nelle nostre misure ci danno una deviazione in meno, cioè negativa rispetto alla composizione isotopica del nostro standard, (scelto fra tutti gli standard possibili), è all'incirca uguale a quella di un carbonato di calcio di sedimentazione marina. Quindi se la nostra stalattite o la nostra concrezione trovata in grotta ci darà una deviazione in meno nel rapporto isotopico, cioè vuol dire avrà più isotopi leggeri dello standard, avrà più carbonio 12 e meno carbonio 13 dello standard — ecco cosa vuol dire la deviazione in meno — allora avremo un contributo dell'anidride carbonica dell'aria oppure dell'anidride carbonica dell'*humus*. Questo contributo da che cosa deriva? Da quella solita reazione che è stata descritta tante volte, ossia da quel meccanismo per cui alla formazione finale di questa molecola partecipa, diciamo, idealmente, al 50 %, se non intervenissero quei fenomeni di scambio di cui abbiamo parlato, sia l'anidride carbonica, sia il carbonio del carbonato. Risultato? Quello schema che è stato disegnato prima sulla lavagna ci dice questo, che il bicarbonato che si forma avrà una composizione intermedia, che il carbonato che alla fine si deposita subirà un certo processo per cui è favorito l'isotopo pesante, e quindi sarà ancora più vicino alla composizione del carbonato di calcio marino. Quindi al massimo noi potremo avere un valore che devia dal carbonato di calcio marino fino alla metà del valore dell'anidride carbonica che ha contribuito a questo processo, e questo se non intervengono ulteriori scambi. Ma quali e quanti scambi possano avvenire con questi elementi se lo scambio avviene solo con l'anidride carbonica dell'aria, non potremo uscire dai limiti di valori che sono imposti dal valore -7 dell'anidride carbonica dell'aria. Ecco allora la prima constatazione pacifica che tutti gli speleologi conoscono, ma che ci fa piacere di vedere confermata dalle ricerche isotopiche. Quando noi andiamo a misurare questo valore, nelle nostre concrezioni troviamo dei valori oscillanti tra -10 e -20 . Questo esclude a priori che il ragionamento possa essere impiantato sulla sola anidride carbonica dell'aria, ma che deve intervenire, e intervenire in modo notevole, anche l'*humus* presente nel terreno, altrimenti non sarebbero possibili i valori di questo tipo.

Questo ci apre la strada ad una forma di indagine che può presentare degli aspetti estremamente interessanti, cioè quello di vedere quale e quanto è stato nel corso del tempo il contributo dell'*humus*; cioè come è variata la copertura vegetale nel corso del tempo. Prima di concludere andiamo a vedere gli altri fatti. Oltre al carbonio 13 esiste quel famoso radiocarbonio, quel carbonio 14 di cui abbiamo tanto parlato, sia nell'anidride carbonica dell'aria che nell'*humus*; il valore che noi possiamo trovare nell'*humus* è abbastanza vicino a quello dell'anidride carbonica dell'aria, sarà un po' più vecchio in quanto ci darà il valore medio, l'età media dell'*humus* contenuto nel terreno. Ci sono dei terreni in cui questo valore è notevolmente abbassato, perchè ci sono alcuni terreni che sono ricchi di sostanza organica ma questa sostanza organica rappresenta un accumulo che si è verificato in tempi passati, e quindi l'età media dell'*humus* del terreno corrisponde addirittura a qualche migliaio di anni. Comunque, anche qui si verifica lo stesso fatto: non troviamo il 50 % teorico ma troviamo dei valori che, abbiamo visto prima da quelle tabelle e da quei dati che ha comunicato il relatore, possono variare teoricamente tra il 50 % e il 100 % e in pratica i valori trovati sono compresi tra il 65 % e il 90 % con un addensamento verso il limite superiore (intorno all'80-85 %). Questo caso presuppone degli scambi molto limitati ed è un caso possibile quando al di sopra della nostra grotta ci sia un suolo poverissimo, quasi privo di *humus*, o addirittura ci sia la roccia scoperta. Noi abbiamo allora dei casi estremi anche da questo punto di vista: il caso di una grotta in cui arriva dell'acqua che scorre su una superficie nuda, che percola rapidamente attraverso delle fratture beanti e quindi non ha tempo

di operare degli scambi, oppure dell'acqua che risiede per un tempo abbastanza lungo in un terreno con sostanza organica, e allora dà luogo a tutta quella serie di scambi per cui alla fine la composizione isotopica tende a diventare uguale a quella del composto che è presente in quantità dominante e tende ad equilibrarsi con questo, e quindi ad assumere la composizione isotopica del carbonio di questa zona. Ecco uno dei punti su cui si è discusso, si è accennato varie volte e credo che tutti quelli che hanno parlato oggi abbiano preso in considerazione, cioè, la possibilità di studiare i valori che noi ricaviamo dall'analisi del carbonio 14 , misurando la radioattività del carbonio 14 , in base ai dati che noi ricaviamo con una tecnica completamente diversa, cioè con le analisi fatte con uno spettrometro di massa del rapporto isotopico tra carbonio 12 e carbonio 13 . Siccome tutte e due sono legate a questo processo, che avviene essenzialmente nel terreno in superficie, tutte e due debbono seguire la stessa storia, naturalmente regolata dalla differenza di massa che c'è tra i due isotopi. Si hanno così due storie parallele che possono servirci di correzione l'una all'altra. Cosa vuol dire questo? Secondo me vuol dire che i termini del problema si possono rovesciare. E' vero che in alcuni casi disperati, o per alcuni problemi di tipo particolare come lo studio di stalattiti sulla volta di una grotta noi abbiamo a disposizione un mezzo che ci consente, nei limiti della approssimazione di tutte le ipotesi che sono necessarie e delle correzioni che occorre fare, di misurare un'età, ma è altrettanto vero che noi possiamo fare il rovescio, cioè che molto spesso noi possiamo misurare questa stessa età con il carbone che noi troviamo nei focolari di quel sedimento, che le ossa bruciate che sono contenute come resti di pasto in quegli stessi sedimenti, con le conchiglie, magari, che sono state portate in questa grotta, cioè che noi abbiamo altri mezzi per datare alcuni di questi livelli; e allora, nota l'età, noi possiamo risalire al problema opposto che è quello di studiare attraverso queste variazioni nel contenuto in carbonio 13 ed in carbonio 14 delle soluzioni che sono arrivate nella grotta, quale era la situazione delle superfici del terreno. E questo, spesso, è un aspetto che ci può interessare di più e che ci avvicina a quell'aspetto paleoclimatico che noi spesso ricerchiamo da studi di questo genere.

Allora, da questo punto di vista, arriviamo all'altro problema, cioè a quello relativo all'acqua; l'acqua a noi interessa essenzialmente per il suo contenuto in ossigeno 18 (le misure di deuterio ci possono interessare solo in rapporto alle misure di ossigeno quando volessimo indagare l'eventuale esistenza di fatti di evaporazione), perchè può essere comodamente misurato mediante uno spettrometro di massa.

Anche qui occorre riferirsi ad un certo standard. Questo potrebbe essere dato dall'ossigeno del carbonato di calcio, o da quello dell'acqua di mare, ecc.

Ma qui nasce il problema al quale è dovuta la domanda che io avevo fatto all'inizio. Nel caso dell'acqua del mare noi possiamo parlare di una sua composizione isotopica essendo il mare una riserva praticamente infinita e i vari fenomeni che interferiscono con la sua acqua (a meno che non si tratti di sbocchi di grandi fiumi, diffusioni di fronti di ghiacciai sugli oceani ecc., quindi di diluizioni con acque di tipo diverso), non modificano sensibilmente (perlomeno nei limiti che ci possono interessare in questo caso) la relativa composizione isotopica. Invece la composizione dell'acqua piovana, risulta notevolmente modificata nel corso del tempo. Tanto per dare un ordine di grandezza: nelle nostre regioni l'acqua che piove d'estate ha una composizione, in media, di -2 rispetto ad un certo standard l'acqua estiva; l'acqua che piove d'inverno invece ha una composizione, in media, di -15 . Ora, per chiarire il problema delle paleotemperature vorrei fare presente che una variazione di $0,2$ per mille corrisponde ad una variazione di 1°C : quindi per misurare una variazione di temperatura di 1°C noi dovremmo apprezzare una variazione di $0,2$, mentre noi abbiamo una variazione stagionale di 13 , il che dovrebbe corrispondere a 65°C , quindi ad una variazione di temperatura veramente sbalorditiva. Personalmente ritengo che, salvo qualche caso eccezionale che si può in alcuni casi trovare ma che non ha interesse generale, convenga abbandonare la strada delle misure di paleotemperature nel senso iniziato da Urey per le misure nelle con-

chiglie marine, ma converrà viceversa seguire la variazione nel contenuto in ossigeno 18 del carbonato di calcio deposto nelle grotte. Se non intervengono scambi importanti durante il percorso sotterraneo dell'acqua che porta alla formazione delle concrezioni se cioè ci saranno delle fessure abbastanza aperte per cui l'acqua piovana possa percolare in grotta con il ritardo solamente dell'ordine di giorni o di qualche decina di giorni e non tale da eliminare le variazioni stagionali della composizione isotopica, allora questa variazione stagionale si rifletterà anche nella composizione del carbonato di calcio; ed effettivamente io vi posso dire che in alcune stalattiti della Liguria, delle grotte di *Toirano*, abbiamo potuto vedere che ci sono nettissime, in una concrezione, delle variazioni, nella composizione isotopica dell'ossigeno, con un periodo, diciamo, dell'ordine di $2-3$ mm, che per la formazione di un piano stalagmitico, su cui scorre continuamente e tutto l'anno dell'acqua, possono corrispondere molto bene all'accrescimento annuale. Le variazioni osservate sono dell'ordine del 7 per mille, quindi molto vicine a quelle che sono le variazioni che si osservano nella composizione nell'acqua. Così noi abbiamo, almeno in questi casi, un altro mezzo per indagare le variazioni esterne, ed un mezzo piuttosto importante perchè questa variazione nella composizione isotopica dell'acqua piovana non è solo una variazione stagionale, ma a questa corrisponde anche una variazione latitudinale; cioè l'acqua dei periodi glaciali è stata più vicina, nella sua composizione isotopica, all'acqua invernale, e l'acqua dei periodi interglaciali è stata più vicina, nella sua composizione isotopica media, all'acqua estiva. Noi possiamo vedere chiaramente questo studiando la composizione delle piogge attuali e la loro variazione alle diverse latitudini. Quindi abbiamo anche, da questo punto di vista, un modo per indagare le variazioni che sono intervenute in periodi caldi e in periodi freddi. Io non insisto su questi fatti ma vorrei solo rispondere ad un'altra considerazione giustissima che è stata fatta. Tutto questo va bene nei limiti di tempo che sono attualmente consentiti dal metodo del radiocarbonio, cioè all'incirca 40.000 anni.

Bene, si può andare più in là, cioè si può prendere in considerazione la possibilità, per esempio, di un accumulo di uranio nei fosfati? Io a questo proposito rispondo: l'accumulo di uranio nei fosfati nelle grotte, sempre che le acque delle regioni soprastanti contengano dei quantitativi sufficienti di uranio, è marcatamente visibile; in alcuni casi dove c'è una copertura per esempio di tufi vulcanici che rappresentano una sorgente molto ricca, essa notevolmente recenti, o relativamente recenti, (all'incirca di 200.000 anni di età) hanno $0,5$ grammi di uranio per kg di osso. Quindi la capacità di fissazione è veramente notevole. Questo ci apre la via verso altre considerazioni, cioè noi possiamo ad un certo momento pensare di applicare qui con delle possibilità più concrete di quelle date dal metodo delle paleotemperature, tutti quei metodi che sono già stati messi a punto per le misure dei sedimenti marini profondi. Parlo di questi, come punto di riferimento, perchè è senz'altro da escludere la possibilità di applicare i metodi classici dell'uranio, cioè i metodi del piombo, a meno che non si abbiano grotte che abbiano proprio come massimo un limite inferiore di 30 milioni di anni, perchè misure di questo tipo, anche in casi fortunati, non si potranno fare al disotto di 30 milioni di anni. Però ci sono tutti i metodi che sono fondati sul non-equilibrio radioattivo, dal momento che questo uranio, o suoi discendenti eventuali, arrivano nelle soluzioni in condizioni di non-equilibrio.

Allora il problema si sposta non alle vite medie dell'uranio come tale, ma per esempio alle vite medie dello ionio o del protoattinio e così via, il che ci permette di arrivare a considerare la possibilità concreta di misurare, o per lo meno di valutare delle età dell'ordine di grandezza dei 300.000 anni. Ciò specialmente se noi anzichè fondarci su una sola misura di non-equilibrio radioattivo possiamo considerare contemporaneamente quelle di due famiglie, per esempio quello dell'uranio 235 in rapporto all'uranio 238 , sfruttando il fatto che i due progenitori sono sempre, in qualsiasi situazione, in un rapporto iniziale costante.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Prof. Tongiorgi. Die Zeit ist inzwischen weit fortgeschritten und wir muessen daran denken, Schluss zu machen, so interessant es auch waere, die Diskussion fortzusetzen. Es hat sich aber vorher schon Herr Prof. Trombe noch zu einer kurzen Bemerkung gemeldet.

TROMBE:

Revenons sur cette question d'aragonite et de calcite. Pour les chimistes la frontière de stabilité est une frontière de température; au-dessus de 20 degrés l'aragonite, se forme plus facilement qu'en dessous de 20 degrés. La calcite est la forme stable sur un large domaine de température. Et il est évident que ces formes sont stables, mais que les transformations de l'un dans l'autre peuvent être très longues. Il y a un fait, c'est qu'on ne trouve pas, dans les cavernes pyrénéennes d'aragonite en grosses masses, on ne trouve que des petites masses développée — en aiguilles, comme le représente le dessin de mon ami Gèze, qui est encore ici au tableau — et quand on trouve une masse qui a une allure d'aragonite, avec des stries caractéristiques des macroformes d'aragonite, c'est de la calcite, aux rayons X, c'est de la calcite. Cette aragonite s'est donc transformée par la suite en calcite, à la faveur d'une température probablement insuffisante pour qu'elle reste aragonite. C'est simplement ce fait que je voulais souligner. Il y a une stabilité relative d'aragonite dans des domaines de température déterminés et il y a des conditions de formation, je les admetts volontiers, des conditions de formation en air, probablement, relativement sec, avec des états hygrométriques de 70 %-80 %, qui permettent le développement d'aragonite qui n'est pas en réalité la forme stable dans le domaine de température où elle se forme. Mais cette aragonite se forme en petits cristaux, et jamais en gros cristaux. Il serait intéressant de savoir si les grandes formations d'aragonite qui existent dans les grottes américaines qui sont plus chaudes, sont vraiment de grosses formation.

Mais ce que j'ai remarqué c'est que plus la température était élevée et plus les cristaux d'aragonite paraissaient grands; c'est une hypothèse, mais une hypothèse basée sur une observation, mais il me semble que, d'après ce que l'on a trouvé dans les grottes pyrénéennes, on peut dire qu'on n'a pas d'aragonite en masse, on a des petits cristaux qui se sont développés dans les conditions de formation dont a parlé mon ami Gèze.

Presidente TRIMMEL:

Ich danke Herrn Prof. Trombe. Die Diskussion des Problemkreises heute vormittags hat uns gezeigt, dass es sich um einen interessanten Fragenkomplex handelt, ueber den es noch viel in den Diskussionsbemerkungen zu sagen gibt. Ich danke vor allen dem Berichtstatter, dass er uns diesen Problemkreis vorgefuehrt hat und vor allem den vielen Diskussionsrednern die uns wertvolle Beitrage zu den angeschnittenen Fragen gebracht haben. Ich moechte abschliessend noch mitteilen, dass die Exkursion mit Autobussen vor dem Hotel um 14,15 beginnt. Die Sitzung ist damit geschlossen.

Q U A R T A S E D U T A
Pomeriggio del 4 Ottobre in VARENNA

PRESIDENTE : **Ezio Tongiorgi**
RELATORE UFFICIALE : **Bernard Gèze**

Presidente TONGIORGI

Questa seduta si apre con la relazione del Prof. Gèze, sul ciclo di concrezionamento. Credo che sia un argomento che si ricollega in parte e completa quelle trattate questa mattina, e quindi noi potremmo seguire lo sviluppo di questi problemi, di fronte a degli esempi concreti che ci permetteranno anche di approfondire la discussione.

L'ÉVOLUTION KARSTIQUE
(CREUSEMENT, REMPLISSAGE CLASTIQUE, CONCRÉTIONNEMENT)
DANS SES RAPPORTS AVEC LES
ALTERNANCES CLIMATIQUES QUATERNAIRES

par **Bernard GÉZE**
Professeur à l'Institut National Agronomique (Paris)
Président du Comité National Français de Spéléologie.

Il a été maintes fois observé, à l'intérieur des cavernes, l'alternance de phases de creusement, de remplissage détritique grossier (éboulements, blocs, cailloux roulés, etc.) ou fin (limons et argiles) et de concrétionnement calcaire. Plus progressent les études de ces évolutions karstiques approximativement cycliques, plus nous semble probable le fait qu'elles ne sont pas l'oeuvre du hasard, mais qu'elles obéissent au contraire à des lois précises. La plupart des auteurs reconnaissent notamment leur rapport avec les conditions extérieures de l'érosion et de la sédimentation normales, ces conditions dépendant elles-mêmes surtout de l'influence du climat et de ses variations dans le temps, pour chaque lieu considéré.

Sans doute, certaines cavernes résultent-elles de creusements anciens, tertiaires par exemple, mais il semble néanmoins que la majorité de celles qui sont largement pénétrables et que nous pouvons par conséquent bien étudier grâce à une exploration directe, datent seulement du Quaternaire. En particulier, les phases et le type de leur remplissage plus ou moins avancé paraissent traduire étroitement les fortes alternances climatiques qui ont caractérisé cette période géologique.

Le présent essai de coordination, très théorique et volontairement bref, ne doit absolument pas être considéré comme définitif. Son but principal est de servir de base de discussion, d'hypothèse de travail. Il aura rempli son rôle si les spécialistes de disciplines distinctes unissent leurs efforts pour accroître les observations méthodiques destinées à prouver son exactitude, ou sa fausseté.

a) INFLUENCE DU CLIMAT SUR LE TYPE D'ÉVOLUTION KARSTIQUE

1°) Climats humides

La première remarque fondamentale sur laquelle il convient d'insister, malgré son évidence, est que *le creusement karstique ne peut se faire sans l'arrivée sous terre d'une abondante quantité d'eau*, que celle-ci soit froide ou chaude.

Si l'eau est froide, elle pourra dissoudre davantage de gaz carbonique que si elle est chaude et son action corrosive sur le calcaire en sera accrue d'autant: un litre d'eau à 0° peut entraîner quatre à cinq fois plus de calcaire qu'un litre d'eau à 30°.

Les régions où nous verrons une telle action poussée au maximum seront celles de type océanique où le climat est humide et frais ou même froid. Un bon exemple en est donné actuellement par les karsts du Nord-Ouest de l'Europe (1).

Cependant, dans les régions chaudes et humides, les pluies renfermeront beaucoup plus d'acide azotique et les sols de végétation libéreront de grandes quantités d'acides humiques. Nous ne disposons pas encore d'assez de données précises pour chiffrer avec certitude le résultat final, mais il n'en demeure pas moins assuré que la corrosion des calcaires dans les actuelles régions tropicales humides est extrêmement forte.

L'intensité relative de l'action des eaux froides ou des eaux chaudes dans la karstification pourra donc être encore discutée. La conclusion générale demeure néanmoins constante, à savoir *la dominance du creusement dans les régions très humides*. Un comblement, seulement partiel d'ailleurs, ne pourra guère être opéré que par des cailloux roulés d'origine exogène et constitués par des matériaux peu solubles violemment entraînés dans le réseau souterrain.

2°) Climats secs.

Inversement, si nous nous trouvons en climat assez sec, les cavernes qui peuvent avoir été creusées pendant une période antérieure plus humide se verront progressivement comblées par des éboulements. En effet, les faibles précipitations auront plutôt tendance à s'évaporer qu'à s'infiltrer sous terre dans le réseau karstique. Même s'il en arrive un peu au contact des éboulis, elles demeureront trop rares pour que leur action érosive ou corrosive soit notable: les débris n'étant ni entraînés ni dissous s'accumuleront au contraire de plus en plus.

Avec un climat assez sec et froid (cas des régions arctiques, surtout si elles sont continentales), le comblement proviendra principalement de l'éclatement des roches sous l'influence du gel. Les fragments anguleux et de toutes tailles seront alors nombreux. Avec un minimum d'humidité (alternance de périodes de gel et de dégel) il pourra aussi s'y ajouter des limons et argiles résultant de l'entraînement en profondeur des sols cryoturbés et soliflués de la surface.

Avec un climat assez sec et chaud (cas des régions tropicales sèches, au voisinage des déserts, comme par exemple au Nouveau-Mexique ou en Australie) on aura surtout affaire à un comblement par éboulements en grandes masses: dalles parallépipédiques décollées des voûtes horizontales en particulier. Le remplissage clastique fin paraît beaucoup plus réduit dans ce cas que dans le précédent.

La lithologie joue cependant un grand rôle à côté du climat. Il va sans dire que les roches gélives permettront un comblement particulièrement rapide en région froide. Également, un calcaire gréseux mal cimenté laissera un résidu sableux plus que des dalles à angles droits même en région chaude.

Quoi qu'il en soit de ces nuances importantes, il semble que l'on puisse affirmer que *le remplissage clastique grossier domine dans les régions sèches*, tandis que le creusement se montre très faible ou nul.

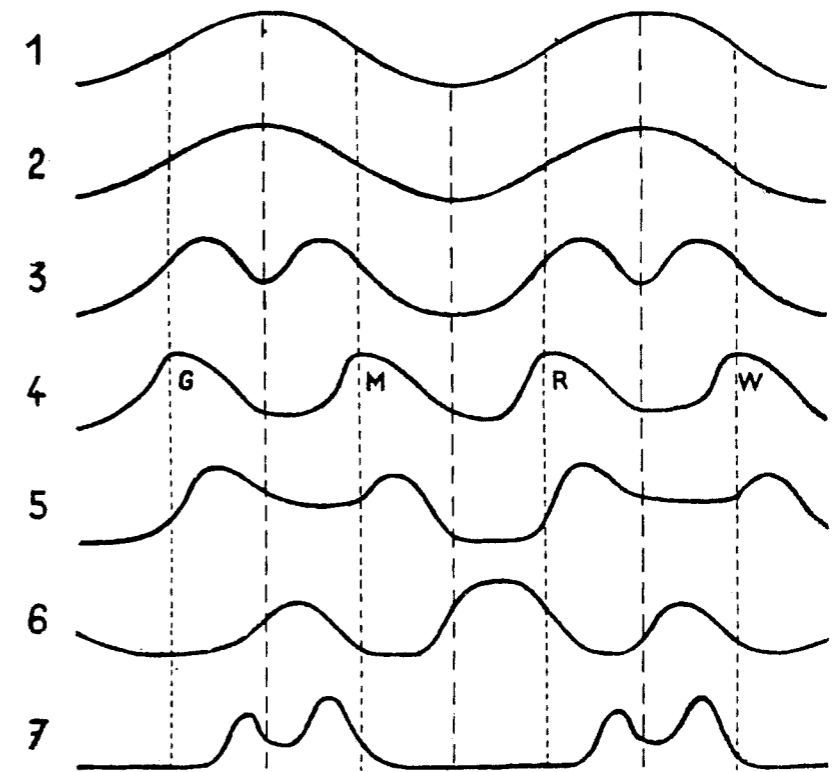


Fig. 1 à 7 - Graphiques schématiques des variations au cours du Quaternaire. 1) des températures moyennes, 2) des précipitations moyennes, 3) de l'humidité atmosphérique près du sol, 4) des glaciations, 5) du creusement des cavernes, 6) du comblement des cavernes par éboulements et colmatage clastique, 7) du concrétionnement dans les cavernes (dans les régions soumises aux influences périglaciaires).

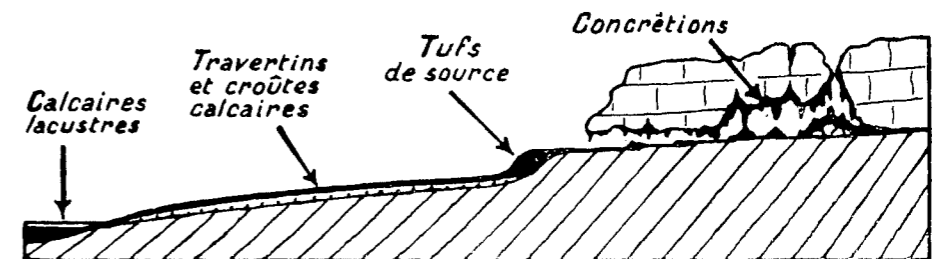


Fig. 8 - Lison entre le concrétionnement dans les cavernes et la sédimentation calcaire épigée, en climat chaud et humide.

(1) Voir la thèse de J. CORBEL, *Inst. Et. rhodaniennes Univ. Lyon*, Mém. 12, 1957.

3°) *Climats tempérés.*

Entre les deux types extrêmes de climats très humides et de climats assez secs, si l'on se trouve soumis à un climat moyennement humide avec une température moyennement chaude, la dissolution du calcaire par l'eau infiltrée aura lieu d'une façon modérée, mais ces eaux auront assez facilement tendance à s'évaporer.

Bien qu'il puisse y avoir alors un peu de creusement et un peu de comblement détritique, *les conditions dans les régions tempérées seront surtout optimales pour permettre un important concrétionnement.*

Dans les régions tempérées fraîches, du type méditerranéen d'Europe actuel, ce concrétionnement se produira essentiellement dans l'intérieur des cavités souterraines. Dans les régions tempérées chaudes du type méditerranéen d'Afrique actuel ou dans celles comprises entre le tropical sec (désertique) et le tropical humide (équatorial), c'est-à-dire en climat tropical à saisons alternantes, le concrétionnement, particulièrement intense à chaque saison sèche faisant suite à la dissolution en saison humide, se produira aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des cavités. Les ouvertures pourront ainsi être colmatées par les dépôts de carbonate de calcium aussi bien que l'intérieur du réseau karstique.

b) CONSÉQUENCE DES ALTERNANCES CLIMATIQUES QUATERNAIRES
DANS LES RÉGIONS SOUMISES AUX INFLUENCES PÉRIGLACIAIRES

Si nous acceptons les données énoncées ci-dessus, essayons de voir ce qui a pu se passer en Europe moyenne (France, Allemagne du Sud, Espagne et Italie du Nord principalement) ou dans des régions comparables, ayant également subi les influences des climats périglaciaires (grande partie des États-Unis, de la Chine, etc.) lors des alternances climatiques du Quaternaire.

Beaucoup d'auteurs admettent actuellement qu'il n'y a eu que deux grandes époques de température élevée, précédées, séparées et suivies par des périodes plus fraîches ou même froides (courbe 1). Pendant ces périodes, que nous appellerons schématiquement chaudes, les précipitations, fonctions de l'évaporation des mers, ont été nécessairement élevées, tout au moins dans les zones où l'influence océanique était nette. Au contraire, les précipitations étaient forcément très faibles pendant les périodes froides (courbe 2). L'humidité atmosphérique près du sol sur les continents se montrait aussi très réduite pendant ces mêmes périodes froides, mais elle devait également s'affaiblir lors des maximums de températures qui provoquaient une facile évaporation (courbe 3). En conséquence, il a pu se produire des accumulations de glace aux moments de fortes précipitations et de températures encore relativement basses: quatre de ces périodes sont classiques (Günz, Mindel, Riss, Würm pour les Alpes) et l'on voit qu'elles sont séparées les unes par un épisode de froid sec, les autres par un épisode de chaleur élevée mais d'assez faible humidité (courbe 4).

Il semble que les périodes maximales de *creusement des cavernes* doivent correspondre aux époques de fonte glaciaire, surtout évidemment quand la température était assez élevée. Il y aurait donc eu creusement brutal et rapide immédiatement après les première et troisième glaciations, tandis que le creusement aurait été plus modeste et probablement plus soumis à des à-coups interrompus par des périodes de gel des cours d'eau, lors de la fonte dans les périodes relativement froides qui ont suivi la deuxième et la quatrième glaciation (courbe 5).

Le *comblement* par accumulation détritique correspondrait alors aux épisodes interglaciaires, d'une façon relativement atténuée, avec éboulements de blocaille dominants lors des phases chaudes, d'une façon majeure au contraire, avec éléments clastiques de toutes tailles lors des phases froides (courbe 6).

Quant aux *concrétionnements majeurs*, ils se seraient produits lorsqu'il restait de l'eau disponible mais sans excès, donc avec des maximums relatifs immédiatement après les première et troisième glaciations (avant le comblement dû aux phases chaudes mais sèches), avec des maximums plus importants immédiatement avant les deuxième et quatrième glaciations (après le comblement dû aux phases chaudes). Il n'y en aurait pas eu de notables entre les deuxième et troisième glaciations (période froide sèche), par défaut de précipitations (courbe 7).

Remarquons cependant que la durée des déglaciations ayant été probablement plus grande que celle des débuts de glaciations, le volume total des concrétions peut avoir été supérieur dans le deuxième cas que dans le premier. C'est seulement pour d'égales durées de temps que nous parlons de maximum de concrétionnement avant les deuxième et quatrième glaciations.

Enfin, nous soulignons que dans ce raisonnement nous tenons seulement compte des très grosses masses de concrétions: les petites stalactites ou stalagmites ont pu se réaliser presque à toutes les époques et nous en avons bien la preuve à l'époque actuelle! Il en est d'ailleurs de même pour les creusements ou comblements de faible ampleur qui ont été et demeurent toujours possibles.

c) CONSÉQUENCE DES ALTERNANCES CLIMATIQUES QUATERNAIRES
DANS LES RÉGIONS ARTIQUES ET LES RÉGIONS TROPICALES.

1°) *Régions arctiques.*

Lorsqu'on envisage l'évolution des phénomènes karstiques dans des régions comme la Scandinavie ou le Canada, le schéma proposé n'est évidemment plus valable: une calotte de glace presque continue y a subsisté en effet depuis le début de l'histoire des glaciations quaternaires jusqu'à une période géologiquement très récente (7 à 10.000 ans av. J.C.).

Sous réserve de l'existence possible de cavités anté-glaciaires non ou peu connues, toutes celles que nous voyons actuellement sont extrêmement récentes et en pleine phase de creusement consécutive à l'unique fonte glaciaire. Des effondrements se produisent évidemment, mais en liaison avec ce creusement, ce qui les rattacherait au type d'«*affaissement-dissolution*» de Ph. Renault (2) et l'on n'a pas du tout affaire à une phase réelle de comblement. De même, il n'y a pas encore un seul début de véritable concrétionnement.

Mais il existe aussi des régions arctiques froides et sèches qui, sans calotte glaciaire, ont présenté tout au long du Quaternaire jusqu'à l'époque actuelle un sol constamment gelé à faible profondeur et sur de très grandes épaisseurs (Alaska ou Sibérie par exemple). Nous manquons de données directes sur l'évolution karstique de ces contrées, mais il est permis de supposer qu'il ne peut y avoir eu un grand développement du creusement. S'il existait, il doit se limiter à la genèse de petites galeries du type «*cutané*» de R. Ciry (3). Leur comblement doit d'ailleurs se réaliser assez facilement à partir des formations cryoclastiques de la surface et l'on ne peut envisager le moindre concrétionnement.

En définitive, pour les régions arctiques, il ne semble pas que l'on puisse encore parler de cycle karstique: sous climat océanique, la phase de creusement se montre

(2) PH. RENAULT - Sur deux processus d'effondrement karstique, *Ann. Spéleo.*, t. 12, p. 19-46, 1957.

(3) R. CIRY - Une catégorie spéciale de cavités souterraines: les grottes cutanées, *Ann. Spéleo.*, t. 14, p. 23-30, 1959.

presque exclusive; sous climat continental, même ce creusement doit demeurer très faible et enrayé par le comblement.

2^o) Régions tropicales.

Les alternances climatiques du Quaternaire ont par contre fait sentir leur action dans les régions tropicales. Sans doute n'y a-t-il jamais eu de glaciers (sauf en haute montagne) mais les phases humides « glaciaires » dans les régions septentrionales correspondent aux « pluviaux » des régions tropicales sèches (désertiques actuellement), tandis que les phases sèches (interglaciaires ou interpluviales) auraient parfois entraîné une légère tendance vers la désertification dans les régions tropicales humides ou équatoriales actuelles.

Du point de vue de l'évolution karstique, c'est surtout dans les zones tropicales sèches, soumises aux « pluviaux », que l'on pourra observer des phases un peu comparables à celles des zones soumises aux influences périglaciaires. En ce qui concerne les épisodes de creusement, la courbe 5 doit rester à peu près valable, mais cependant en la décalant vers la gauche puisqu'il n'y avait pas de glace qui empêche l'érosion. On peut donc considérer que c'est plutôt la courbe 4 (des glaciations et des pluviaux) qui traduirait directement les phases majeures de creusement.

Pendant les arides interpluviaux, dont aucun n'a été vraiment froid puisqu'on se trouvait toujours sous les tropiques, le comblement par éboulements a pu être important. La courbe 6 reste valable, avec seulement accroissement de la valeur et léger décalage vers la gauche des maximas relatifs aux arides les plus chauds (totalité des périodes interpluviales).

Quant au concrétionnement, s'il a été vraisemblablement à peu près nul pendant les périodes arides, il a pu au contraire se montrer considérable pendant la totalité des périodes pluviales, en raison de la haute température permettant toujours une évaporation relativement intense. Donc, contrairement aux cas précédemment envisagés, nos sommes conduits à penser qu'il y avait à la fois creusement et concrétionnement pendant les pluviaux: le calcaire dissous en un point devait rapidement se redéposer, l'érosion physique seule pouvant limiter ce processus. En gros, ce ne serait donc pas la courbe 7 qui serait valable pour les zones tropicales sèches, mais le figuré graphique devrait encore se rapprocher de la courbe 4.

Pour les régions tropicales humides, les variations climatiques ne semblent pas avoir pu retentir gravement sur l'évolution karstique. L'humidité et la température ont probablement été presque toujours suffisantes pour permettre la continuité des phénomènes de creusement et de concrétionnement. Sans doute peut-on envisager tout au plus un accroissement du concrétionnement et quelques accumulations temporaires d'éboulis pendant les épisodes à tendance sèche.

Ainsi s'expliqueraient les dimensions souvent gigantesques des réseaux karstiques et des concrétions dans les régions proches de l'équateur.

d) CONTRÔLE DE LA THÉORIE CLIMATIQUE DE L'ÉVOLUTION KARSTIQUE.

La simple lecture des paragraphes précédents permet de soupçonner aisément combien la théorie proposée renferme d'incertitudes et combien sa critique s'avère facile.

Pour nous en tenir au seul point de vue du concrétionnement pendant le Quaternaire, on doit bien reconnaître qu'il y a eu dans nos régions des grottes à stalactites avant la première période glaciaire et qu'actuellement, après la quatrième période glaciaire, des concrétions continuent parfaitement à se développer. Peut-être cependant, si l'on applique la théorie seulement aux très grosses masses concrétionnées, ainsi que je l'ai précisé, pourrait-on trouver là un fil conducteur dans l'étude de l'histoire des cavernes.

Son contrôle devrait d'ailleurs pouvoir être réalisé non seulement à l'intérieur des cavités souterraines grâce aux datations par les restes préhistoriques, par l'analyse pollinique, ou par les diverses méthodes de chronologie isotopique, mais également à l'extérieur, au voisinage des massifs karstiques.

En effet, aux grandes périodes de concrétionnement intérieur se rattachent les épisodes de genèse de tufs de sources, les épandages de piedmont revêtus de calcaire (c'est-à-dire les travertins et une large part de ce que les spécialistes de l'étude des sols appellent des formations à croûtes calcaires), enfin même les dépôts de calcaires lacustres dans beaucoup de cas (fig. 8).

Bien des exemples pourraient être cités. Dans les régions de climat méditerranéen atténué (Causses par exemple) on n'observe guère que la liaison des concrétions de cavernes et des tufs de sources. Dans les régions de climat méditerranéen franc (Tivoli et Rome par exemple), la succession se poursuit jusqu'aux travertins et croûtes calcaires. Avec un climat méditerranéen encore plus poussé vers le chaud (Tlemcen par exemple), la chaîne des types de dépôts est continue depuis les cavernes jusqu'aux calcaires lacustres.

Ces phénomènes sont donc étudiés sous des angles divers par les spécialistes de disciplines nombreuses: géologues, préhistoriens, pédologues, paléobotanistes, physiciens, etc... Souhaitons que la coordination de leurs travaux rende un jour possible aux spéléologues la détermination des conditions exactes de genèse et la chronologie des dépôts qu'ils rencontrent sous terre.

Presidente TONGIORGI:

E allora, poichè gli organizzatori di questo Simposio hanno messo in atto il più efficace sistema per impedirmi di partecipare alla discussione, facendomi presiedere questa seduta, io chiedo ai presenti chi vuole intervenire per discutere questa relazione.

A. BOGLI:

M. Gèze, permettez-moi d'abord une question: En quelle période glaciaire les grandes masses de concrétions étaient-elles sédimentées, dont vous parliez auparavant?

GÈZE:

Si l'hypothèse présentée a quoi que ce soit d'exact, les concrétionnements se seraient produits, vous voyez, essentiellement après la première et après la troisième glaciation, pour les principaux ensembles de concrétionnements.

BOGLI:

Was Sie hier präzisiert haben deckt sich gut mit den Beobachtungen im Hölloch. Hier sind mehrere Kilometer weit auseinander liegende Fundorte grösserer Sintermengen von charakteristischer Farbe anzutreffen, deren Alter morphogenetisch festgelegt werden kann. Sie fallen durch die ziegelgelbe Farbe und die Massigkeit auf.

Nach bisher nicht veröffentlichten Untersuchungen habe ich das Präglazial in der Umgebung des Hölloches auf ca. 1.000 m Meereshöhe gefunden, die Sohle des ersten Interglazials bei 750 m, während jene des Felsgrundes im grossen Interglazial zwischen 600 und 550 m, also noch unter der heutigen Talsohle aus Schotter liegen muss.

Die fraglichen Sinterbildungen weisen Höhenlagen zwischen 750 und 900 m auf. Dadurch ist bewiesen, dass die Gänge frühestens im ersten Interglazial sich zu entwickeln begannen.

Der tiefer gelegene Schwerpunkt der ziegelgelben Sintermengen ist der Pagodengang, ein Teil des viele Kilometer langen SAC-Ganges. Weite Strecken sind Ellipsengänge auf wenig geneigten Schichtfugen. Der Pagodengang ist ein eingeschaltetes 75 m langes Kluftgangstück, das mit 3 m Breite bedeutend schmaler ist als die andern Teile. Die Kluft ist der Zubringer des Wassers, das die Sintermengen abgelagert hat. Sie bilden

sich heute nicht mehr. Der Gang wird heute regelmässig alle Jahre zur Zeit der Schneeschmelze und bei grossen Gewittern unter Wasser gesetzt und vom Hochwasserstrom durchflossen.

Die Formanalyse zeigt die folgenden Bildungsphasen:

1. Der Gang bildet sich. Frühester Zeitpunkt ist das erste Interglazial. Das Reifestadium wird bis zum grossen Interglazial erreicht.
2. Nachbrüche und Einschwemmungen von Geröllen bilden eine Trümmerfüllung unbekannter Mächtigkeit, die wahrscheinlich im grossen Interglazial erfolgen.
3. Ziegelgelbe und hellbraune Stalagmiten und Sinterdecken beträchtlichen Ausmasses, so die Pagode mit einer Höhe, inklusive Sockel von 7 bis 8 m und vielen m³ Inhalt, bilden sich. Das Klima ist eher trocken und kann als gemässigt, doch eher warm angesprochen werden. Die Farbe spricht gegen Terrarossabildung. Es handelt sich wohl um das dritte Interglazial.
4. Nachfolgende Wassereinbrüche, die vermutlich zu Beginn oder Ende einer Eiszeit erfolgten, also zur Würmzeit, rissen die geschlossene Sinterdecke auf und schwemmten beträchtliche Schuttmengen weg. Die grossen Stalagmiten wurden zum Teil unterschritten und schief gestellt.
5. Die Wasserzufuhr hält heute noch an, erreicht aber nicht mehr die verheerende Stärke der vierten Phase. Neue Tropfsteinbildungen merklicher Grösse fehlen. Diese Phase ist im weiter unten beschriebenen Beispiel besser ausgeprägt.

Auf 900 m Meereshöhe gibt es einen zweiten Schwerpunkt dieses Sintertyps. Die Phasenordnung ist gleich, doch liegt der Gang 100 m über dem Hochwasserspiegel und ist heute nicht mehr aktiv. Er ist sehr frühzeitig aus der allgemeinen Wasserzirkulation ausgeschieden worden und bildete nie einen Bestandteil des grossen Stromes. Der Querschnitt ist typisch elliptisch, der Stollen ein Schichtfugengang. Der Sinter wuchs aus einer oberhalb gelegenen Bruchzone allmählich in den Stollen hinab, dessen Sohle zuletzt bis zum untern Ende erfüllend. Die Phasengliederung zeigt das folgende Bild:

1. Entstehung des Ganges im ersten Interglazial.
2. Einschwemmung des Schuttes in Form von Hochwasserbildungen in einer Zeit vereinzelter ausserordentlicher Hochwasser. Die Zeit kann nicht näher festgelegt werden, umfasst aber vermutlich den Zeitraum von Ende Mindel bis Ende Riss.
3. Bildung der Sinterdecke von ziegelgelber bis brauner Farbe, die in ein Interglazial, vermutlich das dritte, gestellt werden muss.
4. Schuttarme Hochwasser reissen die Sinterdecke auf und lassen nur noch seitliche Reste als Zeugen der einstigen Ablagerungen bestehen. Hierfür dürften vermutlich die Hochwasser am Ende der Würmeiszeit verantwortlich sein.
5. Der Zustand ist stationär, der Gang ist gänzlich inaktiv geworden.

Die genetische und chronologische Uebereinstimmung der beiden, viele Kilometer auseinanderliegenden Sintervorkommen, von denen das eine tief in der Hochwasserzone steckt, das andere dagegen 100 m darüber liegt, ist auffällig und lässt eine chronologische Gesetzmässigkeit erkennen. Ob sie als Beweis für die Auffassung von Gèze gelten kann, wird die Zukunft zeigen.

In einem andern Punkte kann ich mit Herrn Gèze nicht ganz einig gehen. Wenn er sagt, die meisten Höhlen seien quartären Alters, so gilt das jedenfalls nicht für alpine Höhlen. Wir haben im Hoelloch das Gangniveau — Niveau nicht im Sinne einer bestimmten Höhe, sondern im Sinne der genetisch-chronologischen Einheit — von ca. 1.000 m, das durch Parallelisierung mit den benachbarten Tälern als präglazial i.e.S. zu bezeichnen ist. Es unterscheidet sich übrigens morphologisch deutlich von den andern chronologischen Niveaus des Hölloches. Wir verweisen des weitern auf die zahlreichen höher gelegenen Höhlen Oesterreichs, deren Hauptentwicklung im Pliocän, teilweise sogar im Miocän beginnend, erfolgte. Hierüber kann Ihnen der hier anwesende Vertreter Oesterreichs, Herr Trimmel, genauere Auskunft geben.

WILLIAMS:

Mister Chairman, Ladies and Gentlemen, I hope that although I speak as a single biologist among so many geologists and chemists these comments will still be considered relevant. They do not concern directly the dating of deposits in caves but one of the mechanisms of deposition and so may have some indirect bearing on the matter of dating. It is a known fact that *tufa* can have a biological origin due to calcareous algae and it was suggested to me that *moonmilk* (or *lait de lune*) could have a similar origin. Experiments have shown that a bacterium and an alga can be recovered from deposits of moonmilk which are found at some distance within caves in Great Britain. In laboratory culture, the bacterium has been shown to deposit calcium carbonate in a crystalline form corresponding very well with the crystalline form of the natural deposits found in caves. The alga will grow in the laboratory in a minimal medium, but only when it is growing in the presence of the bacterium. It seems probable that within the caves, where there is no light, a symbiosis occurs between the bacterium and the alga allowing the growth of both organisms and resulting in the deposition of calcium carbonate. Further details of the experiments which I have carried out are given in the paper which I have submitted for publication and I will not take up the valuable time of the Meeting with details. I would, however, point out that the work on this subject is in its very early stages, but that the results so far seem to me to indicate that biological factors do deserve consideration when discussing cave deposits such as moonmilk.

TRIMMEL:

Mesdames, Messieurs, en relation avec les mots de M. Gèze, je me permets de dire quelques mots en ce qui concerne les épisodes de développement des cavernes dans les Alpes Autrichiennes. La genèse des grottes que nous avons dans les Alpes calcaires du Nord a commencé certainement en tertiaire supérieur. Elles se trouvent dans une altitude de 1600 jusqu'à 2000 m, et c'est une altitude qui se trouve plus que 1000, jusqu'à 1100 m au dessus de la vallée d'aujourd'hui. Je pense peut-être à la Eiskogelhöhle, au Tennengebirge, une grande grotte plus ou moins horizontale avec un développement de 3 km. qui se trouve à 2100 m d'altitude.

Les autres grottes, du type grotte glacée que nous avons en Autriche, sont un peu plus bas, mais en général elles se trouvent à 1600 m, au Tennengebirge, Totesgebirge etc. et dans un grand nombre de ces grottes on trouve un très gros concrétionnement, e voudrais dire, du type méditerranéen. C'est un type de grande importance de stalagmites et de stalactites, qui sont tout a fait inactives, fossiles et il y a de telles concrétions dans la Eiskeller, Untersberg, c'est près de Salzbourg, dans l'Eisriesenwelt et je connais une grande grotte, découverte il y a quelques an au bord Nord du Totesgebirge, c'est toujours la même chose. Et une partie des éboulements qu'on trouve dans les grottes est composée des éboulis stalagmitiques.

Dans un certain nombre de grottes qui sont un peu plus bas, qui n'ont pas la même altitude, on peut voir les restes de ces gros concrétionnements et en plus on trouve une deuxième génération de concrétionnement, qui est certainement plus jeune, et qui se trouve plusieurs fois sur les éboulis stalagmitiques de la génération précédente. Et ces concrétionnements ont tout à fait un autre type que les concrétionnements précédents. J'ai parlé dans quelques travaux du terme allemand « Tropfsteingenerationen »; ce sont deux différentes générations sous deux différents climats, deux temps différents, et la présence de ces deux générations me semble très intéressante et d'une certaine importance en ce que nous avons entendu aujourd'hui, et je crois qu'il devra être l'objet d'études suivantes, dans les Alpes septentrionales du Nord.

Je voudrais ajouter encore un deuxième problème dans une grotte au Sud de l'Autriche: nous avons — elle se trouve près de la vallée dans un environ qui a été sous le glacier, pendant l'ère glaciaire; nous avons aussi deux concrétionnements sta-

lagmitiques: c'est la grotte de Criffen en Carinthie et entre les deux générations de concrétionnements on trouve les trouvailles paléolithiques. C'est une chose qui est aussi très intéressant en relation avec les pensées que nous avons entendu aujourd'hui.

MANCINI:

Desideravo porre una domanda. Un problema che da anni anche in Italia si cerca di risolvere è quello della successione degli eventi del Pleistocene. Accanto a interessantissimi contributi dei geologi e geomorfologi per l'arco alpino (Nangeroni, Pasa, S. Venzo) si cerca di chiarire anche i più importanti fenomeni biologici come le variazioni della coltre vegetale, connesse con mutamenti climatici, e di conseguenza anche le differenti pedogenesi.

E' oramai chiaro che nel lungo interglaciale « Mindel-Rissiano » si sono avuti fenomeni pedogenetici simili a quelli che avvengono attualmente in Georgia, Florida ed altri stati della Confederazione americana con formazione di « red yellow podzolic soils ». La più forte differenza climatica era una distribuzione delle piogge quasi opposta alla nostra odierna. Gran parte delle piogge cadevano infatti nei mesi in cui la vegetazione più ne ha bisogno e che sono anche i più caldi. Di conseguenza la pedogenesi era sostanzialmente differente. Come risultato abbiamo suoli profondi anche sei o sette metri (i nostri « ferretti ») di cui qualche esempio tipico mi è stato mostrato dal prof. Nangeroni proprio pochi mesi fa. In tali suoli si è avuta una decalcificazione completa ed una argillificazione sensibile.

La domanda che ci viene spontanea è allora questa: dove è andato a finire tutto il carbonato di calcio che si è dissolto in questo lungo periodo? Non potrebbe aver dato luogo a un notevole ciclo di concrezionamento?

Il prof. Gèze, profondo conoscitore di suoli del bacino mediterraneo oltrechè illustre geologo, propende per un ciclo di concrezionamento nell'interglaciale successivo, il « Riss-Würm », in cui i pedologi trovano però suoli non completamente decalcificati. Non potrebbe invece essere avvenuto tale ciclo nel precedente e molto più lungo interglaciale?

CORBEL:

Je ne prendrai qu'un tout petit point de la discussion, puisque sur le problème des climats, je pense que dans la prochaine séance il y aura une communication du Prof. Warwick et là on aura l'occasion de reparler des problèmes des karst chauds et des karsts froids. Je prendrai seulement le problème qui est en rapport direct avec les concrétions et puis avec les types de climats. Je pense commencer par le type de climat. On a envisagé ici pour l'altitude moyenne des variations de températures, de précipitations, mais en étudiant les variations actuelles de climat et comment il peut varier, nous constatons qu'il se produit alternativement deux type de climats tempérés. Le *type océanique* à précipitations toute l'année, à faible différence de température entre l'hiver et l'été; et puis quand les influences cycloniques du centre européen ou du monde polaire dominant, nous passons à un *type continental* à hiver très rigoureux, à été chaud, avec maximum de précipitations souvent on saison chaude et de forme orageuse. Donc une distribution des pluies et des températures qui est très différente. Et on peut se demander sous lequel des climats se produisent soit les glaciations, soit les concrétions. Il est hors de doute pour les spécialistes des glaciers que l'englacement, la formation de glacier se produite essentiellement sous un climat de type océanique à très faible variation de température mais où il n'y a pas de grand froid, donc où il peut neiger tout l'hiver et où l'été n'espas chaud, les variations de temperatures sont extrêmement faibles et même la neige peut se produire presque en toute saison. Je pense à un climat comparable à celui du Sud de l'Islande où il neige 11 mois sur 12. Et cependant les plus grands froids sont de moins 5° degrés, alors qu'en climat de type continental l'hiver

est très froid, il y a pratiquement peu de neige ou des neiges de printemps très tardives. Le maximum de précipitations est sous forme de pluies d'été qui font fondre le glacier. Il est certain que c'est le type océanique qui provoque les glaciers. Ces types océaniques donnent aussi une couverture de neige importante, même-là où les glaciers ne sont pas formés, et ce sont ces régions très neigeuses comparables à celles des préAlpes, comparables à celles de la Laponie norvégienne ou de la côte Sud-Est de l'Alaska, où la formation actuelle des grottes se fait à une très grande vitesse, non pas par la fonte des glaciers, mais par la fonte annulée des neiges. Maintenant que se passe-t-il au moment de la fonte des glaciers? Quel climat règne à ce moment-là? S'il règne un climat humide, même chaud, on a de la peine à imaginer le recul des glaciers, mais on manque des comparaisons, parce que sous un climat humide, le ciel est couvert et l'évaporation est faible. Alors que sous un climat sec, de type continental, la destruction du glacier est très rapide. Donc ce sont généralement sous des climats secs qu'on voit les glaciers reculer. Alors, à ce moment-là que se passe-t-il pour les grottes? Ou bien elles reçoivent directement un torrent du glacier et il y a effectivement creusement et dépôts; ou bien elles n'ont pas de torrent venant du glacier, et comme le climat d'ensemble est sec, il n'y a pas de maximum de creusement.

Un autre point sur les concrétions: le problème qui se pose et que je connais d'ailleurs très mal, (se me pose beaucoup plus de questions que je ne peux vous donner de réponses), c'est le suivant: quand les concrétions se produisent-elles au maximum? C'est peut-être une question à l'allure élémentaire, mais enfin dans les grottes c'est une question que je me suis souvent posée. En fait, dans les grottes très froides, il n'y a pas ou presque pas de concrétions. C'est un fait d'observation. Dans les grottes chaudes il y a beaucoup de concrétions, mais entre les deux il y a d'immenses nuances, et à quel moment est-ce que l'on peut vraiment avoir le maximum de concrétions? Il me semble, d'après les mesures que j'ai pu faire, mais la vie d'un homme c'est si court pour faire des mesures, que ces concrétions se produisent surtout quand il y a une certaine évaporation en grotte, faible évaporation, mais qui enfin existe. Alors cette évaporation varie selon la température. Je rappelle un graphique très classique des états de la vapeur d'eau et de l'eau, à 0° on passe à la glace et la teneur de l'air en vapeur d'eau est extrêmement faible, ce qui veut dire que pour une variation de température même forte, le dépôt d'eau en grotte est très faible, alors qu'aux températures plus élevées, pour une variation très faible, la différence de la quantité d'eau qui peut tenir dans l'air, est à ce moment-là beaucoup plus forte et on peut avoir donc une évaporation beaucoup plus forte pour un changement de température qui est seulement d'1°. Ce sont peut-être ces possibilités d'une évaporation plus grande en climat chaud, qui expliquent, avec d'autres facteurs, une possibilité de dépôts abondante en climat plus chaud.

CIRY

Monsieur GEZE, dans son rapport nous a apporté une magnifique synthèse pleine de vues nouvelles et qui nous invite à la réflexion.

Il m'en voudra pas, par conséquent, si je me laisse entraîner à en faire quelques unes.

M. GÈZE à mis en relation le creusement des grottes avec les périodes glaciaires. On lui a déjà fait remarquer que cela ne peut être vrai que pour les grottes quaternaires.

En Bourgogne il y a lieu de distinguer au moins deux karsts. Le premier est relativement ancien et a été fossilisé partiellement, comme l'a montré M. TINTANT, par du Pliocène. Il ne peut guère par ailleurs être beaucoup antérieur au Miocène et correspond par conséquent à une période chaude.

Ce karst n'a pu évoluer au Quaternaire, au cours des périodes glaciaires. A ce moment, en effet, comme je le rappelais hier, tout le sous-sol, à partir de 2 m 50 à 3 mètres de profondeur au maximum, était entièrement gelé pendant toute l'année et partant privé de circulations. Le karst mio-pliocène est ainsi resté figé pendant la plus

grande partie du Quaternaire et n'a repris vie qu'avec le grand dégel de la fin du Paléolithique. (Ciry. C.R.A.S., t. 248 p. 2608. 1959).

Un karst plus récent s'est par contre établi près de la surface au cours du Quaternaire et pour celui-ci je suis d'accord avec M. GÈZE. Il conviendrait peut-être toutefois de nuancer ses conclusions qui placent le maximum de creusement des grottes un peu après le maximum de glaciation (schéma 5). Il me paraît, en effet, que ce creusement a pu s'opérer plus facilement au cours même de la période glaciaire à la faveur du dégel annuel des couches superficielles parfois très enneigées qui fournissait en quantités des eaux froides très dissolvantes.

Ce ne sont là, comme on le voit, que des remarques mineures et je désire féliciter M. GÈZE de son très intéressant exposé.

TROMBE:

Je voudrais appuyer ce qu'a dit M. Gèze en soulignant un point qui me paraît assez important en ce qui concerne l'érosion sous-glaciaire ou sous la neige. Quand on a solidification de l'eau, cette eau qui contient du gaz carbonique, le cède, et on a constaté sous les glaciers et sous la neige des accumulations de gaz carbonique et des accumulations de radon, qui suit d'ailleurs le sort du gaz carbonique. Dans ce processus, si on a des accumulations sous-glaciaires de gaz carbonique en présence de calcaire, et si le sol n'est pas gelé — (évidemment si le sol est gelé, le ruissellement ne se fait qu'en surface) — mais si le sol n'est pas gelé on doit avoir une période de creusement formidable — on m'a cité des exemples de corrosion sous-glaciaire considérable par des eaux chargées de gaz carbonique. Ceci s'explique très bien: si l'eau se solidifie en tombant elle enferme le gaz qui se dégage d'elle-même. Elle avait dissous son gaz carbonique et ce gaz carbonique se dégage; on pourrait y avoir des concentrations de gaz carbonique de 100% sous un glacier, si le phénomène s'était effectué d'une façon parfaite, ce qui fait, qu'il doit y avoir corrosion sous-glaciaire et très forte corrosion dans des périodes froides.

Maintenant, évidemment tout dépend des conditions limites: si les sols sont gelés, on n'a pas de corrosion en profondeur, mais si les sols ne sont pas gelés, j'ai l'impression que c'est là la meilleure période de creusement karstiques que l'on puisse trouver.

WARWICK:

I do not want to say too much now, because I shall have the opportunity of the floor tomorrow. I would just like to make a comment in respect of prof. Trombe's remarks regarding the amount of water beneath the glacier. It is a very great question in my own country as to the part played by under-melting in the formation of glacial till. Dr. Carruthers and others have very serious arguments on these questions. From my own studies in the Pennines, I came to the conclusion, that beneath the ice sheet there, the whole process of karstification was stopped, as suggested by prof. Ciry in periglacial areas. Part of the difference between these conclusions and those of Dr. Trombe may be due to differences between ice-sheets and mountain glaciers. In Britain, we are more concerned with ice-sheets, which completely smothered some of our limestone areas and have left behind a considerable quantity of boulder clay. I think the proportion of ground moraine in the base layer of the glacier, also had an important part in determining how much water went underground.

The remarks I was going to make on the question of the complexity of the climatic factors. Have been accurately covered by Dr. Corbel. As Prof. Corbel emphasised previously, in discussing cave climates, one is dealing with two climates — that of the threshold and that of the interior. These often produce very different effects.

In Britain to-day I know no instance (though I may be incorrect in this as I do not know every cave) where precipitation of calcium carbonate is taking place in

the threshold today. Internally, we have many examples in our very wet caves. Some are really too wet for deposition to occur, but in many others formations are still actively being formed. Following from this there is an interesting point coming from archaeological digging.

In a layer which probably corresponds to Atlantic times, we frequently find what may be called *moon milk* or more properly *mountain milk*. This is of a loose crumbly character, which is certainly not forming in the cave entrances to-day. Similarly other caves such as Peak Cavern, Castleton and some of the small caves of the Manifold Valley exhibit soft stalactites and curtains in their threshold zone, which are now dead. Similar material has been reported by Gradzinski from Poland, and by others from Czechoslovakia.

Some of the British tufa deposits are now being dated by archaeological means, for instance at Box in Wiltshire, Romano-British material has been found in the overlying soil. Similar results have also been obtained from Flintshire in North Wales. Excavations in cave mouths, often reveal more solid deposits of travertin or flowstone in contrast to the later more porous tufa. Some of these, as in Elder Bush Cave, in the Manifold Valley, Staffordshire, date back to pre-Würm and possibly pre-Rissian times. I should like to know what are the precise climatic conditions which produce such masses of flowstone.

Finally there is the terribly difficult matter of dating deposits, especially in the interior of caves. As Dr. Franke said this morning, physical methods only go back some 50,000 years, but we are probably considering deposits much older than that with very little to date them. Again there is the question of the large block falls (or *boulder chokes*) which occur in many British and other caves which are no longer active in most cases. It has been suggested that they were caused by periglacial conditions, but I wish to say more about that to-morrow.

TONGIORGI:

Bene io con il Dr. Warwick ho finito l'elenco di coloro che si erano messi in nota per parlare. Chiedo ai presenti se qualcuno vuole ancora prendere la parola, altrimenti pregherei di sostituirmi nella Presidenza per prenderla io stesso.

E allora, se permettete, comincio. Mi pare che fino ad ora sia stato accumulato un materiale piuttosto abbondante per la nostra discussione e che ci permette di riprendere con qualche esempio concreto, la discussione iniziale dal punto di vista teorico. Ed è appunto a questa che io vorrei riallacciarmi prima di tutto.

Noi abbiamo qua uno schema molto semplice, che ci mostra un fatto periodico in una variazione climatica e precisamente nella variazione della temperatura. Quello che in questo schema non è precisato, è la scala dei tempi, cioè è il periodo di questa variazione climatica. Ebbene, io credo che potremmo mettere in quella scala dei periodi di diversa lunghezza. Questa mattina, si sono ricordati qui i calcoli astronomici fatti prima da Milanchovich e poi rifatti da vari autori. Precediamo dal calcolo della risultante dei vari fenomeni astronomici i quali tra l'altro richiedono l'introduzione di alcune costanti come quella della massa dei pianeti ecc. che hanno permesso ad alcuni di discutere sul modo in cui i calcoli stessi sono impostati. Quelli che a noi interessano sono i fenomeni astronomici come tali che possono influire in modo periodico sulle variazioni climatiche; a cominciare da quelli a periodicità più breve, come il ciclo delle macchie solari, ai periodi mano a mano più lunghi, come quello della precessione degli equinozi. Noi possiamo anche considerare questi fenomeni separatamente l'uno dall'altro, e pensare che ciascuno di essi porta necessariamente a delle alternanze di fatti climatici e che queste possono riflettersi nei fatti che noi dobbiamo considerare. Bene, non c'è dubbio che, in alcuni casi, noi vediamo molto chiaramente, e in modo molto evidente, l'esistenza dei fatti periodici a periodo breve. Sta a noi, volta per volta, misurare l'entità

di questo periodo e verificarne anche la costanza. In qualche caso, cicli di 20.000 anni circa si sono potuti dimostrare per lo meno come molto probabili. A fenomeni con questo periodo, si possono riportare dei fatti morfologici che si osservano con notevole frequenza lungo le nostre coste. Mi riferisco a delle regioni in cui esistono delle pareti rocciose che hanno dato luogo ad accumuli di detrito di falda. Innanzi tutto si può osservare che questo detrito mostra la successione di fasi di detrito di grosse dimensioni e di detrito molto minuto, alternanti fra di loro. Ma si può anche osservare che a ciascuna di queste fasi, segue normalmente una fase di sedimentazione del detrito stesso. In alcune situazioni favorevoli, nei depositi di questo tipo sono state trovate industrie umane e resti di fauna. In altri casi, questo detrito si prolunga, all'interno di alcune grotte e va a interferire con il deposito dell'interno della grotta. In questo caso è possibile, una datazione di queste fasi di deposizione. Mi riferisco per semplicità ai due casi che conosco meglio, cioè a quello che si ha nella costa che va da Gaeta a Sperlonga nell'Italia centrale, dove questa successione è molto evidente ed ai vari accumuli di detrito che si trovano nella zona del Fucino nell'Abruzzo. In tutti e due questi casi, si è trovato nel ciclo superiore della industria di tipo paleolitico superiore. La datazione di questa industria è all'incirca da 15 a 18.000 anni. Nel ciclo inferiore, si è trovata dell'industria di tipo musteriano finale, del tipo del micro musteriano, del musteriano denticolato, per cui noi abbiamo fino ad ora un'unica datazione di 35.000 anni.

Questo intervallo di tempo è notevolmente interessante perchè è separato da quella fase, culminata all'incirca tra i 25 e i 30.000 anni fa, che è una fase che nella regione mediterranea si presenta costantemente come una fase secca e relativamente calda che ha portato, lungo le nostre coste, alla formazione di grossi depositi, di dune che sono penetrate anche notevolmente nell'interno delle nostre regioni. Questi due dati, il fatto che questa successione comprende normalmente quattro di questi cicli che appoggiano i depositi marini con spiagge a strombo, dell'ultimo interglaciale, ci dicono che l'ordine di grandezza di questi fenomeni periodici è all'incirca compatibile con quello di 20.000 anni circa del ciclo della precessione degli equinozi. In altri casi, una periodicità con ripetizione di fenomeni sulla base di un periodo di 40.000 anni circa, sembra essere molto probabile. Noi abbiamo pochi argomenti per dimostrare una successione periodica di questo tipo in depositi continentali, ma abbiamo buoni argomenti collegati anche con datazione assoluta se teniamo conto, invece, dei sedimenti di mare e specialmente dei sedimenti di mare abbastanza profondo che possiamo ricollegare sulla base delle paleotemperature e sulla base dei pollini fossili contenuti nei sedimenti marini stessi, ai depositi continentali. In questo caso, il periodo di 40.000 anni sembra essere quello nettamente dominante. Io quindi non insisto sulla pluralità possibile di questo schema. Questo schema va visto, secondo me, non solo come uno schema per indicare una possibile serie di glaciazioni, non va cioè riferito al Würm, al Riss, al Mindel e al Günz come possibili glaciazioni del quaternario, ma va riferito a tutte le successioni, tutte le oscillazioni di tipo glaciale nel quaternario. Questo per ciò che si riferisce al fattore tempo in questo schema. C'è un altro punto, da cui secondo me, non si può prescindere nell'impostare la discussione. Io qui ho sentito spesso parlare di un periodo caldo, un periodo freddo, un periodo oceanico, periodo continentale ecc. Io credo che noi dovremmo sempre, tutte le volte che si pongono dei problemi di questo tipo, porre l'accento su un aspetto leggermente diverso del nostro problema, e che ci permette di chiarire il significato esatto di questo termine caldo, freddo e anche un po' meglio del termine oceanico e continentale che pure si avvicina di più alle nostre esigenze in tutte le ricostruzioni. In pratica, il problema che noi ci dobbiamo porre per dire quando e come è possibile la massima espansione di una fase glaciale, si può ridurre a questi termini: qual'era lo scarto termico tra la temperatura degli oceani e la temperatura media sui continenti e specialmente la temperatura dei continenti, durante il semestre estivo?

In pratica, questo cosa vuol dire? Vuol dire che esiste una fase assolutamente privilegiata nel momento in cui nasce la glaciazione, ed è quella fase in cui una variazione

climatica anche di modesta entità iniziale determina una espansione glaciale, un aumento della superficie ghiacciata sui continenti. E questo provoca, con un aumento della perdita di radiazione solare per riflessione, una diminuzione locale di temperatura. Questo abbassamento di temperatura nei continenti si verifica nel momento in cui gli oceani sono, viceversa, ancora caldi.

Allora, abbiamo un forte sbalzo di temperatura, un forte gradiente tra oceano e continente, avremo cioè dei movimenti intensi, dei movimenti convettivi intensi tra oceano in cui avviene l'evaporazione, e continenti nei quali avviene la precipitazione, la condensazione, in cui si ha l'accumulo, e questa è la cosa per noi più importante, delle precipitazioni stesse sotto forma di neve nelle alte montagne. Quest'accumulo a sua volta se il fenomeno non è tale da annullare i primi effetti determina una ulteriore perdita di radiazione solare per la riflessione della radiazione stessa, quindi un ulteriore raffreddamento e quindi crea una persistenza in questo movimento convettivo e tende a spostare una grande massa di vapore di origine oceanica sui continenti fino a che l'oceano non sia raffreddato abbastanza per rallentare questo movimento circolatorio. Quindi è giusto, da questo punto di vista, il considerare una fase glaciale, una fase di accumulo glaciale, durante la fase di abbassamento della temperatura, cioè durante la fase di crescita dei glaciali, durante la fase ana-glaciale. Quale sarà la conseguenza di questa fase in grotta? La discussione che è stata fatta sui terreni gelati è una discussione un po' portata al limite. Effettivamente il modello del terreno gelato, è il modello del tutto inattivo dal nostro punto di vista. E' il terreno morto. Esistono però dei terreni che sono gelati durante l'inverno, e che sgelano all'inizio dell'estate e questi rappresentano un primo passo verso la situazione successiva che prelude a quella situazione che è quella tipicamente epiglaciale, in cui si ha il massimo effetto. Quindi la situazione tipica delle regioni nordiche, si ricollega attraverso una serie di termini intermedi, dei termini di tipo periglaciale verso la situazione tipicamente mediterranea. Nelle nostre regioni, quando, specialmente ci spostiamo verso il sud, noi nettamente troviamo in moltissime grotte il massimo della formazione di concrezione durante il periodo glaciale, durante i periodi più freddi. Quindi io da tutto questo vorrei trarre una conclusione: schemi di questo genere sono estremamente utili come modello che di volta in volta può essere applicato allo studio di questi fenomeni. Bisogna però tenere conto che lo schema stesso subisce delle modificazioni nel corso dello spazio e che uno schema valido per le latitudini elevate non può rimanere tale per delle latitudini più meridionali. E inoltre lo stesso schema subisce per una stessa latitudine delle variazioni nel corso del tempo. Da questo punto di vista mi pare che la discussione di oggi sia stata estremamente importante in quanto può rappresentare l'inizio di un lavoro coordinato di cui tutti noi sentiamo estremamente urgente l'esigenza. Cioè quello di definire con la maggiore precisione possibile, (disponendo noi oggi di punti di riferimento abbastanza sicuri almeno per la successione cronologica più recente) quelli che sono gli avvenimenti tipici nella storia della formazione dei depositi delle grotte. Se noi arrivassimo alla situazione ideale di raccogliere sotto forma di inchiesta generale questa successione così come si presenta agli studiosi dei diversi paesi, io credo che noi ci accorgeremmo di avere già oggi a disposizione un materiale di primissimo piano che ci permette di impostare delle discussioni veramente approfondite e veramente fondate, su una serie di documenti che hanno un valore generale. Questo secondo me dovrebbe comprendere la formazione delle stalagmiti nelle grotte, i periodi in cui si hanno gli accumuli in grotta di materiali provenienti dal disfacimento della volta, e finalmente l'entità del fenomeno chimico di soluzione, di decalcificazione nei sedimenti di grotta, dove questo è possibile.

Con questo io spero di avere provocato un ulteriore sviluppo della discussione e domando se qualcuno vuole ancora chiedere la parola per potere calcolare il tempo che dobbiamo riservare a Gèze per potere rispondere alla fine a tutte le nostre osservazioni. Nessun altro ancora? Allora lascio la parola al Prof. Pasa.

PASA:

Vorrei confermare con dati pratici due concetti testè espressi e sui quali ritorneremo brevemente domani.

In un notevole gruppo di depositi del Veronese, e recentemente confermati da osservazioni fatte in altre regioni, si osserva che ampi concrezionamenti stalattitici sono stati staccati e travolti in argille rosse con fauna interglaciale mindel-rissiana. Gli indici climatici indicano què variazioni notevoli di umidità e temperatura, in accordo con quanto ha detto il Prof. TONGIORGI relativamente alle oscillazioni secondarie di un grande ciclo. Noi riteniamo che le concrezioni siano mindeliane.

La parte superiore del deposito mindel-rissiano è ricoperta da una concrezione, meno ricca di argilla limosa rossastra (nel rapporto medio di 5 a 1,5).

Nella stessa zona, ma in cavità apertesi in fasi più recenti, abbiamo un fenomeno analogo: la concrezione travolta, che riteniamo rissiana, ha caratteristiche simili a quelle che ricopre il Mindelriss. Infatti essa è ricoperta da sedimenti wurmiani a loro volta ricoperti da concrezioni totalmente differenti da tutte le precedenti per il loro scarso contenuto argilloso.

TONGIORGI:

Nessun altro chiede la parola? Allora credo che noi potremo avere la risposta del nostro relatore, nella seduta conclusiva. Con questo credo che possiamo dichiarare chiusa la seduta di questa sera e ringraziare tutti quelli che hanno portato il loro contributo a questa discussione.

Q U I N T A S E D U T A
Mattino del 5 Ottobre 1960 in VARENNA

PRESIDENTE : Paul Liègeois
RELATORE UFFICIALE : Gordon T. Warwick

Presidente LIÈGEOIS:

Messieurs, nous allons si vous voulez, étant donné que l'heure s'avance, commencer la séance de ce matin. Je n'ai pas besoin de vous présenter le Prof. Warwick; quand on pense à la spéléologie en Grande Bretagne, on pense toujours à lui en premier lieu. Je vais lui passer immédiatement la parole, car vous l'attendez, je crois, depuis un certain temps.

Prof. Warwick, voulez-vous me faire le plaisir de passer à la chaire publique.

Gordon T. WARWICK, M.B.E., B. Sc., Ph. D.
University of Birmingham

CAVE DEPOSITS AND PALAEOCLIMATOLOGY**INTRODUCTION.**

Firstly I should like to express my appreciation of the honour accorded to me in inviting me to act as an official relator for this section of the symposium. I regret that the pressure of my professional duties has not permitted me to cover all the scattered literature and my linguistic failings have limited my choice of work published in other languages than my own.

In view of the time available I have concentrated chiefly upon the physical aspects of cave deposits, though it must be granted that all lines of enquiry must be pursued in arriving at conclusions for climatic changes which have affected cave fillings. Often the remains of contemporaneous animals preserved in cave sediments give the clearest indications of external climatic conditions, though negative evidence is not always reliable. Often conclusions may be drawn about deposits associated with faunal remains which may be applied to unfossiliferous materials found elsewhere. Such conclusions may be ratified by a study of modern deposits, where the climatic conditions are known. Unfortunately this classic method based on the theory of uniformitarianism, and stressed by Sir Charles Lyell, has not been sufficiently applied in this case. By using evidence from several fields of study and from different disciplines, it will be possible to reach more refined conclusions from a careful examination of cave deposits. As in Glaciology it took some time to convince geologists that ground moraine was laid down by glaciers and still longer to convince them of the reality of polyglaciation, so in this field the acceptance of detailed histories of climatic change is slow at first, but continued presentation of evidence will have its own reward.

Much evidence has been inadvertently destroyed, and the interpretation of the reports of archaeologists and palaeontologists is often very difficult, though some have recorded data which was not significant to the observer, which can now be interpreted in the light of modern knowledge. With the great increase in all branches of science

it is impossible for one excavator to master all the necessary techniques and background knowledge and team work appears to be inevitable. Also it cannot be stressed too strongly that representative sections must be left for future workers to test and to apply the more refined methods that will be surely developed in the future.

The plan of this essay will be first to discuss the relationship between cave climates and those of the external atmosphere, followed by a resumé of the main types of sediment to be discussed and the criteria which can be used to diagnose information about the climates or climatic elements of the past. Difficulties of interpretation and the evidence for past and present climatic zones will also be covered.

CAVE CLIMATES.

In considering the climatic inferences to be drawn from cave sediments, one must always bear in mind the difference between the external and internal climatic conditions. In general the cave climate is more equable, with few variations, though modifications occur at cave entrances, whether they be at the beginning of the cave or in some intermediate position.

The elements of the external climate which can be inferred from cave deposits are temperature, precipitation, humidity and wind. Temperature controls many of the processes, both physical and organic which affect the sediments. Vegetation, fauna, chemical reactions and sometimes physical processes are all affected. Where a certain temperature is of critical importance, such as freezing point, or the temperature controlling vegetation growth, greater precision can be obtained, but with one possible exception, only broad inferences may be made. The amount, distribution and type of precipitation is also of importance to the biota, but it also affects the transportation of the products of weathering underground and the weathering processes themselves, especially in the soil zone. External humidity of the atmosphere is chiefly reflected in the threshold zone especially in the case of mineral deposits there. Deductions concerning the wind are chiefly confined to areas of low rainfall in tropical and periglacial regions. Wind can only transport the smaller grades of material, and where it is, or has been dominantly from one direction, an examination of aeolian deposits in caves with varying orientation, in the same region, may provide a clue as to any dominant trend. Caves facing to windward will have more than those opening on to lee slopes. In intermediate positions asymmetric cross sections will develop.

Internally cave temperatures are very even with very minor fluctuations, though there are exceptions to this general rule. Polli (1955) has published the results of ten years' observations in the Grotte Gigante, which show a range of 40°C at the entrance but only 1°C at all but one of his internal stations. In caves with a more active circulation, especially those with two macro-entrances, greater variations may be experienced. The mean temperature of the cave is probably close to the mean temperature of the locality, though few figures proving this have been issued. An exception to this rule occurs where the major part of the cave lies below the entrance, and severe temperatures are experienced in winter, under these conditions the cold air cannot escape and ice may be formed as a seasonal or permanent feature. Similar exceptionally cold conditions may also develop in dynamic ice caves such as the Eisriesenwelt. In general it is the lack of appreciable temperature variation which is most significant.

Direct precipitation is only experienced in the threshold zone, elsewhere there is a delay between the onset of rain externally and the beginning of dripping in a cave below. Such dripping water is often strongly localised, depending upon the relationship of the cave to the structure of the rocks, especially the major joints. In caves with a strong roof formed of an uninterrupted bed of rock, falling water may be exceptionally rare. Especially in shallow caves and near cave entrances there may be many openings for water and water saturated material to enter the cave.

Humidity is more important internally in controlling the character of mineral deposits.

Most caves in humid regions possess atmospheres with high relative humidities, which are also subject to little variation, in contrast to the great variability of the external atmosphere. Again caves with a dynamic circulation are more subject to variation than those with static conditions.

External effects of wind quickly die off in a cave which for this reason causes wind-borne deposits to be trapped in the still air. Localised movements within a cave, essentially katabatic in origin, are rarely of sufficient strength to affect internal deposits, though they may affect the humidity.

In practice it is not always possible to distinguish the effects of each climatic element since they act in concert. For this reason it is perhaps better to consider the effects under the broad headings of climatic or morpho-climatic regions.

CLASSIFICATION OF CAVE DEPOSITS.

In discussing the climatic evidence from cave deposits I intend to «follow» the classification adopted in many European Countries, namely a division into *autochthonous* and *allochthonous* deposits (see for instance Kunsky, 1950 and 1958).

These classes may be further subdivided as follows:

Autochthonous

- Clastic deposits from the cave roof and walls;
- Precipitates from solution (including ice);
- Residual deposits, formed by solution of the surrounding rock.

Allochthonous

- Material fallen into the cave under the direct action of gravity (rock fall, debris fall);
- Material lubricated with a varying proportion of water (rock and debris creep, solifluction, etc.);
- Water-borne material (fluvial, lacustrine, marine);
- Glacial debris;
- Aeolian deposits;
- Organic material (animal and plant origin).

It must be borne in mind that material may be carried to the vicinity of the cave by one agent and deposited by another; for example material deposited as ground moraine may be introduced by solifluction processes. Other materials may be of complex origin like mud introduced by animals and mixed with their osseous remains and with their faecal deposits. Again an allochthonous deposit may be impregnated with secondary calcite. I now intend to discuss the deductions which may be made concerning past climates from these various types of deposits. A lack of time, the inability to read many languages and of the non-availability of much of the literature must make this review incomplete.

INFERENCES TO BE DRAWN FROM CAVE DEPOSITS CONCERNING PAST CLIMATES.

Often it is only possible to draw firm conclusions concerning one or two of the climatic elements discussed above. Although most deposits may be directly or indirectly affected by the cave climate, it is the external climate which is of most interest.

Autochthonous deposits — the mode of origin of the clastic and chemical deposits have been discussed by M. Trombe and Renaut and so I do not intend to discuss this very exhaustively. In limestones, solution, gravity, and ice-wedging are the most important causes of block-fall. Gravity is always present, and unstable structural conditions such as a close joint system and or wide, unsupported cave roofs may cause collapse in

any climates. Obviously moist conditions favour solutional activity, though temperature and the nature of the soil and vegetation cover are also of importance (see below). Frost wedging may also cause the collapse of large blocks of limestone, especially in the interior of caves. Unfortunately such falls can rarely be dated in the interior of caves, though more information may be obtained from the threshold zone. On the other hand smaller rock fragments of a few centimetres in length are most characteristic of conditions where freezing and thawing are common. Such deposits are largely confined to the entrances of caves - especially those which are essentially horizontal. The chips are angular and often of considerable thickness. They are common in high mountains to-day, though the size is affected to some extent by the nature of the limestone. This is most evident in the Marboré massif (Pyrenees) on the Spanish side of the frontier. Lais (1941) has suggested that the largest sizes of frost spalls are formed during the coldest periods and that the smaller fragments indicate moister conditions. He has suggested that under moister conditions water will penetrate the pores of the limestone, but that in drier but colder conditions, only the joints and bedding planes contain liquid. It is only necessary for ice crystals to form across a void, it need not be frozen solid for spalling to occur. Inside the caves under cold or temperate conditions there are few variations about freezing point and so such spalls are rare.

In considering precipitates, calcite is the most important mineral, but precipitation may be caused by several factors, by evaporation of water, by loss of carbon dioxide, and the rate of flow, the size of the openings, etc. (Allinson, 1923). Changes in these conditions may be connected with climatic variations or by changes in local conditions. Such local factors may be eliminated if the conditions over a district are considered. The deposition of calcite is possible under a wide variety of conditions, though it appears to be rare in present-day cold climatic conditions. Despite this many authors have connected the deposition of flowstone with colder conditions. In temperate regions flowstone is common inside caves; but is not so common in the threshold zone. However there is often evidence of soft tufaceous deposits which may be formed from mountain milk (bergmilch). Dead formations of this type occur in the entrances to several British caves such as Peak Cavern, Thor's Fissure Cave, etc., and also near the entrance of Postojna Cave, Yugoslavia. Similar material is sometimes found in deposits at the mouth of a cave, especially near to the walls (Bramwell, 1949, 1950, 1959), and in archaeologically dated sites, in immediately post-glacial deposits. Similar material has also been described from Czechoslovakia (Kukla and Ložek, 1958) and ascribed to Atlantic times.

It is safe to assume that the presence of calcite formations indicates moist conditions within a cave, though the external cause may be seasonal or occasional. Deposition may also occur through spring waters as in the Ventana Cave, Arizona, U.S.A. (Bryan, 1950). Changes from arid to pluvial conditions are the easiest to infer. Such water percolating through a deposit may cause secondary calcification after it has been laid down. Flowstone layers of massive travertine occurring in cave entrances in present-day temperate conditions are not so easy to interpret, especially where conditions are still wet, but not producing calcite.

It is possible that in the future it may be possible to determine directly the temperature prevailing at the time of deposition of calcite. Studies of the ratio of radioactive oxygen to normal oxygen (O^{15}/O^{16} ratio) in modern sea-water have shown proportion of O^{15} absorbed in the calcareous shells of foraminifera and other animals reflects the prevailing temperatures (Epstein, et al, 1951), especially those of summer when the greatest growth occurs (Emiliani, 1955). Unfortunately water vapour derived from the sea is less rich in O^{15} than the sea since H_2O^{18} has a lower vapour pressure than H_2O^{16} , and so it evaporates more slowly. Again the rainfall of an inland area may only be derived in part from a marine source and freshwater, derived from underground sources or from rainfall, is less rich in H_2O^{18} . The amount of water of marine

origin may be inferred from the proportion of salt nuclei for the raindrops. This amount and the total number of nuclei are very variable (Junge, 1951). For these reasons the determination of palaeotemperatures, from such data will be very difficult. Even if reliable absolute figures are unobtainable, some information regarding relative palaeotemperatures may be obtained. Whether the necessary effort and expense will be considered desirable is another matter.

The presence of aragonite has been suggested as a potential indicator of palaeotemperatures by Moore (1956). He plotted the caves of Western USA where aragonite was forming to-day, those containing unstable aragonite and those with no aragonite at all. He found that the first class occurred south of the $60^\circ F$. ($15.5^\circ C$) isotherm, the second class between the $60^\circ F$ and $45^\circ F$ ($7.2^\circ C$) isotherm, and the third to the north of the $45^\circ F$. annual isotherm. The matter is complicated by the effect of strontium and other ions on aragonite precipitation (Wray and Zeller 1956), and also the rate of evaporation (Pobeguín, 1957). Since aragonite appears to be much rarer in Europe, this method may not be universally applicable. In the British Isles aragonite occurs mainly in the Northern Pennines where strontium is known to be present and in Devon and Somerset, where conditions are most favourable climatically, but where the strontium position has not been investigated in detail.

Insoluble residues from the limestone are more important inside caves than in threshold accumulations. They often consist of colloidal iron oxides, with varying proportions of other minerals such as quartz, giving rise to clays or loams. Although variations in solution affect the rate of accumulation, this cannot be detected and the nature of the deposit is largely independent of the type of climate prevailing. The contribution from this source has perhaps been exaggerated in the past since many limestones contain very small insoluble residues. Bretz (1942) has suggested that the accumulation of such residual clay will occur in phreatic caves, and has reported many examples from Missouri (Bretz, 1953). Occasionally vein minerals and debris from igneous intrusions may also be included (Sutcliffe, 1951).

Allocthonous Deposits — it is difficult to separate the material which falls into a cave from the corresponding autocthonous material. It is of course confined to localities in a cave system near to openings to the surface. In potholes a dejection cone may accumulate from this source, e.g. the large cone at the end of the main chamber of Grotte de Sabart, near Tarascon, (Ariège), France. Near the entrances of horizontal caves, scree may enter, or even choke a cave mouth. In modern times some potholes receive considerable accumulations of stones from human agency — the lower chamber of Eldon Hole, Derbyshire below the surface shaft, is choked with material obtained from nearby walls. Coarse material often prevails in natural deposits of this kind, but there may be finer material derived from soil, ground moraine and other superficial deposits. Where a cave roof has collapsed it may be possible to date this event from the material included in dejection cones. Sutcliffe (1960) has excavated such a cone in the Joint-Mitnor Cave, Buckfastleigh, South Devon, which contained gravels from an overlying terrace, resting upon water-lain deposits presumably laid down under phreatic conditions. Such cones may, as in this instance, contain animal remains which enable the deposit to be dated and the climatic conditions established. At Joint-Mitnor Cave, the fauna was clearly of Last Interglacial age.

A free fall of rock material is only possible through relatively wide openings, but finer weathering products can enter through narrow fissures, especially when lubricated with water. Where a cave lies, or lay beneath an area experiencing a periglacial climate with a marked spring melting season, considerable amounts of solifluction debris or 'head' may enter a cave. In Elder Bush Cave in the Manifold Valley, North Staffordshire, England, the lowest deposit consisted of boulder clay which had slipped down through a small tube in the roof at the back of the cave. Accumulations of such material are commonly at a lower angle than the previous type. In rare cases a mud flow may

enter a cave. A fine example was found during quarrying operations at Llywyn-On quarry near Penderyn, South Wales, but has since been destroyed. Such deposits give a clear indication of the excessive wetness above ground.

Even under less severe conditions a considerable amount of fine material, including insoluble limestone residues and soil material filters through quite small fissures. Many vermiculations bear witness to surface material brought into caves in suspension by fine films of water, e. g. in Poole's Cave, Buxton (Warwick, 1959). In the threshold zone this material is mixed with autochthonous thermoclastic material and animal remains, which may later be cemented by calcite. Such material is often referred to as cave-earth in English, but it covers a wide range of deposits. The date of formation and the climatic indications may be provided by artifacts and faunal remains. The fine material may reflect the character of the overlying soils, and where these were formed under a different climate from the present, may further assist in the elucidation of the climatic sequence. This is most noticeable where mineral staining is affected in its colouration by temperature, especially under dry conditions.

Fluviatile deposits are more commonly found in the interiors of caves and consist of a wide range of size gradings, though in any one site, the deposits may show very clear sorting action. The size of the particle deposited is a measure of the velocity and turbulence of the water which transported it. Deposition in any one point may be the result of local conditions, a zone of low turbulence may lead to local deposition and give a misleading impression of the general hydrological conditions. Stream deposits may be in the form of gravel or finer material, often tending to become finer as one penetrates a system, except where additional material is added from fissures in the cave. In an arid region the presence of gravels indicates a former more pluvial epoch, but elsewhere it may be the result of internal or external rejuvenation and/or capture. The application of the methods of sedimentary petrology to such deposits has begun and perhaps after suitable controlled experiments climatic data may be obtainable from such studies. The reader is referred to the address by M. Renault in this connexion. Within a cave system river deposits may be often removed and re-deposited during periods of flooding, so that cave gravels reflect the latest period of occupation by a stream. Again a record of decreasing stream velocity may be recorded in the lowering of the average size of the constituents, but an increase in velocity may remove all the previous evidence. Where a stream enters a swallow fallen blocks may filter off the larger upward passage will slow down the flow and cause deposition at the cave entrance. material and choke the entrance, or again a submerged section may also act as a trap. Thus it is difficult to speak of a 'typical' size grading even for one cave. Where the entrance is clear, the stream bed is often contracted, increasing the velocity and turbulence and so preventing deposition. The reverse may occur at an entrance, or again an A series of effluent cave deposits has been analysed by Donovan (1955) in Gough's Cave, Cheddar Gorge, Somerset. Here a layer of laminated sand and coarse sand underlies a conglomerate consisting of rounded pebbles and sand. Donovan interprets the lower bed as being brought in by floods into a permanently flooded section which rises towards the entrance. Rainfall was probably evenly distributed in order to maintain such a level. The coarser deposits are thought to be due to more violent floodings following upon the spring melting of snow on the Mendip Hills above.

Still water deposits may be from permanently flooded sections of a cave in the phreatic zone of from lakes with a free air surface. These are usually finely laminated and the material of a fine grading, though coarser grades may be found where a stream has entered a former lake, leaving a delta. The former type may provide little climatic information. The other type may occur where external glaciers have ponded back water in the cave. A classic example of this is in Victoria Cave, near Settle, Yorkshire. Here silty; laminated clays were excavated by Tiddeman and others (1875-8, summarised in Warwick, 1956). In South Wales, the cave of Agen Allwedd, near Crickhowell,

has a narrow opening in the side of the Usk valley, and inside this opens out into a large chamber beyond a stream passage, which is filled to a depth of c. 7-8 metres with laminated, yellow silty clay and the 'tide-mark' of the old lake in which it was deposited can still be seen. This lake was probably fed by meltwaters from an ice-sheet in the Usk Valley which ponded up inside this cave, completely blocking access to the passages beyond the main chamber, though these have now been washed clear again. Temporary flooding of a cave which has very narrow sections can also lead to fine deposits, though a stream channel may be kept open in time of low water. Such deposits occur in Manchester Hole, Nidderdale, Yorkshire, and probably date from the last glacial stage. In arid regions lacustrine deposits point to former more pluvial times, as in the four cases noted by Llopis Llado (1950) in Spain.

Organic remains are commonest in the gravels, but even there they are rarely numerous and must be interpreted with care since they may be washed out from older deposits.

Marine deposits are limited to sea-caves, which may occur in many types of rock. Those best known are those opening on to raised beaches or wave-cut platforms, such as Paviland Cave in the Gower Peninsula of Glamorgan, South Wales. (Sollas, 1931). Here the lowest layer consisted of marine shingle and the change to terrestrial deposits indicates a change in local climate, and since this is a stable area, it can be connected with a thalassostatic change in sea-level of climatic origin, during a cold period of the Last Glaciation. At a lower level caves which were clear of direct marine influences are now being invaded by the sea following the Flandrian transgression, e. g. the gours of Holwell Cave, Crantock, Cornwall (Smith, 1958), were presumably formed from the surrounding calcareous slate during a low-water period and are now being destroyed by the sea.

Glaciers may contribute indirectly to cave fillings by the debris carried in melt-water streams, the distance from the ice-front determining the dominant size-grading, but fluvio-glacial material of this type may be of very mixed material. Also later stream action may resort it. Where a cave or pothole was actually covered by ice, some ground moraine may be introduced directly, but more frequently by slumping and solifluction. Many of the smaller potholes of Yorkshire were filled in this manner, and have had to be dug out by potholers, though in the case of Malham Tarn Pot (Waterfall, reported in Warwick, 1956) digging stopped at 27 metres. Raygil Fissure, in Lothersdale, near Skipton, Yorkshire was exposed by quarrying and gave the following section:—

	Thickness (metres)
Boulder Clay	10
Laminated Clay	3
Sand with numerous clayey layers with Hippopotamus <i>Rhinoceros</i> <i>leptorhinus</i> , hyaena and cave lion	3.5
Stiff yellow clay with large masses of angular limestone	3

A further 20 metres of deposit were found but imperfectly described. The fauna indicates an Interglacial age and the overlying deposit the change to sterile glacial conditions.

Aeolian deposits are mainly confined to special environments, chiefly arid, steppe and marine. Sand of this origin may be found in caves near to the sea, and in regions within the confines of past or present arid and semi-arid regions. Finer dust deposits are found further from the centres of aridity, both of cold and warm temperatures. The commonest deposit of this nature is loess, though not all loessic deposits are of aeolian origin. Such material may have drifted into caves or have settled in the shelter of cave mouths, whilst a great deal found its way in by solifluction as in Hungary (Kerenkes, 1951). Aeolian deposits are marked by a very strong selectivity of grain size. The fineness of such material makes for low porosity, and in South Africa Brain (1958)

has used this to determine changes in deposition by measuring the porosity of cave sediments by the standard methods employed by foundation engineers. The aeolian deposits being less porous than the coarser autochthonous fillings prevailing during more pluvial times.

The bones of animals form a varying proportion of certain sediments as already mentioned. They are chiefly to be found in the threshold zone. These remains derive from animals which lived in the cave, or came to die there or were brought in as food by carnivores. Some of the remains found on dejection cones are from animals trapped in open holes and some found in stream, stream-deposits may be from animals drowned in water holes or in the surface rivers. The cave-dwellers also contributed faecal droppings and mud brought in on their feet and fur. Eley (1861) records the amount of mud hair and bones deposited on the rug in his study by his dog in one afternoon as a measure of this mode of filling of caves.

The animal remains often provide the surest indication of the prevailing climate; especially where there are large numbers of them. Not all animals are good climatic indicators, some have a wide range of adaptability and others have narrower climatic tolerances. The association of faunas with particular biotopes is most pronounced in the Upper Pleistocene deposits (Zeuner, 1945), which are fortunately more important because they are commoner than the others. The reader is referred to Zeuner for further particulars concerning this matter.

CAVE SEDIMENTS AND CLIMATIC ZONES.

It cannot be overstressed that climatic deductions must not be based on a consideration of one climatic element where possible. It is therefore worth considering very briefly some of the indications of past and present examples of the main morpho-climatic zones as represented in cave deposits. Peltier (1950) has suggested evidence for nine morpho-climatic regions on the basis of surface morphology, this scheme will be followed in part, but with modifications, especially for the colder divisions, based in part upon Zeuner (1945, Chapter X) and Büdel (1949). Owing to the lack of regional syntheses in many areas and of an imperfect search of the available literature, the conclusions which may be drawn are of very variable validity.

Polar ice regions — in these areas the land surface is still covered with ice sheets, of sufficient thickness that the lower layers are subject to flow. In such cases any cavity will be filled with ice, and the major flow will ride over it, probably along a slip-plane. The bottom ice, being rich in debris would produce ground moraine *in situ*, with fluvio-glacial material completing the filling if such ice sheets should melt.

Regions covered by temperate glaciers and ice-sheets — following the terminology of Ahlman (1948) — these areas contain ice masses which are at freezing point, except for the top few metres in winter. In areas covered by ice-sheets, the whole landscape is smothered under ice, in high countries only the valley floor and part of the lower slopes may be covered so that a special type should be established for such areas. Where an ice sheet is thin, it acts largely as a semi-rigid mass and easily overrides narrow openings. Some melt-water may escape downwards, but if the sheet is active, the pressures developed will close any major water channels at depth. If the ice is stagnant, water may circulate and so enter the karstic systems. The atmosphere of the caves will be chilled to freezing point, but variations will not occur so that frost action is reduced. I have argued (Warwick; 1956) that a cave covered by a glacier is a dead one. In the case of Cae Gwyn, Denbighshire, North Wales, boulder clay blocked one of the entrances and the fossiliferous sediments of this shallow cave were left undisturbed and the glacial material was laid down in an orderly fashion without

showing signs of slumping or movement (Hicks, 1888). Again in Yorkshire many open potholes are surrounded by steeply sloping edges of boulder clay, which only collapsed in the centre into the cave — there are few signs of modification by solifluction — presumably the till dried out quickly and became stable. Except for the two caves cited above most of the potholes are open or only partially filled with drift. This supports the hypothesis that the ice sheet rode over the holes. In the majority of cases the caves and potholes of this region lie in tributary valleys of the major streams, along which the ice sheet advanced and retreated. Malham Tarn Pot lay in a valley running from the line of retreat of the ice edge — the other case is more difficult to explain.

After the ice has retreated streams will cut into the drift and resort the material, some of which may be carried underground. Where an area has been glaciated on more than one occasion and only the record of the last glaciation remains, then the dating of these fills is difficult; especially when it is likely that the ice sheets traversed the same regions and carried the same types of erratics. In the English Midlands in the area where successive ice sheets did not always approach from the same direction, there are no caves:

In Norway, Horn (1947) has suggested that the caves of Nordland fylke were formed beneath the Scandinavian ice sheet, but part of his argument depends upon his rejection of the possibility that these caves could have been formed beneath the water table. On the other hand he does take into account morphological evidence which indicates that the relationship of the caves to the present relief is anomalous and only to be explained by glacial feeding. Halliday (1954) in dealing with caves in the arid western USA which were invaded by ice, supports the hypothesis of the writer, though he has elaborated the effects produced by the approach and retreat of the glaciers with special reference to Neff Canyon Cave, Utah. This question of sub-glacial caves appears to be one ripe for further investigation.

Mountain glaciated regions — here there is a sharp division between the formerly glacierised parts of a valley and the remainder which would be subject to a form of periglacial climate. Conditions of this nature occur in the Alps and Himalayas etc. but I have been unable to find any reference to caves in such regions. Dr Elisabeth Schmid (1958) has summarised the history of cave sediments in Switzerland and has considerable information on mountain caves in formerly glaciated areas, but I have been unable to study this work in detail. Where glaciers hang above the main valley, caves in the valley sides under such glaciers, may be able to drain off more water than those under a valley glacier because of the smaller size of the glacier, and because of freer connection with the main drainage lines. In the valley floors the results should be much the same as in areas of former ice sheet coverage in lower regions, except that erosion of large parts of valley side caves may be affected and evidence of former cave sediments removed. This is probably the case in Sutherland, North West Scotland (Corbel, 1952).

Periglacial zones — these are complex areas of different character, depending upon the latitude, altitude, and nearness to the sea. Here it is only possible to mention a few models, M. Corbel has made a special study of these regions, some of his work being summarised in his doctoral thesis (1957). In regions of deep permafrost water movement ceases, though artesian flow occurs beneath. The surface active layer thaws in summer and any depressions are quickly filled with solifluction debris; It is doubtful whether some of the most severely frozen areas in unglaciated regions, as in Siberia were ever free of ground-ice during Quaternary times. In other areas, permafrost conditions have become established since deglaciation occurred at the end of the Last Glacial, e. g. in Canada, but again caves are uncommon and liable to filling with solifluction debris.

In milder areas of periglacial areas, especially near to the sea, where the atmospheric circulation is more variable in winter, the ground may not be frozen to any great depth

and then mainly seasonally, with localised ice bodies such as ice wedges, patterned ground, festooning, etc. On limestones, residual soils will be borne down into valleys, dolines and caves by solifluction in spring and summer, leaving the rock bare or only thinly covered. Freezing and thawing will occur frequently so that frost spalling is common and angular debris may litter the limestone, especially below steep cliffs and on level ground. Cave mouths are specially liable to attack. Ice bodies may form in the finer-grained sediments laid down in previous times. A case of patterned ground in an existing cave was reported by Schadler (1931) from the Eislug at the eastern end of the Totengebirge, Austria. Fossil examples have also been found in the Abri de la Chaire, Moutiers (Charente), France (Alimen, 1950). In South Devon, Sutcliffe (1957) has described many examples of shattering of flowstone floors, e. g. in the Baker's Pit -Read's Cave system at Buckfastleigh. He also discovered in Eastern Tors Quarry Cave, Yealmpton, a cave choked with laminated stream sediments which had been faulted. These phenomena he has ascribed to the formation of ice bodies in cave sediments. These last examples occur within the cave interior and were probably formed by the sinking of cold air and the formation of ice in the fine grained material. Frost action causing spalling appears to cease beyond the entrance zone and walls display scallops from a past period of occupation by running water.

Similar conditions apply to-day in many mountain environments, where cave -ice may appear in modern caves, like the Eisriesenwelt, Austria and Grotte Casteret, in Spain. In these cases active spalling at the entrances to horizontal caves builds up a barrier which retains the cold air of winter. In the Grotte Casteret this is made up of large blocks, but in the case of the nearby Grotte Glacée de la Casque, the blockage is of fine material. Snow may also increase this effect. The melting of the snow also produces water for solution and to feed the ice below. Beyond the entrance deposition is small, and in Grotte Casteret a few scallops still survive in the centre of the main gallery. This contrasts with the shattered continuation of the cave at a high level at the back of the cave, where the roof has collapsed. Concretions are rare, though not totally absent. A little fine material is precipitated when the water freezes, leaving a very wet type of bergmilch when melting occurs. The diagnosis of such conditions in the past may be difficult, but should be looked for in our caves.

In tundra areas milder conditions are reflected in the presence of vegetation producing humic acids and some carbon dioxide, though the acid conditions and winter cold inhibit bacterial decomposition. As Corbel has stressed, under such conditions corrosion is dominant and cave formations are rare. The presence of boulder clay from former glaciers assists in the establishment of acid soils with a high organic content.

In the drier continental interiors steppe-like conditions operated in the past and occur to-day in the central parts of USSR and operated over much of East Central Europe in the past. Under such conditions wind is more important and aeolian deposits were laid down, derived in part from the outwash material of the North German Plain and its eastern continuation. Some of the loess entered caves directly, though much was introduced through fissures, at a later date perhaps under slightly moister conditions. Kerenkes (1951) has described several examples from Hungary where the material found in caves is sometimes called cave-loess because of its higher calcareous content than the exterior deposits.

In Czechoslovakia, Kukla and Ložek (1958) have established by mechanical analysis, a method of distinguishing between loess deposited directly in a cave from that washed in later. During the former phase, the dust content increases upwards in the deposit, but during the latter phase the finer gradings are relatively greater.

The dry conditions of the steppe climate do not favour the deposition of precipitates, in the form of cave formations (or speleothems). Evaporation occurs, though some deposition may occur within the cave sediments.

The problem of relating cave sediments to periglacial conditions is one of the most

complex, and the writer is conscious of his inadequate coverage of the subject. Amongst the literature on the subject is the synthesis of periglacial conditions in Poland as reflected in cave sediments by Chmielewski (1957) which I have been unable to consult.

Caves in Temperate Regions — again a distinction should be made between oceanic and continental conditions. In such regions as the British Isles, all limestone areas receive a considerable rainfall (Warwick, 1958) and freezing occurs in winter but not for long periods. Inside caves, cave formations are common and actively forming, though locally re-solution is taking place. In cave entrances calcite precipitation is rare, though evident in the past, under slightly warmer and damper conditions. Frequent visiting by speleologists renders observations on the type of other fillings a very difficult matter to determine. In the threshold zone true soils may occur in the surface layers of the talus, but quickly die off towards the dark zone. Fallen rock in archaeological excavations in cave entrances which have been left unworked during the winter bear testimony to the action of frost and solution loosening of blocks. In caves with active streams, deposition may occur, though it is much less active than in the past and streams may be cut into old accumulations of gravel or mud. The cave interiors have a high humidity and so carbonate precipitation is largely due to loss of carbon dioxide obtained from the rich supplies in the soil air. Production of carbon dioxide in the soil air only stops on a few days in the year as shown by experiments at Rothamstead (Russell and Russell, 1950).

In more continental conditions, seasonal variations of temperature and rainfall are much greater. Winters are colder and drier, with sometime a longer period of snow cover but less in amount, and summers are warmer and moister. According to Corbe (1957) these conditions produce greater thicknesses of superficial deposits due to decalcification, though the drier conditions probably slow up the transference of this material underground. Again speleothem formation will be slowed up by the lack of solvent; and should show more seasonal variation in growth.

Mediterranean regions — here again different sub-divisions occur, but the establishing of these must be left to others. The dry, hot summers and wetter winters should emphasise the contrast in seasonal deposition of calcite. Zeuner (1945) suggests that in cave entrances cave earth or loam is probably not forming to-day, but that in some caves such as the Grotta delle Capre in Monte Circeo, Italy, travertine is still forming. However past deposits in the Grotta Romanelli consist of terra rossa with a fauna of typical Mediterranean type but rather thinner than the other sediments associated with cooler periods; This probably indicates that Mediterranean conditions produce poor conditions for cave filling. Changes to colder and wetter conditions certainly produce greater quantities and perhaps the very rich decorations of Castellana Grotte are largely the product of former climates. The report from Professor Pasa will no doubt throw more light on this question.

Arid and semi-arid regions — the marked lack of rainfall, often of a seasonal or occasional nature makes for a great reduction in the formation of calcite formations, and also of water-borne material, whether by flowing water or even soil creep. Aeolian material increases in amount, and Brain (1958) has given a very detailed account of deposits from dolomitic caves in South Africa. Besides the lesser porosity already referred to, wind-borne grains showed a greater rounding and also a pitted surface compared with the polished surface of water-borne sands. Autochthonous materials were often very jagged in appearance, especially dolomite grains detached by differential solution. Brain also obtained information about past rainfall by comparing the colour of cave dolomitic sands of local origin with those of dolomitic soils under varying amounts of precipitation. Also an increase in the amount of quartz indicated more arid conditions. In

very dry areas dusty surface layers may be encountered, as in the region bordering the eastern edge of the Rocky Mountains (Hunt, 1953).

A slight increase in precipitation may be recorded by increased cementation of cave deposits, as in Ventana Cave, Arizona (Bryan, 1950).

Tropical and Equatorial Regions — once more the precipitation increases, together with high temperatures. Frost action is unknown but chemical action is greater. The higher temperatures favour evaporation and loss of carbon dioxide, so that chemical precipitation is often considerable inside tropical caves. As the precipitation increases, vegetation becomes richer and the supply of carbon dioxide to the soil air increases rapidly, so that solution may occur rapidly in passing underground, but the high temperature militates against the retention of the excess gas inside the cave. Solution between blocks of limestone causes frequent collapse and large scale development of dolines, poljes, etc. Residual weathering products may be thick, though they are liable to rapid washing underground. In active caves variations in stream flow may be considerable. In Jamaica Miss Sweeting (1958) found variations of up to 20 metres in the water level of Windsor Caves, which must remove vast quantities of material.

I have been able to find few accessible accounts of sediments in tropical and equatorial caves. Chhibber (1934) mentions large stalagmites in some of the Burmese caves near Moulmein, which also exhibit large amounts of block fall and bat guano. Guano forms great thicknesses in some of the Borneo Caves. An old report from Everett (in Evans *et al.* 1879) refers to large quantities of tenacious yellow clay in some of the caves of Borneo, which was strongly cemented nearer the entrances. In these caves the deposits may be waterlogged and perhaps this is the source of the cement.

In the wetter parts of the tropical regions which have a marked seasonal distribution of rainfall; laterites develop, and deposits derived from them may be deposited in caves. In Quercy and Bas-Languedoc, France, Gèze (1938, 1940) has attributed the phosphorite deposits of those regions, found in old potholes and caves, to the product of such weathering in Eocene times. It is rarely possible that such data becomes available, but further search may find other examples. In Britain fossil karst of Triassic age has been dated by finds of vertebrate fauna in their filling, but few details have been published as yet apart from some preliminary reports.

CONCLUSION.

It can be readily seen that many of the conclusions reached in this essay of a tentative nature. Evidence which has already accumulated shows that climatic interpretations of cave sediments must take account of many factors and that within the broader climatic zones, many subsidiary groups may be established. With refined methods of analysis, inductions may be more firmly established, but it appears that the day of the lone worker is passing, and that teams of experts are required. Co-operation is necessary and an increased exchange of views imperative and if this symposium achieves nothing else, it will certainly have succeeded in this respect.

In making this all too inadequate review I feel that it is the threshold deposits which will continue to offer the most important information, for such deposits can most readily be dated. With an established external climatic chronology, the problems of internal deposits can be tackled more satisfactorily. I feel too that the contributions of soil science; sedimentary petrology and soil mechanics will provide the most useful techniques for the study of the clastic deposits, whilst the techniques of the physicist and chemist will give more assistance with the cave formations. Above all, unless the climatic information can be allocated to its correct place in the geological past, it will be of little use.

ACKNOWLEDGMENTS.

I would like to thank the organisers of this symposium for their liberal hospitality at Varenna, and the University of Birmingham for assistance towards the cost of travelling here. I must also acknowledge the assistance of Drs P. D. Tilly and A. S. Sutcliffe in translating various references printed in German, and the latter for permitting me to use certain unpublished data from his Ph.D thesis.

BIBLIOGRAPHY

- AHLMAN, H. W., 1948 - *Glaciological Research on the North Atlantic Coasts*. London.
- ALIMEN, H., 1950. - Indications Climatiques dans les couches archéologiques d'un abri (Sol polygonal de Moutiers Charente). *Bull. Soc. Prehist. Fr.* XLVII, pp. 286-8.
- ALLINSON, V. C. 1923 - The growth of stalagmites and stalactites. *J. of Geol.* XXXI, pp. 106-25.
- BRAIN, C. K., 1958 - *The Transvaal Ape-Man-Bearing Cave Deposits*. Mem. Transvaal Museum, No. 11, Pretoria.
- BRAMWELL, D., 1949 - Physical properties of some Derbyshire and Staffordshire Cave Earths. *C.R.G. N/L.*, 21, pp. 5-8.
- BRAMWELL, D., 1950 - Cave Dwellers and Dens of Pleistocene Animals. *Trans. C.R.G.* I. 4; pp. 47-52.
- BRAMWELL, D., 1959 - The sequences at Dowell Hall Cave. *The Lyre*, III, pp. 13-15.
- BRETZ, H. H., 1942 - Vadose and phreatic features of limestone caverns. *J of Geol.* L, pp., 675-811.
- BRETZ, H. H., 1953 - Genetic relations of caves to the peneplains and big springs in the Ozarks. *Am. J. Sc.*, CCLI, pp., 1-24.
- BRYAN, K., 1950 - Geological interpretations of the Ventana Cave deposits. in Haury, E. W. BUNDEL, J., 1949 - Die raumliche und zeitliche Gliederung des Eiszeitklimas. *Die Naturwissenschaften*, XXXVI, pp. 105-12, 123-9.
- CHHIBBER, H. L., 1943 - *The Geology of Burma*. Chapter VIII. London.
- CHMIELEWSKI, W., 1957 - Periglacial cave deposits in Poland with special stress on fossil soils. *Resumés des communications, Vth Congrès d'INQUA*, p. 41.
- CORBEL, J., 1957 - *Les karsts du nord-ouest de l'Europe*, Lyon.
- DONOVAN, D. T., 1955 - The Pleistocene deposits at Gough's Cave, Cheddar including an account of recent excavations. *Proc. U. Bristol. Spel. Soc.*, VII, 2, pp. 76-104.
- ELEY, H., 1861 - Some observations on the accumulation of cave deposits. *The Geologist*, IV, pp. 521-5.
- EMILIANI, C., 1955 - Pleistocene temperatures. *J. of Geol.* LXIII, pp. 538-78.
- EPSTEIN, S. *et al.*, 1951 - Carbonate water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Am.*, LXII, pp. 417-26.
- EVANS, J., 1879 - Report of the committee ... appointed for exploring certain caves in Borneo. *Rept. Br. Ass. Adv. Sc.*, pp. 149-55.
- GÈZE, B., 1938 - Contribution à la connaissance des phosphorites du Quercy. *Bull. Soc. Géol. Fr. Ser. V, Vol. VIII*, pp. 123-46.
- GÈZE, B., 1940 - Sur les phosphorites du Bas Languedoc. *Ibid.* X, pp. 87-94.
- HALLIDAY, W. R., 1954 - Effects of glaciation on the caves of the western United States. *Tech. Note*, XXIII, *Salt Lake Grotto, N.S.S.*, pp. 1-4.
- HAURY, E. W., 1950 - *The stratigraphy and archaeology of Ventana Cave, Arizona*. Ariz. Univ. & New Mexico Univ. Press.
- HICKS, H. H., 1886 - Results of recent researches in some bone-caves in North Wales (Fynnon Beuno and Cae Gwyn). *Q.J.G.S.* XLII, pp. 3-19.
- HICKS, H. H., 1888 - On the Cae Gwyn Cave, North Wales. *Q.J.G.S.* XLIV. pp.561-77.
- HORN, G., 1947 - *Karsthunler i Nordland*. Norges Geologiske Undersøkelse. No. 165. Oslo.

- HUNT, C. B., 1953 - *Pleistocene Recent boundary in the Rocky Mountain Region*. U.S.G.S. Bull. 996-A.
- JUNGE, C., 1951 - Nuclei of atmospheric condensation. *Compendium of Meteorology*, Boston, pp. 189-91.
- KERENKES, J., 1951 - Zur periglazialen Sedimentbildung in mittel Europäischer Höhlen. *Quartär*, V, pp. 41-49.
- KUKLA, J., and LOŽEK, V., 1958 - On the problems of the investigation of cave deposits. *Ceskoslovenský Kras*, XI, pp. 19-83 (Czech and English text).
- KUNSKY, J. 1950 - *Kras a Jeskyne*. Prague.
- KUNSKY, J., 1958 - *Karst et Grottes*. Paris.
- LAÏS, R., 1941 - Ueber Höhlensedimente. *Quartär*, III, pp. 56-108.
- LLOPIS LLADO, N., 1950 - Sobre algunas fenomenos de sedimentacion fluvio-lacustre en las cavernas. *Speleon*, I, pp. 23-37.
- MOORE, G. W., 1956 - Aragonite speleothems as indicators of palaeotemperature. *Am. J. Sc.* CCLIV, pp. 746-53.
- PELTIER, L. G. 1950 - The geographical cycle in periglacial regions as it is related to climatoc geomorphology. *Ann. Ass. Am. Geog.*, XL, pp. 214-36.
- PENGELLY, W., 1864 - The introduction of cavern accumulations. *Trans. Devon. Assoc.* I, 3, pp. 31-41.
- POBEGUIN, T., 1957 - Reproduction experimentale de concrections de calcium. *Ann. de Spél.*, XII, pp. 5-12.
- POLLI, S., 1955 - Meteorologia ipogea nella Grotta Gigante, presso Trieste. *Comm. 1er Congrès Int. de Spél., Paris (1953)*, II, pp. 307-19.
- RUSSELL, E. J., and RUSSELL, E. E., 1950 - *Soil Conditions and Plant Growth*. London.
- SCHADLER, J., 1931 - Strukturboden (Steinnetze) im Eislug, Stodertal, Oberösterreich. *Verh. d. Geol. Bundesanstalt, Wien*, pp. 205-6.
- SCHMID, E., 1958 - Höhlenforschung und Sedimentanalyse. Ein Beitrage zur Datierung des Alpiner Palaolithikums. *Schriften des Instituts für Ur- und Frahgeschichte der Schweiz*, Bd., XIII.
- SMITH, C. W., 1958 - Calcareous flowstones and bodies with flowstone affinities on the north Cornish coast. *C. R. G. N/L*, 72-77, pp. 15-22.
- SOLLAS, W. J., 1913 - *Paviland Cave: an Aurignacian Station in Wales*. (Huxley Mem. Lecture). R.A.I., London.
- SUTCLIFFE, A. J., 1957 - *Cave Fauna and Cave Sediments*. Unpub. Thesis, Univ. London.
- SUTCLIFFE, A. J., 1960 - Joint Mitnor Cave, Buckfastleigh. *Trans-Torquay Nat. Hist. Soc.*, XIII, Pt., 1, pp. 3-28.
- SWEETING, M. M., 1958 - The Karstlands of Jamaica. *Geog. J.* CXXIV, pp. 184-99.
- TIDDEMAN, R. H., - 1875-8 Second -Fifth Reports of the Victoria Cave Exploration Committee. *Repts. Br. Adv. Sc. for 1875-8*.
- WARWICK, G. T., 1956 - Caves and Glaciation: 1. Central and southern Pennines and adjacent areas. *Trans. C.R.G.* IV, 2, pp. 125-60.
- WARWICK, G. T., 1958 - The characteristics and development of limestone regions in the British Isles with special reference to England and vales. *Actes du II^{me} Int. Cong. de Spél. (Bari)*; I pp. 79-105.
- WAWICK, G. T., 1959 - Vermiculatons in Poole's Cavern, Buxton. *C.R.G. N/L*. 79/80, pp.14-7.
- WRAY, J. L., and ZELLER, E. J., 1956 - Factors influencing precipitation of calcium carbonate. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.* XL, pp. 140-52.
- ZEUNER, F. E., 1945 - *The Pleistocene Period*. London.

Presidente LIÈGEOIS:

Nous remercions M. Warwick, qui dans un magistral exposé nous a fait penser à beaucoup de choses, beaucoup de choses qui certainement vont amener une discussion qui ne sera pas brève. Si j'ai parlé d'un magistral exposé, et tout à l'heure si j'ai dit que la Conférence du Prof. Warwick était certainement attendue par vous depuis plusieurs jours, c'est tout simplement parce qu'il a envisagé l'aspect ultime des questions sous l'angle des climats que j'ai toujours estimé une chose très importante. C'est ainsi que dans mon glossaire des sciences minérales, les termes étant placés dans l'ordre idéologique, je commençais par le climat, parce que je disais que c'était la chose qui était à la base de tout et qu'on l'oubliait trop souvent. Je remercie encore une fois M. l'orateur qui nous a mis sur la voie d'une discussion que j'espère courtoise, mais profitable à tous, et je demanderai à chacun d'entre vous qui désire prendre la parole, de lever le bras en disant son nom pour éviter toute discrimination entre les différents orateurs.

M. Corbel sera le premier à répondre; après, M. Tintant, M. Bögli, M. Mancini, M. De Lavour, M. Dubois, M. Siffre.

Nous allons donc passer la parole, s'il le veut bien, à M. Corbel, un spécialiste des questions climatiques.

CORBEL:

Parlons d'abord de la glace, du problème des glaciers. C'est celui où je suis en désaccord, non pas avec mon collègue Warwick, mais avec l'auteur norvégien qu'il cite, *Gunnar-Horn*. J'ai travaillé, durant des années sur le terrain de Laponie norvégienne et puis au Spitsberg où Gunnar-Horn avait bâti ses hypothèses; la conclusion à laquelle je suis arrivé c'est qu'il n'y a aucune preuve que des grottes soient fonctionnelles sous de grands glaciers. G. Horn avait deux arguments: le premier, la position des grottes. Il avait négligé le fait que sur une hauteur, un niveau imperméable local et temporaire peut se créer du fait du gel, du «permafrost». Les grottes peuvent se former au-dessus de la vallée, sans que cela soit une preuve que la vallée n'était pas creusée, à ce moment. L'autre argument, c'était le principal, était tiré du Spitsberg. G. Horn pensait que, comme dans les Alpes Germaniques, la température des glaces était voisine de 0° et donc que l'eau pouvait circuler sous le glacier. Mais cette température de 0° est un cas spécial à la zone basse des glaciers alpins. On considère en glaciologie que, en gros, la température de la glace est égale à la température moyenne annuelle de la surface. Dans les zones basses des glaciers alpins il est normal de rencontrer de la glace à 0°. Au Spitsberg, on a mesuré très exactement maintenant, la température de la glace; elle est de -17°C. Dans ces conditions il ne peut y avoir de cours d'eau profond. Dans l'exemple cité par G. Horn, la région de Hornsund (Sud-Spitsberg), j'ai trouvé effectivement un mince filet d'eau sub-superficiel, mais il coulait vers le glacier et non du glacier vers le calcaire. Dans tout l'Arctique il n'y a pas de circulation profonde dans les calcaires, de karst typique sous les glaciers. Après 10 ans d'étude de glaciers, on ne connaît qu'un seul cas au monde, bien loin de l'Arctique, dans les Alpes. Sous la langue d'un glacier alpin, celui de l'Etendard (Oisan), il y a un cours d'eau souterrain dans les calcaires qui, à proximité du front, franchit en réseau karstique calcaire une vingtaine de mètres sous le glacier.

C'est l'unique exemple. A côté de cela nous avons des milliers et des milliers de km² de glacier reposant sur des calcaires où jamais aucun sondage n'a montré l'existence de grottes actives.

Les puits de mines creusés au Spitsberg nous ont fait traverser la zone de sol gelé dans une zone calcaire et nous ont montré l'existence de grottes remplies de glace.

L'autre point porte sur les différents effets du gel. Nous avons faite de multiples expériences et confronté les résultats avec les effets naturels. Comme d'autres auteurs (Tricart) nous avons abouti à la distinction entre deux types de gel: le gel de type

« sibérien », avec de grands froids et peu d'alternance gel-dégel, le gel « islandais » avec des froids modérés et un grand nombre d'alternances gel-dégel. Cela donne deux matériaux différents. Le gel « sibérien » fend profondément la roche et donne de gros éléments. C'est ce que je connais au centre du Canada Arctique ou de l'Alaska, c'est ce que les Russes ont décrit dans leurs régions à froids de -50°C . Au contraire le gel « islandais » donne des éléments beaucoup plus fins et surtout une grande quantité de limon. Cette différence de types de gel, entraîne évidemment une différence de remplissages de grottes selon les zones climatiques à froid « continental » ou « océanique ».

La connaissance de la vitesse absolue du creusement des grottes est indispensable pour savoir si elles ont pu se faire durant l'étroite période du post-glaciaire dans des conditions particulièrement favorables. Il y a une méthode que d'autres ont utilisée bien avant moi, — elle a plus d'un siècle maintenant —; elle consiste à mesurer les débits des cours d'eau d'une part; d'autre part, la quantité moyenne de calcaire dissout et puis à faire une opération pour trouver le nombre de mètres cubes enlevés par an et par kilomètre carré. On remarque, en faisant ces études, la très grande importance de la hauteur d'eau écoulée, et donc de l'évaporation. Si l'on a un litre d'eau, et qu'il contient cent milligrammes par litre, ce litre contient toujours cent milligrammes s'il n'y a pas d'évaporation. Si l'on est dans une zone où la moitié de l'eau s'évapore, à ce moment-là, notre demi-litre d'eau restant contient toujours cent milligrammes; mais ramenée au litre la teneur est de 200 milligrammes par litre. D'il reste le dixième seulement d'eau, j'ai à ce moment-là 1000 milligrammes par litre. Dans les zones chaudes, l'évaporation est très forte; elle théoriquement au Sahara peut dépasser quatre mètres d'eau par an, et dans les régions équatoriales brumeuses, elle atteint encore 1,50 m. Dans ces régions chaudes, surtout les régions chaudes et sèches, les teneurs en calcaire sont plus hautes relativement que dans les régions sans évaporation, mais le produit global:

$$\text{teneur } X \text{ hauteur d'eau écoulée}$$

montre que c'est dans les régions froides très humides que l'on trouve les valeurs les plus élevées de dissolution du calcaire.

En admettant une densité moyenne de 2,5 pour les calcaires, voici la formule donnant directement la valeur de la dissolution en $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$:

$$\frac{4 \cdot E \cdot T}{100}$$

E: hauteur d'eau écoulée en dm.

T: teneur en calcaire en mg/l (ou p. p. m.).

Dans les régions très humides, où la hauteur d'eau écoulée est de 8 m, la teneur moyenne de 100 milligrammes-litre, on arrive à 320 m^3 par an et par kilomètre carré. C'est un chiffre absolument énorme qui justifie la formation de grottes en un temps très court. Dans les régions montagneuses moyennes, où la hauteur d'eau écoulée est de l'ordre de 1 m (je pense à notre Jura par exemple), la teneur moyenne 150 milligrammes par litre, on arrive à $60 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$. Dans les régions tropicales (type par exemple Mexique du Sud), où les hauteurs d'eau écoulées sont de l'ordre de 20 cm parce qu'il y a 1,50 mètre évaporé où la teneur moyenne est de 200 milligrammes par litre, on arrive seulement à $8 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$. Ceci vaut pour la vitesse absolue. Mais les Karsts chauds ont eu une plus longue histoire que les karsts froids. Ces derniers ont été paralysés par les glaciers ou le permafrost. Ils sont essentiellement post-glaciaires. Les karsts de régions chaudes peuvent dater du Crétacé sans discontinuité. Ils ont le temps pour eux. La grande vitesse de dissolution des climats froids et humides explique la formation de grandes grottes et l'absence de concrétions dans les régions froides très humides où

l'enfoncement n'est pas limité par le permafrost continu. Dans les régions de température très voisine de 0° le permafrost est très discontinu. C'est la zone de développement rapide (si les précipitations le permettent) de très grandes grottes.

Voici maintenant quelques photos de grottes sous divers types de climat depuis la région du Pôle Nord jusqu'aux Tropiques.

Les photos font ressortir l'importance de l'érosion des calcaires en régions froides et humides. Cette érosion rapide est due à la combinaison du gel, de la faiblesse de l'évaporation (en climat froid la quantité d'eau écoulée est presque égale à la quantité tombée), du fort pouvoir dissolvant des eaux très froides, surtout des eaux sous-nivales. D'autres photos montrent la lenteur du développement des karsts tropicaux (grande évaporation, faible hauteur d'eau écoulée, eaux peu agressives) et l'importance des concrétions dans les grottes chaudes.

Nous avons donné dans notre ouvrage sur « Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe » un grand nombre de valeurs de l'érosion des calcaires sous divers climats. Ajoutons les résultats de quelques recherches récentes (1959-60). L'érosion est donnée en $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$, $1000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ équivalent à l'ablation uniforme d'une couche de calcaire de 1 mm d'épaisseur par an.

En *Laponie Humide*, à *Misvaer* (Nord-Svartisen), la hauteur d'eau écoulée est de 2 mètres, l'érosion de $280 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ dont 88 % en profondeur, formation de grottes très rapide.

En *Alaska Intérieur*, *Haute-Tanana*; climat continental froid et assez sec (précipitations 450mm, hauteur d'eau écoulée: 400mm), l'érosion est de $40 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$, dont 10 % en profondeur (le gel du sol (permafrost) entrave l'infiltration dans une partie du bassin).

Au *Spitsberg Septentrional*, *Kongsfjord*: climat très froid, sec (écoulement: 300mm), la dissolution enlève $16 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$, dont 1 % en profondeur. Partout règne ici le permafrost.

Sud-Floride, chaud assez humide (précipitations: 1260mm, écoulement: 175mm), dissolution: $5 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$.

Presidente LIÈGEOIS:

Je remercie M. Corbel, qui nous a comme toujours intéressé; il est l'homme des longs voyages, j'espère que la projection de ses diapositives vous aura permis de vous faire une idée de ce que sont les karst dans les autres continents. Une chose m'a étonné dans ce qu'il a dit, c'est que le calcaire reste en relief et que le granit se décompose parce que les régions sont sèches. Il y a quelque chose qui contredit tout à fait ce que j'ai constaté en Amérique du Sud, en Colombie et au Venezuela. Si nous avons temps, j'en dirais quelques mots tout à l'heure si vous me le permettez, après la longue liste, mais je crois que nous n'en aurons pas le temps. M. Tintant avait demandé la parole, je la lui cède très volontiers.

M. TINTANT:

A la suite du brillant exposé du Prof. Warwick, et après les compléments apportés par M. Corbel, je désire signaler très brièvement quelques faits qui confirment l'influence considérable du climat sur la formation et le remplissage des cavités karstiques.

En Bourgogne, région où seront pris mes exemples, il existe deux types de karst nettement différenciés, formés à des époques et sous des climats très différents.

Le premier type correspond à des cavités assez profondes, présentant un développement considérable pour le région, de l'ordre du kilomètre et parfois plus. Ce réseau est tout-à-fait indépendant de la morphologie actuelle qui le recoupe fréquemment. Il est en outre fossilisé par les argiles du Pliocène qui recouvre en certains points sur

une épaisseur pouvant atteindre jusqu'à 10 m sa partie supérieure plus ou moins tronquée par l'érosion antépliocène.

Ce Karst est donc très ancien, certainement antérieur au Pliocène. Diverses raisons morphologiques et sédimentologiques nous conduisent à penser qu'il doit dater de la fin de l'Oligocène ou du début du Miocène. Il semble en tout cas certain que ce karst s'est formé sous un climat chaud et sans doute humide.

A ce réseau ancien s'oppose un réseau de type tout différent, décrit récemment par le Prof. Ciry sous le nom de « réseau cutané ». Il s'agit ici de cavités beaucoup plus réduites, ne dépassant que rarement 50 m de longueur, et en rapport très étroit avec la morphologie des vallées actuelles. Ce réseau est d'origine périglaciaire et date des dernières glaciations quaternaires.

A côté des différences morphologiques très nettes qui distinguent ces deux types de réseau, on constate des différences non moins nettes dans leur remplissage.

Dans le karst ancien, ce dernier est d'un type essentiellement fluvial. Il est constitué de sables plus ou moins fins, de limons fréquemment varvés. On n'y observe jamais d'éléments détritiques grossiers, en dehors de quelques blocs éboulés des plafonds. Le quartz est abondant dans ces sables, le calcaire par contre très rare. En un mot, il s'agit de sédiments très évolués déposés par des cours d'eau assez réguliers et assez lents, qui ont permis un tri très poussé des matériaux.

Dans le réseau cutané, par contre, le matériel de remplissage est très grossier et ne montre plus aucune trace de tri. On y trouve essentiellement des galets éclatés par le gel, des fragments anguleux de roches calcaires emballés dans des sables souvent calcaires, des limons jaunes ou des argiles résiduelles de couleur rouge brique.

Ce remplissage ne montre généralement aucune stratification régulière, mais par contre des signes de cryoturbation extrêmement nets. Il s'infiltré dans les fissures, les colmatant parfois totalement, soit par glissement à partir de l'orifice, soit par infiltration à partir de la surface des plateaux situés au dessus des cavités, à travers des fissures de taille très variable. Ce remplissage renferme enfin fréquemment des restes brisés et éclatés par le gel d'ossements de mammifères quaternaires. Il constitue localement de véritables brèches osseuses.

Dans ce réseau cutané, nous sommes donc en présence d'un remplissage caractéristique d'un climat très froid. La circulation fluviale n'y joue plus aucun rôle, l'accumulation des sédiments paraît essentiellement due à des actions périglaciaires que l'on peut dater de la glaciation de Würm: éclatement cryo-clastique des roches et mise en place des matériaux dans les grottes par solifluction.

Entre ces deux types si différents de remplissage, il n'existe généralement aucune transition. Le karst ancien a dû se trouver protégé des actions périglaciaires par sa profondeur relativement grande et par son épaisse couverture de sédiments pliocènes. Ce n'est que rarement et tout-à-fait accidentellement que des décapages locaux ont amené ce karst à proximité de la surface et qu'alors des infiltrations ont amené, dans les chemins des grottes, des remplissages identiques à ceux du réseau cutané.

A propos du remplissage du karst ancien, j'ai signalé tout-à-l'heure la présence dans les cavités de ce type de sédiments varvés.

J'ai décrit ces varves à la grotte de Bèze (Côte d'Or) lors du Ier Congrès international de Spéléologie de Paris, et depuis j'ai retrouvé des varves analogues dans la plupart des cavités de Côte d'Or appartenant au réseau ancien. Quelles sont les conditions climatiques qui ont commandé la formation de ces sédiments rythmiques? Il était classique autrefois de considérer les varves comme des phénomènes périglaciaires. Mais si cela est indiscutable pour les varves du nord de l'Europe, tel ne paraît pas être le cas pour nos varves de grottes. En effet nous ne trouvons jamais de remplissage de ce type dans le réseau cutané, mais uniquement dans le réseau ancien, mélangé à des sédiments ne présentant aucune trace d'action périglaciaire. D'autre part, on peut observer fréquemment, sous le climat actuel, la formation de sédiments varvés. A. Journaux

en a décrit récemment de fort jolis dans les barrages de la Sélune (Normandie) où l'épaisseur de chaque varve était proportionnelle à l'abondance des précipitations de l'année ou elle s'était formée.

Il est vraisemblable que les varves des grottes, comme celles des barrages, traduisent simplement la rythmicité de l'apport suivant les saisons: pendant la saison humide, la sédimentation est active et entraîne la formation de dépôts relèvement grossiers; durant les périodes de basses-eaux au contraire, la compétence du courant est plus réduite et les sédiments déposés sont plus fins.

Il ne semble pas, cependant, que ces dépôts varvés se forment encore actuellement dans nos grottes de Bourgogne. Ils se trouvent en général dans des galeries à remplissage ancien, et souvent érodés par la circulation actuelle. On serait donc en présence de sédiments non pas actuels, mais fossiles, dont l'âge ne peut encore être fixé de façon précise.

Presidente LIÈGEAIS:

Je remercie M. Tintant, porte-parole du Centre Français de Dijon je crois, et qui nous a révélé des cas particuliers de cette région. Je demande à M. Bögli de bien vouloir prendre la parole.

BÖGLI:

La question des rapports entre le climat et la couleur des concrétions et sédiments n'a pas été abordée par M. Warwick. Entre les deux il y a des liens assez étroites. Dans les climats chauds, arides ou semi-arides, les sols montrent des couleurs plus ou moins rouges. Par conséquent j'avais l'intention de ramener les concrétions rouges à un climat tropical ou subtropical, les autres couleurs à un climat tempéré ou froid.

Cette question est excessivement importante pour la paléoclimatologie des cavernes et n'a pas encore été étudiée à fond. J'ai poursuivi ce problème d'abord dans le Hoeloch. Les concrétions d'un rouge brunâtre m'avaient fait penser à des formes fossiles d'un climat assez chaud, du moins subtropical, d'autant plus que je ne les avais trouvés la première fois que dans le système du Himmelsgang, qui descend du temps préglaciaire. Mais en étudiant ces problèmes, je tombais sur quelque cas où les concrétions rouges se forment encore aujourd'hui et non loin de blanches, qui sont d'ailleurs plus fréquents.

Pour mieux comprendre ce fait, il est nécessaire d'étudier la surface 400 m au-dessus de la caverne. Sous le calcaire urgonien très pur, nommé Schrattealkalk, les concrétions récentes sont des fois d'une blancheur immaculée, mais jamais rouge ou brun. Là où les marnes valanginiennes provoquent des sols acides, l'eau lessive le fer et l'emporte dans les cavernes, donnant lieu à des concrétions d'un rouge brunâtre très vif. Les lames de concrétions translucides et l'éclat nous montrent au premier coup d'oeil, que la coloration n'est pas due à des argiles colorées. Le pigment est un hydrate de fer pur. Le fer est transporté sous forme d'hydrocarbonate dissous, qui, au contact de l'oxygène de l'air se transforme aussitôt en hydrate de fer insoluble, provoquant cette coloration intense. Suivant la grandeur des particules et l'état de déshydratation la couleur est d'un rouge jaunâtre, d'un rouge ou d'un brun rougâtre. Elle n'est pas identique avec la couleur de tuile, qui est assez fréquent au Hoeloch et qui est provoquée par des argiles ferrugineuses.

Cette coloration nous montre une fois de plus que l'eau traverse des fissures sur une longueur de milliers de mètres en conduite forcée, traversant en cette occasion des couches qui sont trouées de cavernes (voir aussi Bögli: Entstehungsbedingungen von Kalkausscheidungen in Höhlen).

A la surface, l'eau en teneur d'acides humiques est capable de dissoudre le fer et de le transporter en forme d'hydrocarbonate dans la caverne, ce qui demande un climat humide et froid. L'eau saturée de carbonate de chaux est plutôt alcaline et ne peut plus

dissoudre de fer, ainsi que celle, qui sort des sols dépourvu d'acides humiques. Cela est le cas dans des climats plus ou moins chauds et secs.

Pour les concrétions de grande pureté des cavernes profondes la couleur blanche nous montre l'absence des acides humiques à la surface — en somme un argument pour un climat chaud et sec, tandis que leur couleur rouge est un indice pour un climat froid et humide.

Mais ce n'est qu'un côté de la question. Dans beaucoup de grottes alpines, surtout en Autriche, nous trouvons très souvent des concrétions d'un rouge intense et opaque. Le pigment est une argile rouge du type terra rossa. Cette terre a été transportée à travers les fissures, qui assez souvent, sont comblées de cette argile encore aujourd'hui. C'est évident qu'elle provient d'un climat chaud. Ces grottes descendent de l'époque tertiaire et leur premières phases se sont déroulées déjà dans le miocène. J'ai observé qu'il existe dans les fissures de beaucoup de grottes autrichiennes de grands dépôts de terre rouge, qui sont actuellement une source de coloration des concrétions, notamment dans la Tantalhoehle, Eisriesenwelt, Dachteinhoehle etc. Mais là, où la terra rossa n'atteint pas la caverne, quoi qu'on la trouve à la surface, les concrétions sont souvent blanches ou jaunâtre, comme par exemple dans la merveilleuse grotte de Castellane dans les Muges.

Dans le Hoeloch nous avons aussi des concrétions couleur de tuile, dont j'ai parlé à la réponse à M. Gèze. Là, nous trouvons un pigment plus ou moins argileux qui produit cette couleur. C'est un indice pour une période tempérée, alors pas chaude, probablement le dernier interglaciaire.

Le problème des rapports entre la couleur des concrétions et le climat est important et il est à souhaiter, qu'il soit étudié surtout en Italie et dans le midi de la France, où les conditions sont plus favorables que dans les Alpes.

Presidente LIÈGEOIS:

Je tiens à remercier M. Bögli qui nous a rendu perplexes à un problème, et je dois ajouter, pour apporter de l'eau à son moulin, que le Prof. Anelli de Castellana, m'a envoyé le mois dernier quelque chose encore beaucoup plus sujet à discussion, ce sont des stalactites composites, calcite et limonite; changement de climat sur quelques années ou peut-être sur quelques mois. Je passe la parole à M. Mancini, mais avant que M. Mancini ne parle, je voudrais dire un mot: on me signale que la séance aujourd'hui doit se terminer exactement à midi, ponctuellement. Nous n'avons plus qu'une demi-heure de temps libre et notre Président général nous dira quelques mots sur l'occupation du temps et le programme de tout à l'heure. Alors je demande aux orateurs encore inscrits, de limiter leur temps de parole à 10 minutes, ou bien s'ils ne peuvent pas se limiter à 10 minutes, je leur donnerai l'occasion à 4 h. 1/2 cet après-midi de continuer la discussion avant d'aborder une autre partie du programme. D'accord? Vous parlez 10 minutes ou bien vous parlez tout à l'heure. Merci.

MANCINI:

Il mio intervento ha lo scopo di sottolineare due fra i numerosi consigli che il Prof. Warwick ci ha dato nella sua interessantissima relazione. Il primo illustrava la necessità di una stretta cooperazione tra specialisti dei più diversi campi e su questo credo che non ci sia bisogno di aggiungere molto. Senza una siffatta collaborazione, continua e sempre più completa, non vi sarà, tra pochi anni, più alcun progresso scientifico.

Il secondo consiglio, anche estremamente interessante, è quello di interpretare queste serie di sedimenti alloctoni e autoctoni con una grande prudenza. Bisogna, a mio avviso, prima di tutto, conoscere in dettaglio il o i tipi di calcare esistenti in una certa regione. Il problema del colore dei sedimenti è assai importante, ma ricordiamoci che

questo colore può essere fortemente influenzato dal colore del residuo insolubile presente nel calcare.

Vorrei poi dare due esempi concreti di quelli che possono essere gli errori in cui si cade se non si seguono criteri di estrema prudenza come consigliato dal Prof. Warwick. Molte delle forme carsiche superficiali che noi oggi vediamo sono dovute a climi antecedenti con coperture vegetali e suoli sostanzialmente diversi da quelli odierni. Per noi è difficile immaginare il nostro Appennino calcareo (Marche, Abruzzi) coperto interamente da foreste di pini o di abeti e faggi. Ma questo avveniva solo poche migliaia di anni fa come ha di recente dimostrato il Marchesoni per la catena dei Sibillini. Allora se noi abbiamo entro una di queste doline un suolo fossile al di sopra dell'imbasamento roccioso e sopra a questo terreno un altro suolo, prodotto dell'azione climatica attuale, può avvenire che per fatti erosivi, d'origine antropica o no, vengano asportati prima l'uno e poi l'altro di questi suoli. In una grotta vicina, ma posta più in basso, si potranno allora depositare materiali appartenenti prima al suolo attuale e al di sopra derivanti dal suolo fossile. Una interpretazione affrettata potrebbe segnalare una variazione climatica con mutamenti nella natura dei sedimenti. Non è avvenuto invece altro che un normale fatto erosivo a carico di due suoli, questi si originatisi sotto climi e coperture vegetali diverse.

Un'altra possibilità d'errore nelle regioni carsiche è dovuta alla differenza esistente tra i suoli dove si hanno affioramenti rocciosi e quelli dei fondi delle doline e delle uvala. In questo secondo caso i terreni possono mostrare inconfondibili segni di una marcata idromorfia che mancheranno sempre nei suoli sui dossi e le pendici rocciose. Alternanze di sedimentazione in grotta di materiali provenienti dal fondo delle doline o invece da pendii sensibilmente acclivi potrebbero allora essere interpretate come dovute a variazioni climatiche mentre sono causate dallo stesso fenomeno di erosione.

Nell'Italia meridionale si hanno poi molto di frequente depositi di ceneri, minuti lapilli ed altri materiali piroclastici provenienti dall'attività dei vari vulcani. Sono perfino qua e là riconoscibili i depositi dovuti all'eruzione vesuviana del 1944. Tali prodotti, a granulometria spesso assai sottile, possono mutare la penetrabilità dei calcari per un certo lasso di tempo e addirittura intasare certi condotti. Verranno perciò a mutare anche i depositi in grotta senza che però si via stata alcuna variazione climatica.

Perciò la raccomandazione del Prof. Warwick, di procedere sempre con la massima cautela e di cercare sempre il confronto delle riprove fornite dagli specialisti in altri campi è quanto mai lodevole.

Presidente LIÈGEOIS:

Je remercie M. Mancini qui n'a dépassé que d'une demi-minute le temps qui lui était accordé, et je demande à M. De Lavour s'il veut parler maintenant.

DE LAVOUR:

J'ai quelques scrupules à prendre la parole après des orateurs aussi autorisés; je voudrais simplement signaler quelques observations qui ont été faites dans la rivière de Padirac et qui, je pense, pourraient peut-être intéresser les spécialistes.

La rivière Padirac vous la connaissez tous; elle se trouve située dans les causses jurassiques du Sud-Ouest du Massif Central; c'est une rivière souterraine qui est constituée par une série de biefs plus ou moins grands; ces biefs étant formés soit par des gours, soit par des barrières assez élevées quelquesfois hautes de 20 ou 25 m qui sont soit des restes de parois en place, soit des blocs éboulés recouverte ou non de concrétionnements. Il y a ceci de curieux, c'est qu'il y a des biefs très remplis de matériaux argileux — c'est intentionnellement que je ne dis pas d'argile — d'autres biefs qui en sont totalement dépourvus et entre les matériaux des biefs contenant des dépôts, il y a certainement des différences importantes. Il y a en particulier en amont de toutes les barrières où se forment des ennoyages prolongés et où ne se trouvent pas des arrivées

d'eau à la voûte — ces deux conditions sont nécessaires — il y a un phénomène très curieux, c'est que les concrétions qui pendent de la voûte, je parle de très grosses concrétions, de très grosses stalactites qui descendent sur plusieurs mètres de hauteur, en bien lorsque vous arrivez devant une de ces concrétions dans la zone « amont », vers le bas, quand vous touchez cette concrétion, vous avez l'impression que c'est de l'argile, et cette impression vous la sentez sur une certaine hauteur et plus vous remontez, plus vous commencez à sentir des grains durs dans cette argile. Et puis plus haut vous avez une concrétion corrodée de couleur grisâtre, et puis en haut vous avez la concrétion saine. Sur les parois concrétionnées le phénomène est le même. Je me suis amusé à prélever des échantillons de ces concrétions et des échantillons de l'argile qui se trouve dans le bief au dessus duquel se trouvent ces concrétions. Je les ai analysées par un moyen très grossier, le seul que j'avais à ma disposition, j'ai essayé de dissoudre certaines quantités d'argile, celle de ces matériaux, dans l'acide chlorhydrique étendu. J'ai trouvé — je n'ai plus le chiffre exactement en tête, mais c'est 32 ou 33 % de matières solubles dans l'acide chlorhydrique étendu. Je signale qu'en amont de ces barrières, les quantités d'argile qui sont déposées sont considérables. En particulier je pense à un bief qui a près de 400 m de long, où il y a des bosses d'argile qui ont de 5 à 6 m de hauteur, et comme je sais d'autre part les travaux qui ont été faits par la Société de Padirac en certains endroits, de la « Rivière Plane » qu'on arrive facilement à 4 ou 5 m d'épaisseur d'argile, cela représente donc des masses considérables. Ainsi donc, vous avez là une argile qui n'est pas à proprement parler une argile, puisqu'il y a 32 % de matières solubles dans l'acide chlorhydrique étendu. Or, il se trouve qu'au-dessus de ce bief le hasard a voulu que, à la voûte, il y a un tronçon de la conduite forcée initiale, qu'on voit très inscrite dans la voûte, on peut d'ailleurs y monter — ce n'est pas très facile, mais enfin on peut y aller — et le tronçon inférieur de cette conduite forcée s'est trouvé par la suite d'un effondrement descendu d'environ 2 m en conservant sa forme complète, avec simplement ceci; c'est qu'il y a eu une cassure qui a écarté un petit peu deux parties, ce qui permet de circuler entre les deux morceaux de la roche initialement en place, et cela permet notamment, ce qui est très intéressant, de voir la stratigraphie des dépôts qui se trouvent dans cette conduite forcée originale. Or ces dépôts sont constitués pour 90 ou 95 % de leur épaisseur, par une stratification entrecroisée de tout petits galets de quartz et de limonite. Il y a peut-être autre chose; vous savez, au cours d'une grande exploration à 4 ou 5 jours de l'entrée, on n'a pas beaucoup de temps pour faire des échantillonnages. Et alors, au dessus il y a une couche d'argile. J'ai prélevé de cette argile, qui se trouve juste au dessus de l'endroit où j'ai relevé ce matériau partiellement soluble dans l'acide chlorhydrique, et bien, cette argile là qui correspond à des dépôts tous à fait de l'origine du creusement de la galerie, il n'y a pratiquement rien de soluble dans l'acide chlorhydrique. Voilà simplement le phénomène que je voulais vous signaler et que je dois compléter cependant par une autre observation. En aval de certaines de ces barrières, il existe des galets calcaires, et ces galets calcaires, quand on les prend, il y en a une grande partie qui se coupe au couteau, le centre seulement restant dur, le reste étant transformé comme les stalactites dont je vous parlais tout à l'heure.

Presidente LIÈGEOIS :

Je remercie M. De Lavar de nous avoir cité un cas particulier qui se présente dans des circonstances exceptionnelles, mais que l'on peut retrouver en de nombreux endroits. C'est d'ailleurs le fait que généralement les grandes lois se déduisent de choses un peu petites, et les objections sont d'ailleurs des questions de détail. Je passe la parole à M. Dubois, si M. Dubois peut également, comme M. De Lavar, respecter son temps de parole.

DUBOIS :

Je veux simplement présenter quelques observations concernant le massif du Marboré pres de Gavarnie, dont M. le Prof. Warwick nous a montré tout à l'heure de très belles vues.

Il semble qu'il convient d'être très prudent pour l'interprétation morphologique de cette région. J'y ai séjourné pendant plusieurs étés consécutifs, réalisant avec mes camarades de nombreuses explorations. Le karst de ce massif a connu, au moins, deux stades évolutifs très différents, ayant chacun conditionné un type morphologique: un stade récent, périglaciaire et un stade ancien moins connu. Le stade périglaciaire présente deux étapes nettes dans son évolution. Au moment où le massif a commencé à se dégager de la gangue de glace, qui l'envolopait durant les glaciations quaternaires, il s'est produit une importante évolution périglaciaire localisée aux zones superficielles. On lui doit les très grands lapiaz, les éboulis de gélivation que vous avez vus tout à l'heure en photo, et les nombreux petits réseaux souterrains cutanés dans le sens défini par M. le Prof. Ciry. Tous ces phénomènes sont extrêmement développés dans le massif. A une période plus récente le perma-frost ayant complètement disparu, se sont creusés, d'une manière très rapide, des réseaux profonds, très étroits et actuellement en pleine évolution, caractérisés par la rareté ou l'absence de dépôts internes (glace, éboulis, argile, concrétions). Dans tous ces réseaux le sédiment glaciaire n'a joué aucun rôle.

Au stade évolutif ancien de ce karst on doit une série de grandes cavités qui sont les célèbres grottes glacées, à savoir: la grotte glacée Casteret, la grotte Devaux et les nombreuses grottes des parois du Casque et de la Tour du Marboré. Toutes ces grottes sont anciennes et antérieures à la glaciation. On y trouve des concrétions de calcite qui ne peuvent plus se former dans les conditions actuelles de température. De plus ces grottes sont pour la plupart fossiles et parfois en position aberrante par rapport à la topographie actuelle. La glace et les phénomènes périglaciaires n'ont joué aucun rôle dans leur creusement. Les dépôts qu'elles renferment sont de deux types: dépôts anciens (concrétions de calcite et éboulis consolidés), dépôts récents (glace, moraines souterraines et éboulis de gélivation). Les dépôts récents, dus au périglaciaire sont les plus importants, ce qui a conduit de nombreux auteurs à supposer un creusement de type périglaciaire pour ces cavités. Il est donc nécessaire pour cette région de toujours considérer les deux stades évolutifs du karst, le récent périglaciaire et l'ancien tout à fait différent. C'est tout ce que je voulais préciser ici.

Presidente LIÈGEOIS :

Je remercie M. Dubois et je passe la parole à M. Siffre puisque nous avons encore cinq minutes disponibles.

SIFFRE :

Je serai très bref en raison de l'heure tardive, mais je veux faire quelques remarques sur la séance de ce matin. Décidément, la première question qui se pose est la suivante: les sédiments souterrains reflètent-ils ou non les variations climatiques externes? Si l'on répond affirmativement, doit-on seulement étudier les dépôts situés près de l'entrée ou doit-on aussi considérer les dépôts profonds? Je pourrais faire remarquer d'abord ceci: il existe de nombreux sondages près des entrées de Grotte qui ont été fait par les préhistoriens, mais j'aimerais savoir combien de fouilles systématiques ont été effectuées dans l'intérieur des réseaux karstiques! En effet le nombre des sondages profonds dans les cavités souterraines est pratiquement nul et il n'existe à ma connaissance qu'un nombre infiniment petit d'études complètes de sédimentologie karstique. Or, le thème de ce Symposium est justement de découvrir les rapports entre la sédimentologie karstique et les variations climatiques. Comme pratiquement aucune étude

n'a été effectué dans ce domaine, il me semble que le sujet traité limite trop le thème envisagé: remplissage naturel des grottes, notamment les remplissages profonds. Ceci est paradoxal, car à ce Congrès, on n'a présenté aucune coupe de terrain à l'intérieur de massifs calcaires, et c'est quand même extraordinaire.

On ne saurait donc à priori éliminer les études de sédiments des réseaux karstiques, de sédiments profonds des cavités.

Quand vous trouvez un massif calcaire traversé par une vallée, vous observez souvent plusieurs étages de cavités, jusqu'au réseau actuel. Dans ces cavités, vous pouvez trouver des sédiments souterrains à des profondeurs considérables. J'ai fait des sondages dans des cavernes à environ 2 Km. de l'entrée et j'ai observé des remplissages sur plusieurs mètres: des varves, des sables fluviaux, des galets, tout ça indique quelque chose; ce sont des sédiments, qu'il faut interpréter. Evidemment jusqu'à présent, les spéléologues ont pénétré sous terre, mais ils n'ont pas fait des travaux de ce genre. D'autre part, les géographes et les géologues, eux, font surtout des travaux à faible profondeur, mais n'ont guère étudié les sédiments souterrains. Or il me semble que si l'on recherchait dans ce domaine profond, des sédiments, on pourrait effectuer des études très profitables.

Je vais vous donner un exemple typique:

J'ai montré dans une publication anticipée de ce Symposium un exemple de sondage, dans les grottes. J'ai effectué deux sondages de 50 cm. seulement dans une grotte de 500 m de longueur. La stratigraphie: Je ne vous répète pas, à la base vous avez des sables fluviaux intercalés avec des planchers stalagmitiques. Cette répétition de planchers stalagmitiques, en de sédiments fluvio-endogène on l'a beaucoup traitée hier et aujourd'hui, mais on a rarement étudié les rapports entre les planchers stalagmitiques et les sédiments sous-jacents et subjacents.

Il me semble que cette étude est encore incomplète et que dans l'avenir on doit surtout étudier ce problème là.

Les sédiments souterrains profonds doivent faire l'objet de travaux scientifiques et ne plus être négligés au profit des dépôts situés à l'entrée des grottes.

Ce sont les seules remarques que je voulais faire à ce sujet.

Presidente LIÈGEOIS:

Monsieur le Président, Mesdames, Messieurs, je tiens tout d'abord à remercier M le Président général, le Prof. Nangeroni qui m'a permis d'avoir l'honneur de présider aujourd'hui cette séance. Qu'il en soit remercié particulièrement.

Je tiens à remercier également mes deux assesseurs, M. Morandini et M. Inson, qui ont bien voulu m'aider dans cette tâche. Je voulais dire quelque chose; j'abandonne mon temps de parole et si vous le permettez, à 4 h. 1/2, je me permettrai de vous faire une petite Conférence où je pense vous vous amuseriez bien, parce que les histoires que j'ai à vous raconter, elles sont spéléo-humoristiques. Je donne la parole à M. le Prof. Nangeroni.

NANGERONI:

Sono io veramente che devo ringraziare il Prof. Liègeois di avere diretto meravigliosamente questa seduta e ringraziarlo per la « storia » che ci potrà narrare alle 4 e 1/2, storia che si preannuncia « bien amusante ». Mi dispiace dover dire che nonostante l'apparente sole, non è possibile andare a fare colazione all'Isola Comacina (o come diciamo noi in Lombardia, l'isola Comacina). E' quindi necessario fermarci qui per la colazione; d'altra parte, una piccola gita in motoscafo si potrà certamente compiere e avrà come meta l'alto lago, cioè la Penisola di Olgiasca. Pregherei perciò di trovarsi alle due e un quarto nel porticciolo sotto l'albergo. Scusate poi, se intervengo ancora per altre piccole cose: gli autori, sono pregati, nelle bozze di stampa di correggere atten-

tamente gli errori; i signori relatori ufficiali sono pregati di passare nella Segreteria per ritirare alcune pubblicazioni offerte dalla Rassegna e dalla Società Speleologica.

Altra notizia: domani non si parte, per fortuna, alle 7 e un quarto, ma un pò più tardi, cioè alle 8. Non solo, ma siccome dal nostro Albergo all'imbarcadere vi è un tragitto di 10 minuti, con tutti i pericoli che vi sono lungo quella strada così stretta, verremo trasportati in torpedone. Un'altra cosa: avevo detto ieri che vi è una riunione speleologica a Finale Marina, cioè verso San Remo lungo la riviera ligure. Ecco, il programma sarebbe questo: quelli che possono trovarsi al giorno 7 pomeriggio a Finale, potranno essere accompagnati per la visita dell'Arma della Pollera. Il giorno 8 vi sarà, tempo permettendo, una visita alle arene Candide e al giorno 9 alla grotta di Toirano. E mi permetto di aggiungere questo, l'Azienda di Soggiorno e la Società Speleologica italiana, pregano che l'affluenza sia numerosa.

Il soggiorno è gratuito per 20 partecipanti al Simposio, per i giorni 7, 8 e 9; gratuito nel senso più completo, salvo il viaggio evidentemente. Io pregherei quelli che desiderano venire, di alzare al momento la mano, onde meglio predisporre ogni cosa. Per favore, Dell'Oca, vuole prendere nota? Nove, esclusi quelli già invitati. L'invito è rivolto esclusivamente ai non italiani. Altra cosa. Loro sanno che al Congresso Internazionale di Geografia di Stoccolma, nella sessione « carsismo », il Prof. Lehmann ha presentato la proposta di un Atlante Internazionale di carsismo. Già ormai sono state pubblicate due carte con l'accompagnamento di testo esplicativo, di profili, di foto con opportune didascalie, ecc. Una riguarda le pòlje della Sierra de los Organos, e l'altra invece riguarda una pòlje che abbiamo nelle prealpi venete, vale a dire il: Bosco del Cansiglio. Ora molti di voi forse hanno già ricevuto copia di questo esemplare. Quelli che non l'avessero ricevuto, potrebbero chiederlo al Prof. Morandini, che è interessato direttamente in quanto la proposta è stata assunta ed è stata effettuata da parte dell'Istituto di Geografia di Padova, sia pure con la collaborazione anche di altri. Anzi credo che tu stesso, Morandini, potresti vedere di inviare la copia. E' un esempio, mi permetto di dire, ben fatto, anche dal punto di vista tipografico.

Vi ringrazio di avermi ascoltato.

S E S T A S E D U T A
Pomeriggio del 5 Ottobre 1960 in VARENNA

PRESIDENTE : Egon Pretner

**RELATORI UFFICIALI : Angelo Pasa
 Maria Vittoria Pasa**

Presidente **PRETNER.**

Nel ringraziare il prof. Nangeroni e l'amico Dell'Oca per avermi designato alla Presidenza di questa seduta, ed i colleghi prof. Carlo Capello e dr. Przemyslaw Burchard che mi onorano con la loro collaborazione alla Presidenza, dichiaro aperta la presente seduta di studio.

Il prof. Angelo Pasa presenterà la relazione svolta congiuntamente alla dottoressa Maria Vittoria Pasa sulle « Ricerche paleobotaniche e paleozoologiche applicate ai depositi di riempimento nelle grotte ».

ANGELO e MARIA VITTORIA PASA
 (Museo Civico di Storia Naturale di Verona)

**RICERCHE PALEOBOTANICHE E PALEOZOOLOGICHE APPLICATE AI
 DEPOSITI DI RIEMPIMENTO NELLE GROTTI. METODI E RISULTATI.**

Abbiamo cercato di sintetizzare in questi appunti i risultati delle ricerche condotte dal Museo Civico di Storia Naturale di Verona in stretta collaborazione con il Gruppo Grotte di Vicenza e di Trento, con l'Istituto di Paleontologia Umana di Ferrara, con l'Università di Padova, con i colleghi proff Battaglia, Cardini, Dalla Fior, Leonardi, Mancini, Marchesoni, Tongiorgi e altri molti.

Le nostre ricerche, impostate su basi naturalistiche, sembrano permettere alcune considerazioni e interpretazioni che, al di fuori di ogni teoria, presentano notevoli analogie con buona parte degli schemi teorici prospettati dalla vecchia letteratura classica, salvo alcuni limiti cronologici che risultano profondamente spostati da accordi recentemente raggiunti dagli studiosi sulla interpretazione dei limiti tra Pliocene e Quaternario.

Nelle nostre ricerche le indagini di natura paleofloristica e faunistica sono state condotte perlopiù indipendentemente l'una dall'altra e seguite da una accurata analisi dei sedimenti. Dei dati ottenuti alcuni risultavano concordanti e direttamente utilizzabili; altri, dove pollini, fauna e sedimentazione sembravano sfasati, è stato spesso possibile misurare l'intensità dei fenomeni di rimaneggiamento del deposito e, talvolta, ottenere precisi indici di sosta sedimentaria sulle superfici di grotta.

Una prima critica ai metodi tradizionali di confronto generalizzato tra serie cronologico-climatiche poste a notevole distanza viene sostenuta da varie parti in considerazione della differenziazione ecologica paleogeografica tuttora visibile in paesi come il nostro, mediterraneo a climi e struttura geografico-geologica estremamente frammentari.

Allo scopo di superare tale inconveniente abbiamo accentrato le nostre ricerche nella zona che circonda Verona, a cavallo tra le valli glaciali del Chiese-Garda-Adige e

Brenta. In una zona uniformemente calcarea, sudalpina, che si eleva a formare un piano che sale dalla pianura dai 30 metri ai 2300 sul livello del mare attuale.

Durante il Quaternario le zone elevate dei nostri monti sono state coperte da calotte glacio-nivali, i cui limiti altimetrici delle nevi perenni stanno precisandosi, nelle nostre attuali misurazioni, a m 1400 durante il Riss e a m 1500 almeno, durante il Wurm.

In queste condizioni ci è stato spesso possibile riscontrare corrispondenze strettissime tra i depositi cavernicoli e i sedimenti glaciali e interglaciali.

Sotto il punto di vista paleogeografico la posizione centrale dei Lessini, centro delle nostre osservazioni, rispetto ai limiti meridionali della calotta glaciale alpina si delinea come punto ideale, segnando essa l'estremo limite delle influenze « steppiche » orientali, balcaniche, che a stento hanno potuto attraversare il setaccio ecologico degli altipiani aridi del Carso dinarico.

Nella nostra zona è evidente inoltre il gioco ritmico di due grandi provincie climatiche opposte: la tirrenica, prevalentemente oceanica, di mare profondo, e l'adriatica, più continentale, di mare basso.

Nelle fasi di accumulo nivale delle glaciazioni il gioco eustatico sembra aver accentuata la differenziazione tra le due regioni: infatti l'abbassamento del livello marino nel Tirreno sembra aver avuto effetti poco marcati rispetto alla vasta exondazione dell'area adriatica; il ché venne ad estendere sulla pianura veneta e sulla prealpe quelle condizioni di continentalità di tipo balcanico che sembrano trovare il loro limite proprio nella nostra regione, mentre sembrano attenuarsi più ad occidente.

A comprova di ciò nelle fasi aride quaternarie, tra il Veronese e il Piemonte si estese un ampio ventaglio di formazioni dunari sospinte da indubbi effetti dei venti costanti diretti dall'aria più oceanica tirrenica verso la fronte pedemontana alpina di condensazione, baluardo estremo della più ampia continentalità centroeuropea e balcanica.

METODI

L'analisi pollinica si basa sul principio della resistenza della sporopollenina, la sostanza che forma il rivestimento del polline, ai trattamenti acidi, che possono ampiamente esser usati per la distruzione della parte minerale di un determinato deposito.

La quantità di polline raccolta in un sedimento è direttamente proporzionale alla densità della vegetazione, ma i pollini di ogni singola essenza sono tanto più sovrarappresentati quanto più polline è prodotto da ogni singola pianta. Agli effetti delle considerazioni paleoclimatiche e paleogeografiche le distorsioni dovute al metodo di ricerca sono relativamente di poca importanza e facilmente correggibili.

Più accentuate distorsioni si possono verificare per la mutevole natura dei sedimenti. L'optimum di conservazione è dato dai terreni acidi, argillosi, lacustri, torbosi di foresta, palustri, mentre i granuli sono scarsamente conservati nei terreni a tono basico e in quelli nei quali si sono avute azioni di passaggio di acque ricche di carbonati.

L'esame pollinico risulta relativamente facile nei depositi esposti ad ampio scambio di correnti aeree e, ancor più, nei paleosuoli. In questi la frequenza è in ragione diretta della lentezza di sedimentazione, nel senso che quanto più tempo impiega il suolo ad accrescersi, tanto più polline si raccoglie in esso.

Dal complesso di questi rapporti risulta evidente la possibilità di ricavare da un sufficiente numero di analisi non solo l'aspetto paleofloristico di una determinata stazione, ma anche tutto un complesso di altre considerazioni di carattere pedologico e paleoclimatico.

Nei depositi di grotta la ricerca pollinica si urta in notevoli difficoltà che appaiono legate sia all'isolamento microclimatico dell'ambiente cavernicolo, lontano dalle vie di trasporto aereo, sia alla difficile conservazione dei pollini per la presenza di acque ricche di carbonati. Le difficoltà metodologiche in sedimenti di grotta sono però compen-

sate dalla possibilità di trovare in questi depositi ampie e complete serie sedimentarie.

In molti casi la tecnica dell'isolamento del materiale pollinico è stata forzata da metodi molto complessi. I campioni prelevati sono stati liberati meccanicamente dall'abbondante scheletro grossolano e, mediante lavatura prolungata con acqua lievemente acidulata, dallo scheletro medio-minuto. Il residuo è stato lungamente trattato con acidi forti a freddo e a caldo e successivamente passato in un prolungato bagno di acido fluoridrico. Ogni campione di materiale esaminato andava da 1 a 2 cm³.

Solo eccezionalmente il polline risultava frequente entro una gran massa di residui carboniosi mineralizzati che il trattamento in soda non era riuscito a distruggere.

Su oltre un centinaio di campioni i risultati paleobotanici risultano perlopiù chiari solo su di una decina di saggi.

La ricerca paleontologica è essa stessa suscettibile di tecniche raffinate. Perlopiù noi oggi riteniamo superate e valide solo come guida le specie cosiddette tipiche dei grandi mammiferi, e concentriamo le ricerche sugli ossami dei micromammiferi, residuo del pasto dei rapaci, la cui area di caccia si estende nelle zone immediatamente circostanti la stazione in esame. Spesso queste faune sono tanto abbondanti da permettere la costruzione di spettri simili a quelli pollinici e di uguale significato climatico. Quando i livelli a micromammiferi si succedono verticalmente si ottengono poi curve di variazione climatica di notevole esattezza.

Con ulteriore tecnica si può spesso porre in confronto una serie di curve di variazione morfologica di popolazione proprie di una o più specie in seno a tutta una stratificazione, rendendo evidenti così caratteri microsistemati altrimenti inavvertibili e sommamente utili agli effetti cronologici. Questa tecnica ha avuto i suoi precursori in autori come HINTON, HELLER e BRUNNER, e si estende oggi ampiamente ovunque con ottimi risultati.

Gli elementi di studio paleobiologici risultano ormai un sicuro alleato alle deduzioni di carattere paleoclimatico e cronologico.

In una grotta la zona vestibolare è evidentemente la più interessata in questi studi, essendo quella di particolare insediamento dei rapaci e alla quale giungono quei pollini di apporto eolico che rispecchiano le condizioni dell'ambiente forestale circostante, mentre l'ambiente locale è perlopiù rappresentato da essenze erbacee, da graminacee-ciperacee, da spore di muschi, licopodiacee e felci.

L'esame percentuale di tutte le essenze, estremamente significativo in sé stesso, assume maggior valore se frazionato in più serie ecologiche riferibili alle varie zone degli ambienti microclimatici di un atrio di grotta, come atrio-vestibolo-ambiente esterno.

Penetrando nella grotta l'esame pollinico si fa via via sempre meno proficuo e nella zona interna è possibile solo in certi livelli di limi acidi depositi da correnti di piena in più o meno libero attraversamento. Qui l'esame paleobotanico deve esser estremamente accurato e sottoposto al vaglio dei dati sedimentologici. Si danno infatti casi di pollini evidentemente appartenenti a complessi sedimentari molto antichi, strappati dalle superfici soprastanti il reticolo cavernicolo funzionante da inghiottitoio.

Dal fatto che il polline trova il suo optimum di conservazione nei terreni acidi ed è distrutto in quelli basici deriva spesso la possibilità di giudicare il tono di un sedimento successivamente alterato nelle sue intime caratteristiche.

In molti casi in un deposito argilloso, successivamente incrostato da veli calcitici, si è raccolto il polline dai glomeruli preservati dalla percolazione, e dal loro studio è stato possibile ricostruire le caratteristiche di un vecchio paleosuolo.

In qualche caso gli elementi sedimentologici e paleobotanici riuniti possono stabilire i rapporti atrio-interno grotta in cavità successivamente crollata.

RISULTATI

a) La morfologia delle strutture lessinee lascia intuire una superficie di spianamento profondamente incarsita, con sottoescavazione di polje e doline e carsismo profondo in fase generale giovanile: reticoli microcarsici poco sviluppati con curve di equilibrio raccordabili con zone abbassate da recenti fasi tettoniche. Fase di carsismo poco accentuato, di clima oceanico, riferibile forse al Pliocene e Quaternario antico, con scarsi elementi paleontologici ancora allo studio.

b) Una successiva fase di ampliamento dei reticoli cavernicoli profondi, con formazione di ampi camini e condotti evorsivi e pseudoevorsivi sembra seguire la fase tettonica che ha innalzato determinati massicci rispetto ad altri, rimaneggiando le idrografie che risultano notevolmente intense nelle grotte. Riferiamo provvisoriamente questo ciclo al Glaciale mindeliano.

In questi reticoli sotterranei e principalmente in pozzi carsici e carreggiature abbiamo studiato una serie di depositi di riempimento naturale che possono esser così sintetizzati: pozzi e gallerie di corrosione carsica accentuata di clima oceanico della fase b).

c) Rivestimenti di crostoni concrezionali, colate stalagmitiche di entrogrotta poggianti su terreni rossi bolari di clima caldo-umido o alternanti con esso, spesso anche intercalanti livelli di argille di grotta con abbondanti tracce di fanghi manganesiferi di grotta, probabilmente provenienti da trasformazione di letti di guano.

d) Tracce di sventramento all'apice dei camini per abbassamento delle morfologie di superficie, approfondimento delle doline e dei polje in seguito a sollevamento dei rilievi.

e) Livelli eolici spesso poggianti direttamente sulle rocce dilavate c) o sulle concrezioni d) direttamente provenienti dall'esterno, attestanti una fase continentale molto arida, con fauna a *Machairodus*, *Mimomys*, *Dolomys* e *Beremendia*, di tipo arcaico, provvisoriamente riferibili ad un tardo Mindeliano arido, e direttamente collegabili con le superfici mindeliane del morenico gardense.

f) Sedimenti argilloso-terrosi rossastri, in gran parte provenienti dal denudamento di terreni di superficie, con fauna a *Mimomys*, *Dolomys*, *Cricetus* e *Arvicolae* arcaiche, con rari pollini mal determinabili di ciperacee e spore, riferibili ad una fase steppica, meno eolica della precedente, che riteniamo prossima a quella dei depositi di Mosbach e di certi depositi ungheresi del cosiddetto Cromeriano superiore, che persistiamo ad includere nel Mindel-Riss.

g) Depositi argilloso-terrosi bruno-nerastri umici, provenienti dal denudamento delle superfici, spesso avvolgenti frammenti di concrezioni parietali crollati dalla regione superiore della cavità, con fauna più ricca di elementi steppici (*Cricetus*) e di prateria (*Arvicola*), e diminuzione del tono forestale, indicante un più accentuato tono continentale del clima.

h) Ammassi più caotici, brecciosi di tono arido, con poco terriccio di dilavamento indicante l'avvenuta conclusione dei dilavamenti.

i) Potente concrezionamento dovuto a discesa di acque calcaree dalla superficie nella zona più elevata dei depositi.

Questi elementi stratigrafici proprii dei depositi di Soave (al limite meridionale dei Lessini, a m 45-60 s.l.m. attuale) sono stati recentemente confermati da una serie di depositi lessinei posti a maggior altitudine, che indicano una sensibile variazione faunistica in relazione alle condizioni ecologiche montane. Il più delle volte in queste breccie il ciclo sedimentario è però fondamentalmente uguale, anzi, spesse volte, i passaggi litologici tra strato e strato sono notevolmente più marcati.

Da altre discipline è dato osservare che il ciclo c)-i) è diviso dai successivi da notevoli spostamenti delle strutture tettoniche precedenti (vedi COZZAGLIO e NICOLIS per quanto riguarda il Lago di Garda) e le morfologie carsiche sono spesso rimaneggiate nei loro tratti iniziali.

Una nuova serie di depositi è stata da noi esaminata nel Veronese e ne è tipico esempio la Grotta del Ceré: in questa grotta (m 750 s.l.m.) è visibile una primitiva morfologia di carsismo assorbente verticale, camino, risolvendosi in un basso cunicolo di giunta. Il camino è stato successivamente trasformato in inghiottitoio ad ampia imboccatura in seguito a crollo delle zone morfologicamente più alte, assumendo la caratteristica struttura a « scarpa » degli inghiottitoi lessinei posti nelle zone di intenso innescamento durante le fasi glaciali. Nel fondo della cavità, spesso profondamente sottoescavata da truogoli e marmitte, si rinvennero sedimenti argilloso-ferroso-manganesiferi, tipo guano, lentamente sedimentati e ricoperti da un notevole spessore di concrezioni di entrogrotta, che riferiamo con notevole sicurezza al ciclo i) della serie di Soave.

l) Sulle croste concrezionate si estende un sedimento basale di sabbiette silicee con grossi ciottoli molto arrotondati di silice patinata per disidratazione (esposizione al sole o agenti del terreno) proveniente dall'esterno, contenenti una flora a *Tsuga*. Nella fauna sono rilevabili marmotta, lupo, orso, con indici complessivi freddo-umidi riportabili con ogni probabilità ad una fase del Rissiano seguente la prima grande fase umido-oceanica di avanzata. Dai primi elementi di studio in questa grotta sembra possibile desumere che in questo momento avvenne l'apertura del pozzo e la penetrazione in esso dell'abbondante materiale esterno pervenutovi per diretto ruscellamento.

m) In una fase successiva, l'ampliarsi della zona d'ingresso favorisce qui l'accumulo dei terreni rosso-bruni di superficie travolti nel pozzo assieme a massi elaborati di superficie, crostoni concrezionali del precedente ciclo e ad una notevole quantità di ossami.

In questo grande complesso superiore, naturalmente, l'esame pollinico è risultato negativo in ragione della violenta e rapida azione d'accumulo.

La fauna elenca orso bruno e speleo di forma arcaica, *Gulo*, leone, pantera, *Capra ibex*, *Rupicapra* e *Microtus nivalis* di preciso indice forestale fresco. Siamo evidentemente in presenza di una nuova punta oceanica del Riss II°.

m₁) Nella parte più alta del deposito la breccia è meno ricca di terriccio e i ciottoli e blocchi sono più freschi e meno elaborati da azioni chimiche; sembrano indicare un progressivo passaggio climatico a condizioni di aridità, con tendenza più continentale, come altresì viene indicato da percettibili variazioni faunistiche.

n) La breccia ossifera è in gran parte della sua massa cementata da veli concrezionali calcitici discesi in parte dall'alto, in parte provenienti dalla parete del pozzo rivolta verso il massiccio. Le croste calcaree interessano sia la roccia incassante che le argille e i blocchi di frana, penetrando sino nell'interno delle ossa, nelle cui cavità formano dei bei rivestimenti cristallini in geode.

Sarebbe qui documentata una fase oceanica calda di penetrazione idrica.

o) Nelle parti meno cementate della breccia ossifera i materiali terrosi sono stati successivamente riescavati in conseguenza dell'apertura di un cunicolo drenante risalente dalla superficie valliva, in posizione morfologica opposta a quella dei primitivi drenaggi di interstrato. Si formarono così delle cavernette rivestite da sottili concrezioni parietali pendule, spesso avvolgenti glomeruli terrosi rimaneggiati del brecciamme e scarsi elementi di superficie con tracce di nuovo materiale alloctono siliceo di tipo eolico.

p) Le cavernette sono intasate da un'ingente massa di terre rosse compatte a ghio, arvicola agreste, di ormai sicura età interglaciale riss-wurmiana.

Il ciclo sedimentario del Ceré è esattamente riprodotto in una piccola cavità-inghiottitoio presso Boscochiesanuova (a m 1100 circa s.l.m.) e le faune a ghio del complesso q) sono riprodotte nella bella breccia ossifera pedemontana di Montorio (m 95 s.l.m.): le terre rosse a ghio sono più o meno collegate a lenti di terre rosse di superficie di eguale età e sono un'uniforme caratteristica di tutte le superfici lessinee non asportate dai successivi cicli di dilavamento.

Il complesso sedimentario del Ponte di Veja (a m 602 s.l.m.) è deposto in un esteso sistema carsico formato da una rete di cunicoli a morfologie variamente mature che si

riunivano in un grande vestibolo. Grotta A indica una morfologia di tipo evorsivo risalente, con ogni probabilità, al ciclo mindeliano, riescavato durante il rissiano. Il reticolo idrico è stato più volte rimaneggiato e sconvolto da azioni tettoniche.

o-p) Nel complesso sedimentario basale della zona vestibolare e nella Grotta C si osserva un complesso di argille rosse ricche di materiale eolico rimaneggiato e travolto assieme a ciottoli calcarei e silicei a patina lucida e molto fluitati e rimaneggiati, riferibili alle fasi tardive rissiane del Ceré di clima a piovosità temporalesca intensa.

p) La superficie è ricoperta da formazioni terrose rosse con pollini di *Quercus ilex* (leccio). Questo livello indica un rallentamento della sedimentazione violenta in clima interglaciale riss-wurmiano e una ripresa di fasi oceaniche calde di tipo forestale.

Nella zona interna di grotta, un crostone manganesifero-ferroso documenta in modo eloquente un ingente deposito di guano in corrispondenza alle zone interne di grotta occupate dai pipistrelli.

q) Il crostone è fortemente sconvolto da azioni di soliflusso, che corrispondono, grosso modo, alle formazioni basali di Grotta A, ad argille rosse di grotta simili a loro volta alle argille a jena, orso speleo, marmotta, *Rupicapra*, *Capra ibex* e *Gulo* del Buco del Frate e micromammiferi riferibili con notevole sicurezza alle fasi iniziali del Wurmiano oceanico forestale delle taighe.

r) Nella Grotta A e dinanzi all'attuale imbocco di Grotta C, nelle formazioni soprastanti si estende un complesso caotico di grandi massi di crollo e breccie dovuti allo sprofondamento della volta del camerone vestibolare originario, trasformato così in dolina di crollo, limitata a valle dall'arco naturale di Veja.

L'imbocco della Grotta C, per questi fatti, risulta arretrata di circa 60-80 metri dall'ingresso presumibile del grande atrio iniziale. Attribuiamo questi grandi crolli ad una fase notevolmente continentale, ad estremi differenziati, del cataglaciale di Wurm I° (I° e 2° degli Autori francesi).

r¹) Sugli strati franoidi di Veja Grotta A, si estende un complesso argilloso-sabbioso bruno, con sabbie calcaree derivate da disgregazione in sito dei calcari oolitici delle pareti di grotta e con un notevole contenuto di scheletro siliceo-micaceo di trasporto eolico, sempre più accentuato verso l'apice della formazione. Gli abbondanti resti di micromammiferi indicano una fauna di schietto clima steppico, sempre più accentuato, sino ai livelli alti, dove l'associazione a orso speleo-criceto-*Sicista* dimostra il contemporaneo sviluppo di un rado betuleto.

s) In un livello superiore, le argille, povere di elementi eolici e di frana, assumono un colore più rossastro e sono successivamente ricoperte da un potente crostone travertinoso, che nella zona interna della grotta è sostituito da colate di concrezione compatta. Nei livelli a travertino corrispondenti al vecchio piano di grotta del limite più interno della zona vestibolare, sono contenuti frammenti di legno di conifere mal determinabili. La regolare disposizione dei banchi travertinosi sembra chiudere definitivamente il ciclo di demolizione elastica per effetto di gelo e disgelo della zona degli atri: anaglaciale Wurm 2° (3° degli Autori francesi).

Sulla superficie di Grotta A si sono depositi solo pochi centimetri di un deposito fangoso-manganesifero, residuo dei depositi a guano.

t) In Grotta C il crostone *r)* del Wurm iniziale è ricoperto da sedimenti sabbioso-argillosi in gran parte fluitati dalle zone di entro grotta e in parte provenienti da un continuo rimaneggiamento di materiali provenienti dal dilavamento delle soprastanti superfici esterne. Nei pollini, relativamente frequenti, è possibile distinguere una serie umida del ristagno idrico vestibolare in un più esteso clima regionale steppico a salice, betulla, forse più crudo del precedente. La fauna a marmotta, alce, stambecco, ci riconduce ai limiti superiori della taiga montana: cataglaciale Wurm 2°.

t¹) I livelli più alti dei depositi esterni conoidici predominano sulla serie di grotta che si innalza sotto la volta della caverna ostruendone lentamente l'ingresso. I pollini indicano una evoluzione del clima finiglaciale locale in senso continentale meno arido

che ha provocato un nuovo innalzamento dei limiti superiori della taiga a pino, che domina infatti negli orizzonti più alti di questo sedimento.

u) Nei depositi superiori dell'ingresso di Grotta C e in una cavernetta superiore (Grotta D-E) la serie continua con un livello poco potente e irregolarmente distribuito di sabbioline, detriti calcarei angolosi, eolicizzati, vermicolati e materiali di intenso, violento dilavamento, con flora ad *Artemisia* e fauna a *Microtus nivalis*, alce, di clima freddo montano che riferiamo ad un tardo Wurm, corrispondente al Wurm 3° nostro (Wurm 4° degli Autori francesi).

v) Succede, un poco ovunque, un livello concrezionale di poco spessore, perlopiù spugnoso, spesso tipo «latte di monte», che si estende dalle zone vestibolari sino alle zone di entro grotta e che sembra indicare, senza precise indicazioni paleontologiche, un clima notevolmente più oceanico, postglaciale iniziale.

z) Più in alto succedono livelli vestibolari di tipo conoidico, comprendenti due grandi sedimentazioni divise da evidenti tracce di dilavamento intermedio, riferibili a fasi postglaciali.

CONSIDERAZIONI

Non vorremmo esagerare l'importanza di questo tentativo d'interpretazione dei dati da noi raccolti. La ricerca ci ha più volte indicato che l'aumento delle notizie modifica profondamente i primitivi giudizi.

Osserviamo anzitutto che le nostre conoscenze sono particolarmente accentrate in corrispondenza a determinate fasi, lacunose in altre, e ciò in evidente contrasto con altre regioni dove i sedimenti lacunosi nella nostra regione sono molto sviluppati e ricchi di documentazioni paleontologica. La zonalità dei cicli sedimentari non preoccupa daltronde chi abbia familiarità con la trattazione dei problemi paleogeografici.

Per la nostra regione lo schema dei cicli wurmiani corrisponde, grosso modo, a quello proposto dagli Autori, e notevolmente a quello di SOERGEL: da questo siamo partiti per esplorare i dati delle fasi più antiche.

I dati ecologici, floristici e faunistici sembrano confermare le idee più volte espresse dalle vecchie scuole paleogeografiche e dall'attuale visione bioclimatologica.

Il fattore temperatura sembra sensibilmente subordinato alla quantità e al regime delle precipitazioni.

Dalle nostre osservazioni il clima ottimo per la vegetazione forestale è dato da precipitazioni ben distribuite nella fase vegetativa: da questa dipendono formazioni di spesse coltri di terreno in superficie, aumento di acidità delle acque, diminuzione di trasporti solidi, portate costanti. Il clima peggiore per la vegetazione è dato da precipitazioni irregolari, temporalesche nelle fasi di riposo vegetativo, spesso in coincidenza con momenti di crisi climatica, quando la vegetazione in crisi si dirada lasciando il terreno in preda agli agenti distruttori. Il dilavamento del suolo conduce in tal modo al denudamento delle rocce instaurando un ciclo di inerzia chimica dovuto al diminuito apporto acido, mentre le azioni fisiche risultano irregolari, violente e ricche di apporti solidi nelle cavità di più o meno diretto attraversamento.

Tra questi casi estremi si pongono naturalmente tutti quelli intermedi con le deduzioni che ne derivano.

L'esame paleobiologico ci consente deduzioni di carattere generale solo apparentemente estranee al tema di questo simposio.

Nel corso del Quaternario sono distinguibili crisi nel corso delle quali scompaiono alquanto bruscamente le forme autoctone, sostituite più o meno rapidamente da forme immigrate. Una di queste crisi caratterizza il nostro Mindel-Riss finale e dà l'avvio alle successive invasioni asiatiche che caratterizzano il Riss.

L'altra crisi si verifica alla fine del nostro Wurm e porta l'impoverimento faunistico postglaciale, che non sembra dovuto solo all'azione umana.

In generale sembra accettabile l'ipotesi che le fasi d'optimum biologico corrispondano agli interglaciali oceanici forestali e alle fasi di avanzata dei cicli glaciali. Queste fasi rivelano una notevole uniformità biogeografica su estese regioni. Le fasi aride interglaciali e cataglaciali stabiliscono invece accentuate differenziazioni in sottoregioni, spesso molto ristrette, ognuna dipendente da particolari elementi locali di precipitazione, temperatura e fatti storici.

In linea di massima esiste uno stretto rapporto tra sedimenti di origine chimica, sotto suoli forestali, e sedimenti clastici minuti di ruscellamento in climi a precipitazioni irregolari in un suolo in dilavamento. Infine, i sedimenti clastici di crollo sembrano caratteristici del clima estremamente differenziato continentale di determinate fasi cataglaciali.

Gli elementi di studio così analizzati sembrano direttamente utilizzabili per le nostre regioni, almeno per quanto riguarda la zona vestibolare delle grotte.

Nelle zone interne il sussidio della paleobiologia sembra ristretto a pochi elementi diretti di difficile interpretazione: tipiche le associazioni dei chiroteri.

I dati indiretti, cioè il ritmo dell'arrivo in caverna di acque incrostanti o di acque corrosive, secondo la nostra esperienza, sono di non facile interpretazione.

Indubbiamente noi accettiamo, in linea di massima, le conclusioni di carattere fisico-chimico sino ad ora tratte, fermo restando il principio che il clima, soprattutto nei suoi elementi fondamentali (umidità-precipitazioni) è interdipendente con la vegetazione e il suolo biologico. Ammettiamo però notevoli sfasamenti dovuti alla tendenza ritardatrice esercitata dalla biologia di determinati ambienti, quali ad esempio quello forestale.

Ad esempio: il clima forestale precede la formazione di una foresta che persisterà anche nei momenti precoci di una degradazione climatica.

A meccanismi di questo tipo possono venir riferiti certi piccoli sfasamenti osservabili nelle serie sedimentarie di grotta, specialmente per quanto riguarda la distribuzione in esse delle concrezioni. Una fase di concrezionamento è per noi valida solo se estesa a grandi aree di grotta.

Con un nuovo esempio, in natura, osserveremo che in una stessa grotta oggi si presentano zone a forte concrezionamento che corrispondono ai punti basali della frangia (dove domina l'azione corrosiva delle acque) e zone dove prevale la corrosione in corrispondenza ai punti sopra la frangia stessa.

Dove è possibile correlare superficie e sottostante cavità, si osserva perlopiù che la frangia idrica corrisponde, più che alla topografia, alle condizioni ecologiche del suolo e della vegetazione. La coincidenza frequente tra doline e sottostanti zone di attiva corrosione e concrezionamento (a seconda della profondità) sono probabilmente da attribuirsi più che alla massa d'acque ivi raccolta all'aumento del potere corrosivo dovuto alla vegetazione e, specialmente, al complesso biologico del terreno.

Queste considerazioni sono notevolmente aderenti a quanto si osserva in natura.

Il carso coperto corrisponde nella maggior parte dei casi ad un carsismo sotterraneo molto attivo e sensibile ai fattori fisico-chimici dipendenti dal clima, mentre il carso scoperto appare, per inverso rapporto, inerte e fossile.

Concluderemo ringraziando i Signori Colleghi che in questo simposio hanno permesso la messa a fuoco di alcuni fondamentali problemi dello studio del sottosuolo.

Ogni nostro incontro è fonte di piacevole constatazione che molti problemi potranno esser positivamente risolti, mentre dinnanzi a noi si aprono nuovi indirizzi di ricerca e metodi di studio.

Presidente PRETNER:

Ringrazio l'oratore e ringrazio unitamente la dottoressa Maria Vittoria Pasa per la relazione concisa ed esauriente. Si sono prenotati per la discussione i signori: Corbel,

Liégeois, Trombe. Prego il prof. Corbel di esporre le sue osservazioni.

CORBEL:

J'ai été très intéressé par l'exposé de mon collègue et ami Pasa qui m'a rappelé tout ce qu'il m'avait montré dans la région de Vérone, au cours des excursions que nous avons faites ensemble.

Dans la courbe du Wurm tracée ici, il semble que le climat soit surtout froid et sec. Pour un glaciologue, c'est un peu étrange de parler de maximum glaciaire en période sèche. Je me demande si dans le détail de la courbe on ne devrait pas distinguer deux phases: une humide au début, une sèche ensuite. Si nous considérons les phénomènes glaciaires tels que nous les voyons dans cette vallée de Côme, il semble que des langues glaciaires considérables ont descendu cette vallée et que le climat devait donc bien être humide.

Dans notre Quaternaire de la vallée du Rhône, comme dans beaucoup d'autres régions nous ne voyons apparaître de faunes et de flores froides qu'à partir du Riss. Il semble que les époques du Guntz et du Mindel ont du être notamment moins froides à en juger par la flore et la faune. Trouve-t-on quelque chose de comparable en Italie?

Autre point, dans la vallée du Rhône la maximum de froid et de sécheresse se situe à la fin du Wurm, tout à fait à sa dernière période. Vous avez l'air de penser qu'en Italie alors, le froid diminuait. Je pose la question est-ce que ce maximum de froid du Wurm final en France n'a pas eu d'équivalent en Italie du Nord. C'est assez difficile à imaginer au point de vue climatique, il faudrait imaginer une sorte de foehn généralisé. Peut-être est-ce simplement le fait que la courbe est générale et ne figure pas les petits épisodes de détails?

Presidente PRETNER:

Ringrazio il prof. Corbel e do la parola al prof. Liégeois.

LIÉGEOIS:

Je me suis réservé de prendre la parole en dernier lieu à cette ultime réunion d'un symposium particulièrement réussi.

Après chacun des rapports et après chacune des interventions, il me semblait que j'avais quelque chose à dire; j'ai attendu mon heure en espérant qu'un large débat se déroulerait à propos des climats. J'avais eu l'occasion de faire remarquer ce matin, en deux phrases incidentes, qu'on semblait avoir oublié jusqu'ici la grande importance des climats et changements de climats quant au déroulement des phénomènes spéléologiques.

Certes, on a beaucoup parlé de température et un peu de pression, mais on n'a rien dit de l'hygrométrie et en fait, on a envisagé les phénomènes karstiques sans tenir compte de ce que le climat est le facteur essentiel, et qu'il se compose de trois éléments: température, pression et humidité.

La conférence de M. Warwick a réparé cette omission et j'ai eu le très grand plaisir, en écoutant M. Tongiorgi, d'entendre son rappel des grands cycles géologiques de l'histoire de la terre, faisant même hardiment remonter les premiers cycles à ceux qui ont des périodes de quelques centaines de millions d'années, et passant de là aux cycles de quelques siècles et aux cycles de quelques années, ce qui semble d'amusants paradoxes et est pourtant rigoureusement exact.

Il vous intéressera peut-être de savoir qu'on vient de trouver en Belgique, à Wépion, à 800 mètres sous le niveau de la mer, une grotte d'âge primaire et ce n'est pas la première, puisqu'une autre avait été au siècle dernier, rencontrée à Engis, également sous le niveau de la mer, dans le calcaire carbonifère. Ces deux grottes ont donné

des concrétions calcitiques absolument analogues à celles qui se forment actuellement. M. Bögli nous avait déjà parlé de récurrences d'une durée de 100.000 ans, de déluges et de glaciations aux Etats-Unis et dans l'Afrique du Sud, il m'a rappelé ces moraines glaciaires qu'on trouve maintenant dans les régions tropicales. Eh bien, tout ceci ne prouve-t-il pas qu'il y a eu des balancements de l'axe du globe, des fluctuations dans le niveau des mers, toutes circonstances que l'on oublie parfois lorsqu'on parle des phénomènes karstiques.

Les formations de cavernement et les climats humides ou arides tout comme les manifestations glaciaires ou interglaciaires, ont débuté à l'ère primaire, on n'y songe pas toujours. Malgré le peu de créance que certains de nos collègues accordent aux formations rouges, il faut tout de même reconnaître que les géologues sont unanimes pour admettre que des formations rouges du dévonien, du permien, du lias et du trias, du tertiaire même, sont attribuées à un climat très sec qui ne surprend personne. Pourquoi en serait-il autrement à l'époque quaternaire et en spéléologie? Nous y revenons.

Il y a eu des cycles s'étendant sur des périodes de 1000 ans, et auxquels M. Pasa a prêté attention. Il y a eu des cycles de quelques dizaines d'années, dont M. Renault nous a dit quelques mots à propos des concrétions concentriques alternantes d'aragonite et de calcite, dont plusieurs parmi nous ont fait remarquer que ceci impliquait un changement de température en tous cas, et de pression peut-être.

J'ai eu la chance de pouvoir étudier naguère ce que j'ai appelé des stalactites composites, concrétions complexes formées d'anneaux concentriques de calcite et de limonite, parfois de calcite et de goethite, toujours avec canal central et une première couche de calcite, celle-ci étant un support initial solide, tandis que la limonite, en se desséchant, devient pulvérulente. Comment imaginer que, par la même fissure ou le même trou, puisse s'infiltrer une eau qui entraîne et dépose alternativement des carbonates de calcium et des hydroxydes de fer? N'est-ce pas là une preuve d'un changement de climat? Comme on prouve que la dernière couche de calcite a 10 ans de formation et que toutes les couches sont d'épaisseur sensiblement égale, tant pour les carbonates que pour les hydroxydes, on en déduit une modification de climat avec périodicité de 10 ans. J'ai rapproché ces faits des conclusions que j'avais tirées de mes études sur les fluctuations des niveaux hydrostatiques, qui sont en rapport avec les successions d'années sèches et d'années humides, cycles eux-mêmes en rapport avec les taches solaires auxquelles M. Tongiorgi a fait allusion également, mais pour des périodes très longues.

Il y a indéniablement des grottes alternativement noyées et émergées pendant des périodes de 8 à 12 ans. On connaît aussi des résurgences qui ne fonctionnent que pendant un certain nombre d'années, tarissent, puis reprennent à nouveau. Une des plus belles constatations qu'il m'ait été donné de faire est celle des « fontaines » du Fond de Flemme, dans le Condroz, en Belgique.

Ce sont en réalité des exurgences au sens où Fournier donnait ce nom à des « résurgences verticales » dans le Jura. Pendant quelques années, les agriculteurs sèment et récoltent avec succès dans une vallée qu'a formée le ruisseau de Flemme; ils fument et labourent, ce que les cultivateurs ne font pas pour rien évidemment. Au bout de 8 à 10 ans, le niveau hydrostatique dépasse la surface du sol, et les « fontaines » se mettent à débiter, le terrain devient marécageux, les agriculteurs battent en retraite, sachant bien qu'ils pourront y revenir dans quelques années.

Cette situation est analogue à celle de la nappe aquifère de la craie sénonienne dans la Hesbaye (Moyenne Belgique), où les paysans disent communément que les puits, indépendamment des fluctuations saisonnières, d'ailleurs minimes, « montent » pendant 7 ans et « descendent » pendant 7 ans. Les météorologistes et les géologues qui mettraient en doute cette théorie peuvent m'accompagner sur les lieux et donner d'autres explications.

Après cette incursion dans le comportement des gisements aquifères, j'en reviens aux concrétions des cavernes. On en a fréquemment calculé l'accroissement annuel, mais quelle erreur d'en déduire une théorie basée sur quelques résultats! On a vu des formations se faire avec une durée d'un an pour 10 mm; pour 1 mm; pour 0,1 mm. Ceci peut être valable pour fixer une datation dans un site déterminé, mais n'explique nullement le processus du phénomène, car il peut n'y avoir qu'une petite période de l'année pendant laquelle se produit la concrétion. A la périodicité saisonnière ou mensuelle, je demanderais que l'on prenne en considération la possibilité de formation pendant une partie du jour et même pendant quelques heures par jour.

J'attire particulièrement l'attention de la Commission Internationale des Datations sur cette question importante.

Il faut être très prudent en spéléologie car il y a des variations climatiques extérieures qui peuvent jouer un rôle, c'est ce que j'appellerai ici le macroclimat, et il existe des variations intérieures dont on ne peut affirmer a priori que leurs influences s'ajoutent ou non (courants d'air, immersions, pressions). En résumé, les fluctuations du microclimat ne sont pas dues uniquement au macroclimat.

C'est ici que ma conférence rejoint celle de M. Pasa, qui nous a incité à la prudence. A son appui, je me permets de citer deux phénomènes qu'on n'a peut-être pas encore signalés ici ni ailleurs et dont je puis parler en connaissance de cause pour les avoir vécus.

Il y a quelques années, je me trouvais en Colombie, explorant le bassin hydrographique du Rio Negro, affluent de la Magdalena. Le climat y est très humide et très chaud; humide par suite de précipitations de 2 à 4m annuellement sur le versant oriental de la Cordillère, ce qui explique le grand nombre de torrents, l'importance des fleuves et la densité du réseau hydrographique; chaud parce qu'on est proche de l'Equateur faisant prospérer la canne à sucre jusqu'à 1000 m et le caféier jusqu'à 2000 m d'altitude. Climat idéal pour la végétation: terreau et humus atteignant une épaisseur de 1m, impossibilité de retrouver un sentier taillé dans la forêt après 6 mois, difficulté de voir le sol en forêt parce qu'on marche sur un fouillis de racines, de lianes, de feuilles, etc. Je longeais un torrent pour gravir un versant, ce qui permet à la fois de marcher plus facilement, de s'orienter, et de voir la roche. Ces torrents suivent généralement des failles récentes qui leur tracent un chemin assez rectiligne; leur ravin est souvent très encaissé et cette gorge porte le nom de « quebrada ». Contrairement à ce que pourrait faire croire l'étymologie, quebrada ne désigne pas la coupure géologique, mais plutôt la coupure de tous les chemins à flanc de côteau par le cours d'eau rapide et assez forts, en temps de pluie pour empêcher la traversée à gué par les mules. A preuve, l'expression consacrée de « quebrada subterranea » pour un torrent hypogée. Car nous arrivons à la spéléologie du granite.

Les cours d'eau de la Cordillère n'ont pas le profil classique de nos rivières, avec leur parabole concave vers le haut, ni le profil de certains torrents alpins, avec leur courbure unique.

La pénéplation par suite du climat favorable, surtout dans les régions granitiques, forme de hauts plateaux élevés, la meseta, où les rivières ont un cours assez plat; dans leur cours médian, sur les versants généralement abrupts des montagnes, la pente est forte et le cours rapide, souvent tout en cascades; enfin dans la vallée, ou dans la plaine où coule le grand fleuve, le cours est de nouveau calme et lent. Sur la meseta, le rio draine les eaux acides de l'humus et du terreau abondant dont nous avons parlé; j'ai mesuré son pH qui variait de 4,5 à 5,5. Les eaux du même rio, analysées dans la vallée à leur confluent, donnaient un pH de 6,5 à 7. Ceci était vérifié par les ingénieurs qui avaient la responsabilité de la bonne tenue des bétons destinés à un barrage. Comment justifier cette différence? Voici mon explication: le climat provoque une altération rapide et intense du granit, dont la kaolinisation libère la soude et la potasse qui active, chose bien connue, la végétation, mais qui neutralise aussi les eaux, acides

à leur arrivée à la rupture de pente en amont du versant et neutres au changement de pente à l'aval du même versant.

Lorsque la faille que suit la quebrada met en contact du calcaire et du granit, les eaux pénètrent évidemment dans le calcaire et se neutralisent encore plus vite; on imagine aisément l'amplitude de la karstification que subit la région. Mais qu'on ne pense pas qu'il n'y ait de quebradas subterraneas que dans le calcaire: la karstification du granit est remarquable et suit le processus suivant:

- 1) altération générale le long des diaclases, et plus particulièrement là où les plans de diaclases se recourent;
- 2) désagrégation en boules et exfoliation des surfaces, formation des «coquilles d'oeufs»;
- 3) entraînement des arènes granitiques et du kaolin par les eaux courantes, lavage du résidu, entraînement du mica;
- 4) formation de véritables cavernes par empilage des blocs de granit avec concentration des éléments lourds en profondeur, notamment l'or;

Tout ce que nous venons de voir peut atteindre une profondeur de 30 à 50 mètres, parfois plus et les indiens hardis s'y aventurent, pratiquant une spéléologie qui leur rapporte un peu d'or, ce qui constitue également un phénomène spéléologique!

C'est là que j'ai pu photographier des pertes des rivières, des lacs souterrains, des résurgences au niveau des grands rios, et, naturellement, les accumulations pierreuses jalonnant en surface les quebradas subterraneas.

C'est après avoir fait ces constatations que j'ai compris pourquoi certaines plantes colombiennes, notamment les hortensias, portent des fleurs bleues ou rouges selon leur altitude; et pourquoi aussi comment les infiltrations aquifères produisent des dépôts rouges ferrugineux en amont et des dépôts blancs calcitiques en aval.

J'ai promis un second exemple anecdotique très curieux démontrant le prudence qu'il faut prendre comme règle générale si l'on fait des observations, avant de tirer des conclusions et d'échafauder une synthèse quelconque.

Un de nos collègues a parlé des effets de la condensation d'eau à la voûte des cavernes, c'est M. Trombe. Ce phénomène peut ne durer que quelques heures, ou même quelques minutes, au moment où se produit, par suite de courants d'air, un changement de température ou d'hygroscopicité de l'atmosphère. J'espère apporter une contribution nouvelle à l'étude de ce phénomène, et il ne se passe pas en grotte. C'est le hasard qui me l'a fait découvrir et c'est d'ailleurs souvent le hasard qui est à l'origine de découvertes comme vous le savez.

Le fait ne se passe pas très loin de Liège et un de nos collègues belge, ici présent, M. Ek, pourra le contrôler s'il le désire. Nous sommes à Tilff, dans une région bien connue pour ses grottes, ses chantoirs, et ses résurgences. Sur la rive droite de l'Ourthe, plusieurs ruisseaux ont leur source sur le plateau de Beaufays qui est recouvert d'un épais manteau de sable tertiaire. Ces ruisseaux, Ry de Gobry, Ry de Chawresse, disparaissent dans des dolines et des abîmes encore mal connus et réapparaissent dans le val de l'Ourthe, le premier à Méry, sous forme d'une résurgence intermittente que j'ai décrite et le second, sous la grotte de Tilff-Sainte-Anne, bien connue dans la région.

En sortant des sables, ces ruisseaux coulent d'abord sur le schiste pendant quelques centaines de mètres et le reste de leur cours, par suite de pertes nombreuses, est à sec en été. Un de mes amis voulut, dans une propriété riveraine du Ry de Chawresse, établir un étang sur la zone schisteuse d'amont, mais il me fit venir un jour pour me montrer son étang empli d'eau, alors que le cours d'eau venu de Beaufays était à sec. J'ai pensé à une exsurgence, qui me semblait la seule explication possible mais je ne trouvais aucune venue d'eau et pas la moindre trace de courant. Plusieurs jours d'observations n'apportèrent aucune solution au problème: la source paraissait tarie, mais l'étang semblait réalimenté mystérieusement.

Pour en avoir le coeur net, il s'est levé un jour entre 4 et 5 heures du matin pour aller voir sa pièce d'eau, et à son grand étonnement, il constate que le ruisseau d'amont

coule et remplit l'étang jusqu'à 7 heures du matin. Chacun s'imaginait que le cours d'eau coulait l'hiver et tarissait l'été, alors qu'il coulait toute l'année, mais en réalité, pendant quelques heures seulement en été, ce qui empêchait l'étang de se vider par évaporation. C'était presque incroyable, mais on avait la preuve sous les yeux. M. Pasa avait bien raison de nous dire d'être prudent avant d'édicter des lois, surtout en spéléologie: une exception n'infirme pas une règle générale, mais confirme plutôt cette règle comme l'énonce un vieux dicton français.

L'explication est simple: le débit du gisement aquifère de Beaufays est pérenne, mais moins abondant en été, surtout depuis l'installation d'une station de pompage dans les sables du plateau pour l'alimentation de Beaufays. Le trop-plein est donc minimum à la saison chaude et, à ce moment, il est absorbé par la végétation et par l'évaporation. Seulement, cette évaporation est très faible ou nulle aux heures matinales, à cause de la rosée d'une part, et des brumes bien connues dans la région, lesquelles ne se dissipent que dans le courant de la matinée. On entrevoit donc la possibilité d'une diaclase ou d'une caverne qui ne serait alimentée en eau de surface que durant quelques heures, et par conséquent des concrétions qui se ne développeraient que pendant ces mêmes heures, la nuit ou à l'aube, à l'instant où, précisément, il y a peu de chances que l'on fasse des observations.

Voilà les petites histoires que j'avais à vous dire, toutes confirmant que le climat a beaucoup d'importance, et, je dis plus; une importance capitale lorsqu'on étudie la spéléologie.

Presidente PRETNER:

Ringrazio il Prof. Liegeois per il lungo intervento e prego il Prof. Trombe di prendere la parola.

TROMBE:

Je voudrais répondre à Monsieur LIEGEOIS. Je vais prendre comme premier le second point. Le tas de sable qui fournit de l'eau pourrait s'appeler Theodosia, en Crimée, où paraît-il il existerait des tas de roches condensant de l'eau contenue dans l'atmosphère. On pourrait rappler aussi les condenseurs internes de Chaptal à Montpellier.

Vous avez dans la masse de sable des courants d'air qui se produisent et des condensations internes pendant la nuit et il existe un débit réel d'eau; je dois dire qu'on n'a pas étudié assez sérieusement les possibilités d'obtenir de l'eau au Sahara ou en tout autre endroit, tout au moins dans les zones où l'état hygrométrique est suffisant pour arriver à avoir de l'eau de condensation, à partir de l'air. Ce n'est pas, si vous voulez un mystère, mais c'est une chose très intéressante, et je crois que Monsieur LIEGEOIS ferait bien de la décrire en détail parce que c'est un appareil naturel qui marche peut-être mieux que les appareils artificiels qu'on a construits. Au sujet de condensations internes dans les cavernes, je voudrais simplement expliquer comment j'avais envisagé la question. J'ai dit que de l'air à une température T pouvait donner de l'eau condensée sur une voûte ou une paroi à température T-2, T-3, T-4° C et que nous avions une corrosion, non pas calcification, nous avions une corrosion par une eau qui se chargeait de gaz carbonique, qui ne contenait pas de calcaire puisqu'elle était condensée et qu'on pouvait avoir enrichissement de la nappe en calcaire de cette façon.

Examinons maintenant le premier point de Monsieur LIEGEOIS que je prends en deuxième point, le changement de pH du torrent au contact du granit. Je suis tout à fait d'accord avec Monsieur LIEGEOIS sur les résultats, mais c'est une belle illustration de la neutralisation des acides humiques par le calcaire, non pas par le granit. Parce que l'on peut faire couler des acides humiques sur le granit, et j'ai fait l'expérience de nombreuses fois, pendant des kilomètres, les eaux restant chargées d'acides humiques et elles restent jaunes. Par contre, si elles sont au contact du calcaire, les

eaux chargées d'acides humiques à pH naturellement inférieur à 7, très inférieur à 7, passent à 7 ou au dessus de 7; il se produira des humates de calcium qui se fixeront sur le sol et il se produira en même temps la saturation en carbonate de calcium classique. Vous avez observé là un phénomène qui est classique, mais qui est frappant parce qu'il se produit dans un espace très restreint et en un temps assez court, et probablement assez vite parce que vous aviez des eaux assez chaudes, je suppose. (domanda fuori microfono di Liegeois) Ah, parce que le pH continue à s'abaisser?, mais je sais que c'est une expérience bien connue des hydrologues que les neutralisations d'acides humiques ne se font pas par le granit, mais par le calcaire. DEMEULON a décrit ces phénomènes-là avec beaucoup de précision et de détails, le fait que vous voyez remonter le pH à 7 prouve que c'est le calcaire qui est intervenu, parce que le granit ne peut pas le faire remonter à 7. Les eaux du granit sortent en général à 5-6 et les eaux du calcaire sortent rarement en dessous de 7; il faudrait qu'elle soient très saturées en carbonate de calcium pour sortir en dessous de 7, elles sortent à 7, 7,2 et quelque fois plus, et même elles remontent après un courant aérien jusqu'à 8. C'est tout ce que je voulais vous dire, Monsieur le Président.

Presidente PRETNER:

Se nessun altro desidera prendere la parola, ringrazio nuovamente i relatori e dichiaro chiusa questa seduta di studio.

SEDUTA CONCLUSIVA

Mattino del 6 Ottobre 1960 in COMO

VILLA DELL'OLMO

PRESIDENTE : Giuseppe Nangeroni

Presidente NANGERONI:

Possiamo cominciare senz'altro, come avevamo stabilito nella prima riunione, la discussione delle conclusioni d'ogni singola relazione. Prego perciò il Prof. Trombe di riferire sopra la conclusione definitiva per ciò che riguarda la sua relazione.

FELIX TROMBE

REMARQUES FINALES (après discussions)

Monsieur le Président,
Mesdames, Messieurs,

Au cours de ce Symposium, j'ai pu me rendre compte que la question que j'avais eu l'honneur de commenter devant vous: Sédimentation chimique dans les grottes, était un sujet fondamental qui a fait l'objet de commentaires et d'interventions pendant la plupart de nos séances de travail.

En effet, les problèmes qui se posent dans les grottes interfèrent avec la connaissance des climats extérieurs, et des climats souterrains définis par un certain nombre de données physiques; ils sont liés aussi aux données chimiques extérieures et internes relatives à l'air, à l'eau, aux sédiments, aux matériaux rocheux, encaissants, à celles de la végétation. Ils sont liés également aux conditions de précipitation (pluie ou neige) se manifestant de manière rapide et très sporadique ou au contraire lente et continue.

Dans mon exposé je suis limité à une description sommaire des climats souterrains, et à la description des dépôts intérieurs fondamentaux (glace, sels solubles d'une manière classique, sels solubles par intervention de gaz carbonique, sédiments divers où interviennent des facteurs chimiques). Bien que ces questions aient été, comme je l'ai dit, rappelées et commentées à presque toutes les séances du Symposium, je me bornerai ici à répondre aux interventions qui ont suivi mon exposé.

Je suis tout à fait d'accord avec Monsieur CORBEL en ce qui concerne les températures moyennes des grottes en fonction de l'altitude et les différences que l'on observe pour les orifices situés sur les faces nord et les faces sud. Je rappellerai aussi ce que j'ai dit au sujet des grottes chaudes et des grottes froides et sur la position de leurs orifices. Il faut indiquer aussi, pour les réseaux souterrains à grande dénivellation que la température interne moyenne est aussi fonction de l'altitude des orifices inférieurs et supérieurs. Le degré géothermique dans un karst profond est très différent de celui que l'on observe dans un terrain homogène.

La deuxième observation de Monsieur CORBEL sur la grande différence entre la vitesse de réaction dans les eaux froides et dans les eaux chaudes concorde avec celle qui est faite par Monsieur BOEGLI et correspond tout à fait aux données classiques sur les variations de vitesse de réaction avec la température.

L'observation de Monsieur CORBEL sur les faibles variations du Ph des eaux en zone froide et les fortes variations en zone chaude est également très intéressante.

L'observation de Monsieur BOEGLI: concretionnement sous forme de stalactite en zone chaude, revêtement stalagmitique en zone froide devrait servir de base à de nouvelles recherches.

Je suis d'accord, comme je l'ai indiqué, avec Monsieur BAUER sur l'érosion du calcaire sous - glaciaire avec les réserves faite par ailleurs par Monsieur CORBEL (glaciers en équilibre aux environs de 0° C).

La cavitation sous - glaciaire indiquée par Monsieur BAUER, semble s'expliquer par l'augmentation progressive de la surface offerte aux eaux agressives, l'érosion mécanique étant pratiquement exclue.

Le concretionnement observé paraît plus difficile à expliquer. Il m'a paru également difficile de concevoir le processus physico-chimique qui permettrait, suivant Monsieur YAKUCS, des dépôts de CO_3Ca par variation de pression hydrostatique. Des expériences dans ce domaine seraient à poursuivre.

Je suis tout à fait d'accord avec Monsieur CIGNA, sur la possibilité d'augmentation de solubilité du CO_3Ca en présence de sels n'ayant pas d'ions communs avec le CO_3Ca . Une augmentation de solubilité de 2 à 4% en présence de 1% de NaCl paraît a priori tout à fait plausible; ces augmentations comme l'a souligné Monsieur CIGNA sont d'ailleurs faibles.

Je suis également d'accord avec Monsieur WARWICK sur ce qu'il a dit au sujet des concrétions, en particulier sur le rôle que peut avoir l'arrêt temporaire des dépôts calcaires pour permettre l'amorçage ultérieur d'un développement excentrique.

Une dernière question qui a fait l'objet d'interventions de Messieurs WARWICK, CIGNA, et dans une autre séance, de Messieurs GEZE, CORBEL, FRANKE, et de moi-même, est celle de l'aragonite.

Les échanges de vue peuvent se résumer ainsi:

1°) Messieurs WARWICK, SKRIVANEK, et CIGNA mentionnent le rôle « inducteur des sels de strontium dans la formation de l'aragonite, carbonate anhydre de calcium orthorhombique, normalement stable au-dessus de 25 à 30°C. Les sels de strontium (carbonate et sulfate isomorphe de l'aragonite) permettant le développement de l'aragonite même dans les solutions froides (SKRIVANEK).

2°) Monsieur FRANKE rappelle le rôle des sels de strontium et de la température dans la formation de l'aragonite; il signale à ce sujet le travail de W. MOORE sur les grottes américaines (cf mon rapport). (Aragonite dans les grottes chaudes, absence d'aragonite dans les grottes froides).

3°) Monsieur GEZE, s'appuyant sur les travaux de Mademoiselle POBEGUIN qui a obtenu de l'aragonite synthétique, estime que la condition primordiale de préparation de l'aragonite est d'obtenir la saturation des solutions de carbonates, en particulier dans une atmosphère relativement deshydratée. Il est possible ainsi d'obtenir au-dessous de 16° un dépôt d'aragonite. Il est d'ailleurs prouvé que l'on trouve de l'aragonite dans des grottes dont la température est de 10° à 14°C. Par exemple en France, au Gouffre de Saint Paul (Haute-Garonne), à la grotte de Moulis (Ariège), et particulièrement dans la Grotte d'Engomer (Pyrénées Orientales); ce résultat pourrait être dû au fait que l'aragonite est légèrement plus soluble que la calcite dans les mêmes conditions physico-chimiques (voir rapport F. TROMBE).

4°) Monsieur CORBEL appuyant le point de vue de Monsieur GEZE, signale que les grottes chaudes américaines sont probablement aussi des grottes relativement sèches, si bien que l'on ignore si c'est le facteur température ou le facteur dessiccation de l'air qui est responsable de la formation de l'aragonite de ces grottes.

5°) Monsieur TROMBE signale que dans les grottes froides les cristaux d'aragonite sont toujours de faible poids par rapport au masses de calcite sur lesquelles ils sont développés; de plus, on trouve dans les grottes froides (Moulis) des stalactites plus anciennes ayant une macroforme d'aragonite et qui sont totalement ou partiellement transformées en calcite.

Le commentaire de cette discussion et de divers autres échanges de vue pourrait à titre indicatif être le suivant:

a) en ce qui concerne le strontium, il est rappelé que cet élément accompagne normalement le calcium dans les carbonates des grottes. La quasi totalité des concrétions de calcite contiennent du strontium. Probablement existe-t-il un titre en strontium à partir duquel, il intervient réellement pour provoquer la formation d'aragonite. Le rôle d'autres sels, par exemple le sulfate de calcium, est aussi à envisager.

b) la formation d'aragonite en atmosphère non saturée est indéniable, cette condition de siccité relative de l'atmosphère paraît impérative pour la formation d'aragonite dans les grottes froides peut-être est-elle aussi impérative dans les grottes chaudes.

c) au-dessous de 25 à 30° C, la stabilité de l'aragonite est certainement fonction de la température des grottes. Elle doit être plus grande dans les grottes chaudes où pourraient se former de grosses concrétions que dans les grottes froides où l'on ne trouve que des concrétions jeunes et d'un poids relativement faible et également de l'aragonite en voie de transformation en calcite.

De toutes manières, des voies de recherches précises et intéressantes résultent des échanges de vues précédents.

En terminant, je voudrai remercier vivement le président NANGERONI, et les organisateurs de cette magnifique réunion internationale de spéléologie, en particulier Monsieur DELL'OCA de m'avoir procuré le plaisir d'y participer d'une manière dont je ressens tout l'honneur.

Presidente NANGERONI:

Ringrazio il Prof. Trombe delle sue espressioni ultime ma, evidentemente ringrazio sopra tutto per il modo come ha difeso se stesso e come ha parlato in rapporto al problema chimico della sedimentazione. Sarebbe stato forse opportuno, non so se mi sbaglio, limitare il symposium unicamente magari a questo solo argomento perchè mi è sembrato così profondo e di così difficile soluzione che sarebbe stato necessario impiegare non una mezza giornata, non una sola seduta, ma per lo meno due o tre giorni consecutivi per questo problema. Ad ogni modo, quello che non si è fatto oggi, si potrà evidentemente fare in seguito; altrimenti gli altri cosa faranno dopo di noi?

Prego il Prof. Renault di riferire sul suo problema, problemi fisici in relazione con il riempimento naturale di grotte.

Philippe RENAULT

CONCLUSIONS

DE LA RÉUNION SUR LES PROBLEMES PHYSIQUES EN RELATION AVEC LES REMPLISSAGES NATURELS DES GROTTES

A la suite de notre exposé de nombreuses remarques ont été formulées, certaines portant sur des points de détail, d'autres d'un ordre beaucoup plus général. Nous reprendrons le plan initial pour les passer en revue.

— I —

GENÈSE DES SÉDIMENTS DÉTRITIQUES DE CAVERNE

Si le mécanisme des effondrements n'a pas attiré de remarques, il n'en a pas été de même pour le façonnement des galets. M. Siffre a fait remarquer que, à son avis,

le façonnement en marmite de géant n'aboutissait pas à la forme sphérique mais à une forme discoïde caractérisée par un fort aplatissement.

Cette opinion conduit à faire part des observations que nous avons faites en 1953 dans une marmite de géant (la Bétonnière) de l'étage inférieur du Grand Aven de Canjuers (Var). Les galets, avec un grand axe moyen de 5 à 6 cm, présentaient un aplatissement oscillant de 1,1 à 2, un émoussé allant de 300 à 800, un allongement (L/l) de 1 à 1,5. Autrement dit observés verticalement tous ces galets présentent une forme subcirculaire, vus latéralement deux formes principales se dégagent de l'échantillonnage examiné: d'une part des galets ovoïdes reposant sur un élément de surface aplani, d'autre part des galets dont les parties supérieures et inférieures sont aplanies, ce qui leur donne globalement une forme de disque.

La comparaison de ces deux types permet de comprendre le mode de façonnement propre à cette marmite. La section, en vue verticale, des galets, permet de concevoir une forme initiale sphérique ou ellipsoïdale. Puis certains galets se sont usés en oscillant sur leur base, celle-ci tendant vers un aplatissement tout en gardant un profil convexe. D'autres galets, plus gros et restant immobile, ont été rodés par leurs voisins plus légers, les surfaces de frottement se transformant en cupules de rodage concaves (H. Schoelle); avec usure sur la face supérieure et la face inférieure, l'aboutissement est une forme en disque.

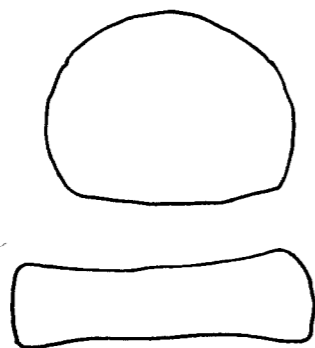


Figure 1 - Vue latérale de deux galets de la Bétonnière du Grand Aven de Canjuers.

La sphère apparaît comme propre au façonnement karstique et constitue une forme idéale avec les réserves suivantes: le nombre de sphères, sauf cas exceptionnel, sera petit par rapport au nombre total des éléments façonnés⁽¹⁾; cette forme est un aboutissement qui nécessite la réunion de certaines conditions. D'autres modalités (ralentissement de l'écoulement, dans l'exemple cité) aboutiront à la forme disque. Ailleurs un trajet en cascade, par bris des éléments charriés, augmentera la dissymétrie.

L'observation sur place des mécanismes en jeu s'avère indispensable pour interpréter correctement l'évolution des sédiments souterrains.

* * *

La vitesse de façonnement des galets, d'après le même auteur, serait lente. L'exemple cité de la rivière souterraine du Saut de la Pucelle montre que cette proposition est fautive si l'on veut la généraliser. Par ailleurs les facteurs déterminant cette vitesse

(1) Viehmann (J.) - Contribution à la connaissance de la genèse des marmites. *Speleologia*, Varsovie, I, 1959, 3, p. 145-174.

de façonnement restent à préciser. Il existe plusieurs rivières souterraines correspondant à des pertes de la bordure E du Causse de Gramat (Lot); la Saut de la Pucelle est la seule d'entre elles à montrer un façonnement rapide des galets.

C'est pourquoi nous insisterons sur l'importance des courbes mettant en rapport la variation d'un facteur connu (aplatissement, par exemple) avec la distance à l'entrée ou le chemin parcouru à l'intérieur du réseau. L'interprétation doit alors être conduite en fonction du milieu de sédimentation, ce qui renvoie à la troisième partie de notre exposé initial.

* * *

La granulométrie des sédiments sableux est un domaine complexe. Remercions ici A. Cigna de nous avoir apporté une formule fixant le diamètre moyen en fonction du lieu d'origine, et qui, mise au point pour le transport éolien, apporterait cependant un moyen complémentaire d'analyse pour les dépôts souterrains.

Le problème posé par la genèse des sables calcaires et des calcarénites a suscité plusieurs remarques; surtout à propos des grosses accumulations de ce sédiment.

Une formation par cristallisation au fond d'un bassin, évoquée par J. Choppy et B. Gèze, me paraît applicable à certains remplissages de fonds de gour, mais devient difficile à utiliser pour expliquer la genèse des formations de plusieurs mètres d'épaisseur.

J. Choppy considère que l'érosion d'une concrétion, pour aboutir à la formation de sable, devrait évoluer dans le sens galet-granule-sable. Or ces intermédiaires ne se rencontrent pas à proximité des dépôts de calcarénites.

Nous répondons à ceci:

— la démolition des concrétions massives par un écoulement rapide est connue et les galets de concrétions remaniées s'observent dans certains dépôts. Ils évoluent en général par diminution de taille (usure et corrosion), mais n'aboutissent pas à la formation de sable.

— dans certaines conditions une concrétion se décompose sur place par disjonction de ses éléments cristallins, transformant la masse calcitique dure en un milieu tendre; cette décomposition prélude en général à la formation de mond-milch. Un écoulement rapide qui lavera cette concrétion peut entraîner les grains sans qu'il y ait façonnement de galets avant le dépôt du sable.

— enfin, avec B. Gèze, et ce dernier argument nous paraissant plus sérieux, il faut considérer l'existence de concrétions naturellement fragiles: petites excentriques, aragonite et surtout calcite flottante. Celle-ci peut se rencontrer sous forme de plaques isolées; mais elle constitue fréquemment (igüe Mathurin, Lot par exemple) des amas de plusieurs mètres d'épaisseur formés par l'empilement des plaques sédimentées après chute sur le fond du bassin. Ces accumulations sont extrêmement fragiles et se réduisent en poudre au moindre contact. Un écoulement traversant ce milieu très fragile le transformerait facilement en sable.

Comme l'a souligné B. Gèze, le problème reste posé mais il était intéressant de signaler son existence.

* * *

Les dépôts argileux ont été simplement mentionnés. Dans les interventions qui ont suivi notre exposé, A. Bögli a présenté ses observations personnelles dans la grotte du Höll-Loch. De ce rapport très riche et très fourni nous retiendrons simplement les mesures portant sur les teneurs en humus dans une sédimentation argileuse de siphon; les fentes de retrait, qui, en caverne soulèvent des problèmes non encore résolus; ce fait que l'argile est le seul sédiment qui a la possibilité de sédimenter à la voûte d'une galerie lors d'une crue. Cette propriété est liée à la nature colloïdale de l'argile.

Espérons que cet auteur livrera prochainement une publication détaillée consacrée à ses recherches personnelles.

REMPLISSAGE ET CREUSEMENT

En introduction à ce chapitre, R. Ciry a rappelé la distinction entre les apports exogènes et les apports endogènes dans la constitution des sédiments souterrains. Cette notion suggérée dans notre exposé, mais sur laquelle nous n'avons pas insisté spécialement, est en effet extrêmement importante, les sédiments d'origine externe jouant un rôle de colmatage, facilitant par ailleurs certaines formes de creusement, les sédiments d'origine interne étant le reflet des processus morphogénétiques à l'intérieur d'un karst donné.

L'importance relative des apports exogènes et des apports endogènes sera variable d'un karst à l'autre et d'un point à l'autre du réseau. A titre d'exemple mentionnons à l'intérieur du réseau de Lombrives (Ariège), l'importance de l'apport exogène formé de galets de granite parfois de grande dimension. Inversement dans la grotte de Moulis, partie aval d'un réseau, le colmatage apparaît en majorité endogène (sable dolomitique, concrétions) sauf en ce qui concerne la fraction fine. L'importance relative apports exogène - endogène constitue l'un des éléments à considérer comme base de la définition des milieux de sédimentation souterrains.

Plusieurs remarques ont été formulées à propos de l'action du remplissage sur le creusement. Remercions en particulier A. Pasa pour le très bel exemple d'altération de paroi liée au remplissage qu'il a bien voulu nous donner: corrosion sous remplissage argileux, induration sous les niveaux sableux.

Le problème des vagues d'érosion fut très discuté. J. Corbel a signalé l'existence de vagues d'érosion provoquées par les embruns tombant sur la glace des icebergs; il se demande si les projections d'eau émises en régime torrentiel par un torrent souterrain ne seraient pas susceptibles de déterminer des formes analogues par corrosion. F. Bauer donne un exemple très intéressant de conduit remontant à remplissage de galets avec parois couvertes de vagues d'érosion et leur absence sur la voûte.

Pour J. Corbel le façonnement des vagues d'érosion serait attribuable à la corrosion, pour F. Bauer il serait fonction de la vitesse du courant. Des expériences en cours pourront nous renseigner un jour sur ce point.

J. Corbel a rappelé l'influence du climat sur les mécanismes de creusement en rapport avec le remplissage. Nous n'insisterons pas.

LOCALISATION DU REMPLISSAGE ET MILIEUX DE SEDIMENTATION

Plusieurs contributions de valeur ont élargies les grandes subdivisions de ce chapitre capital. J. Corbel a d'abord rappelé qu'il existe plusieurs types de karst dont les sédiments souterrains présentent des caractères différents. Il distingue spécialement les régions calcaire en creux dans la paysage, avec apports exogènes importants et les régions calcaires en relief, avec une alimentation surtout endogène. Cette subdivision introduit immédiatement aux distinctions climatiques.

J. Choppy rappelle ensuite l'existence d'un réseau de fentes autour du réseau de conduits. Nous serons d'accord avec lui sur l'intérêt de connaître les sédiments de ce réseau de fentes, en soulignant toutefois les difficultés de cette étude qui nécessiterait d'importants travaux (galeries artificielles, sondages).

A propos de la distinction entre région d'entrée et parties profondes d'un réseau, il faut rappeler que, si la limite entre ces deux zones est facile à tracer à un moment donné, elle a varié au cours de l'histoire du réseau (phénomène du recul des entrées, Kukla et Lozek). La coupe de la grotte de Bara-Bahau (Dordogne) est typique à cet

égard. L'entrée actuelle montre quelques mètres de dépôts archéologique reposant sur une grande épaisseur d'alluvions souterraines. Il est facile d'admettre un premier régime à sédimentation uniquement alluviale. Puis un stade de sédimentation sèche correspondant à une topographie extérieure différente de la morphologie actuelle. Enfin le recul de cette entrée conduisant à la disposition actuelle des couches archéologiques et des couches antérieures. Dans ces conditions une fouille à l'entrée d'une grotte renseignera fréquemment sur la sédimentation des parties profondes; en même temps la coupe ainsi obtenue apportera une succession stratigraphique permettant de dater les divers éléments de cet enchainement sédimentaire.

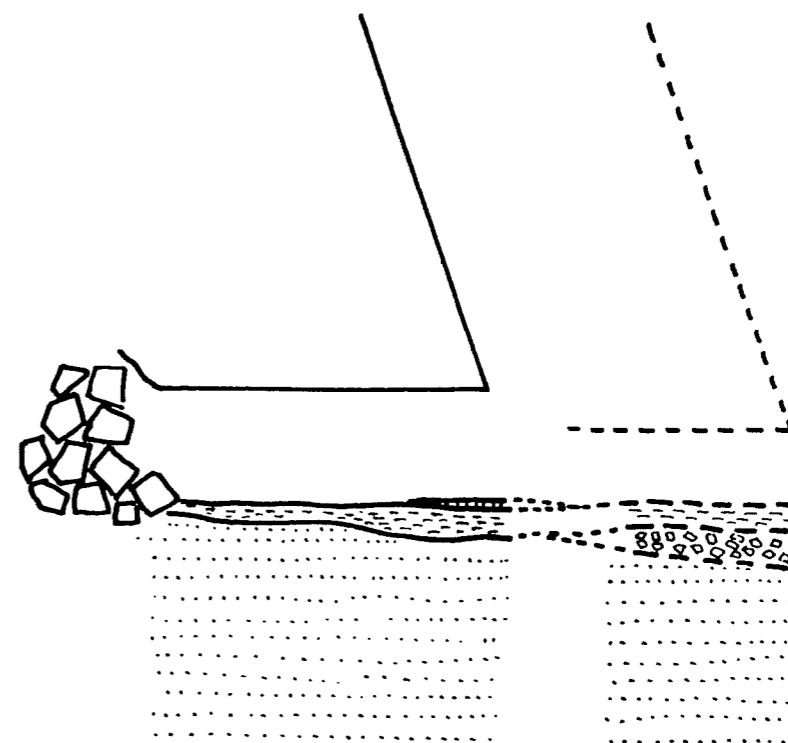


Figure 2 - Rapport des sédiments de zone d'entrée et des parties profondes d'une grotte, inspiré de la grotte de Bara-Bahau, Dordogne. Pointillé: alluvions; tireté: argiles à « Ursus speleus »; petits carrés: dépôts archéologiques plus anciens actuellement détruits.

Parmi les milieux de sédimentation propres aux parties profondes des réseaux, le cas très particulier des siphons et des galeries remontantes a suscité plusieurs interventions.

Il existe deux types de sédimentation de siphon:

— le siphon-diaphragme provoque un ralentissement de l'écoulement lors des crues avec décantation des produits, fins en suspension (Ex: siphon terminal de la grotte du Portillou, cavité appartenant aux réseaux amont de la grotte de Moulis, Ariège); A. Bögli a donné un exemple très net de ce type, pris dans la grotte du Höll-Loch, avec association à une sédimentation en hauteur dans les boyaux sus-jacent (étagement sédimentaire),

— le siphon à écoulement rapide, en raison de sa section et surtout des possibilités d'évacuation vers l'aval, où l'accélération du courant provoque un lavage des parois ou des blocs et galets obstruant le conduit (Ex: siphon terminal de la perte du Saut de la Pucelle, Lot). F. Bauer, A. Bögli et M. Siffre ont donné des exemples bien définis de ce type de siphon, en précisant les modes de sédimentation et de façonnement des galets propres à ce milieu particulier. Nous pouvons personnellement ajouter deux exemples complémentaires. Le premier sera pris à la perte du Coustou (près de St Girons, Ariège). Cette petite perte temporaire débute par une galerie descendante, accidentée de marmites de géant, puis le conduit remonte en s'élargissant, la progression s'effectuant sur un talus de galets très arrondis. Au sommet de cette branche remontante, le conduit pénètre dans un complexe de boyaux et de cavités verticales correspondant à la zone d'absorption définitive. L'autre exemple sera pris au Trou de la Vieille (Ardèche) évent situé à une cinquantaine de mètres audessus du talweg de la vallée de l'Ibie. Une courte galerie conduit à un entonnoir déblayé naturellement par le fond à travers un remplissage de blocs anguleux. Cette arrivée d'eau inférieure a remanié sur place les blocs anguleux de la partie inférieure du dépôt et les a transformés en galets.

Ce processus est analogue à une lévigation agitant les éléments grossiers à la partie inférieure de la colonne, entraînant les éléments fins vers les niveaux supérieurs où ils sédimentent lors de la phase stationnaire des épisodes de crue. Nous voyons là un autre cas d'étagement propre aux réseaux souterrains.

— III —

REMANIEMENTS.

Dans notre exposé d'introduction nous avons éliminé la question argile ce qui nous a conduit à minimiser les phénomènes de solifluction. R. Ciry a signalé et souligné cette lacune. Nous n'ajouterons rien à ce qu'il a dit sur ce sujet qu'il connaît particulièrement.

L. Barral a souligné l'importance des remaniements en stratigraphie préhistorique en donnant un exemple de remaniement par soutirage vertical.

F. Trombe, considérant un réseau à plusieurs étages a insisté sur les caractères des sédiments propres à chacun de ces niveaux.

— IV —

ETATS DE PAROI

Enfin P. Parenzan, en présentant de très beaux moulages, a parlé des vermiculations et des taches punctiformes observées dans les salles du laboratoire souterrain de Naples, vieilles de 20 siècles, artificielles, creusées dans le tuf. La nature des constituants de ces traces pariétales, le fait qu'ils contiennent des protozoaires et des débris organiques humains montre qu'ils dérivent de suintements, issus de la surface, à travers le réseau de fentes sus-jacent aux galeries.

Récemment G. T. Warwick est arrivé aux mêmes conclusions à propos des vermiculations de la Poole's Cavern (1).

(2) Warwick (G.T.) - Vermiculation... *Newsletter of Cave Res. Gr. of Great Britain*, n. 79-80, 1959, p. 14-17.

Nous avons commencé à étudier les états de parois en caverne à partir de 1953, en commençant par les vermiculations argileuses du Grand Aven de Canjuers (2). Nous avons poursuivi cette étude et profitons de cette occasion pour présenter une brève mise au point sur cette question.

Les états de parois sont mentionnés, incidemment, bien que depuis très longtemps dans la littérature; dès 1862, l'abbé Pouech note, dans la grotte de Lherm (Ariège) « sur la surface du rocher une couche de 1 mm au moins d'efflorescences terreuses... de sorte qu'en grattant légèrement les parois de la grotte on peut en ramasser à pleine main ». Les préhistoriens en étudiant les traces pariétales, ont également recueillies des observations fragmentaires sur ce sujet. Plus récemment les études sur le mondmilch ont fait rebondir la question.

Par « état de paroi » nous désignons l'état de la surface de la roche — ou d'un sédiment (concrétion par exemple) plaqué sur la roche ou même faisant simplement office de paroi (3) — et qui pourra se présenter sous forme de cassure fraîche, propre et lavé, ou encore décomposé, concrétionnée ou recouverte d'un enduit. En outre dans beaucoup de cas les états de parois sont inséparables des « accidents de parois »: cupules, filonnets de calcite en relief, etc...

Ces états de paroi résultent de l'action atmosphérique, du contact de l'eau avec la surface pariétale, d'apports chimiques ou physiques. Les interactions entre ces processus sont multiples et une revue complète oblige à ouvrir de multiples subdivisions.

1^o — **Action atmosphérique** - L'assèchement constitue l'élément principal à considérer. En outre certains auteurs considèrent que les poussières siliceuses ultra-fines entraînées par les courants de convection auraient un certain pouvoir d'érosion. Cette proposition attend d'être démontrée.

2^o — **Corrosion formant des enduits d'insolubles** - La corrosion (eaux de ruissellement et de condensation) se traduira par la mise en relief, puis par l'accumulation d'un film de résidus insolubles. Tenu sur une roche pure, cet enduit pourra devenir très épais sur roche marneuse; citons les importants placages d'argile de décalcification signalés par L. Baisan à la grotte de Matharel. Le caractère « en place » de ces enduits est prouvé par les minuscules Rhynchonelles demeurées en suspension dans l'argile. En roche dolomitique le même phénomène s'observera, à la grotte de Moulis par exemple, où les parois se transforment localement en enduits sableux.

3^o — **Actions biologiques** - Le lustrage des parois par d'anciens passages d'ours, les griffades d'ours ou de chauves-souris sont bien connues. Les chauves souris se suspendent en certains points privilégiés. En cours d'hivernage, comme il est normal, leur vessie rejette son urine. Ce liquide ammoniacal aboutissant toujours aux mêmes points provoque des altérations de paroi d'allure punctiforme (Ex. grotte de Lherm, Ariège) (5).

4^o — **Apports chimiques** - a) **Substitution** - La substitution du calcaire en phosphate est connue depuis le début du siècle. La substitution en argile fut envisagée à plusieurs reprises. Les réactions paraissent difficile à concevoir; cependant un travail récent de F. Kaisin décrivant les intenses altérations observées dans les calcaires du Congo Beleg — où la roche est intégralement transformée en conservant sa texture macroscopique — repose à nouveau la question. Dans ce cas la substitution est préparée par une désagrégation de la roche ce qui introduit à:

b) **Croûtes et indurations** - En certaines conditions la paroi sera indurée par la calcite; le phénomène a été signalé par A. Pasa au cours de ce symposium; il est connu en diverses cavités. Certaines croûtes paraissent relever du même processus. Dans la galerie d'entrée de la grotte de Moulis la dolomie pulvérulente est recouverte d'une croûte dure d'environ 1 cm d'épaisseur donnant à la paroi l'allure de la roche massive. En Espagne, dans la première salle de la Cueva C de Arredondo (Monts Cantabriques), Derouet et Dresco signalent une paroi recouverte d'une « peau » épaisse de 3 mm, qui se décolle par endroit (bords redressés) et recouvre un mondmilch blanc. Dans ces deux cas, l'observation est faite près de l'ouverture et fait songer à une évaporation de zone d'entrée dans la région des oscillations thermiques.

c) **Cristallisations et enduits** - Les enduits de calcite sur paroi, certaines excentriques, les plumets d'aragonite correspondent de façon très nette à un phénomène de paroi. Les enduits de manganèse, de phosphate, (tout au moins dans certains cas, l'Amberat (P. C. Orr) de nature organique seraient à classer dans la même rubrique. Dans certains cas une action bactériennes serait impliquée pour expliquer la genèse de ces enduits ce qui nous amène au.

d) **Mondmilch** - Enduit parfois très épais ayant son origine première dans un processus de décomposition biochimique et dont l'évolution physico-chimique, la part des processus biochimiques et physico-chimiques n'ayant pas encore été faite, abouti à la néoformation de cristallites variés.

(3) Voir Renault (Ph.) - *Ann. spéléo*, t. XIV, 1959, p. 249-252.

(4) Par exemple « état de paroi » d'un talus d'argile recouvert d'un enduit de manganèse

(5) Déjà signalé par R. de Joly au 1^o Congrès National de Spéléologie de Mazamet (France) en 1939.

50 — **Apports physique** - a) **Placages de crue** - Les éléments fins transportés en suspension par les crues présentent la propriété de pouvoir se déposer sur les parois ou à la voûte des conduits noyés. Ces placages seront continus ou lacunaires. Dans certains cas les lambeaux présenteront une disposition circulaire (taches punctiformes). Le passage du placage continu aux taches isolées peut être observé.

b) **Ruissellement issu du réseau de fentes** - Les analyses de G. T. Warwick et P. Parenzan ont montré que les fentes crevassant les parois des conduits souterrains pouvaient être parcourues par une microcirculation, venant déposer son débit solide au débouché des fentes sur la paroi.

c) **Reptation de l'argile sur paroi** - Certains filets d'argile sur parois inclinées ou verticales correspondent à de microreplats ou à des secteurs plus rugueux. Parfois ces rubans se rattachent à des filets correspondant à une microfente. Ils s'observent également sur voûte, les rubans étant indépendant de toute fente. Dans ce dernier cas G. T. Warwick suppose qu'il y a reptation des particules argilleuses sur les surfaces humides et concentration le long de certaines lignes, ces accumulations locales étant liées aux propriétés colloïdales des sédiments fins. Des expériences de contrôle seraient nécessaires.

d) **Ancien remplissage** - Un ancien colmatage, ultérieurement évacué, laissera ses traces sur la paroi, lui donnant un aspect caractéristique.

En résumé, et plus particulièrement à propos des vermiculations argileuses (en faisant abstraction de certaines altérations d'origine organique, et classant à part les traces d'anciens remplissages qui pourraient être à l'origine de quelques rubans verticaux anastomosés) les vermiculations et ponctuations proviendraient d'apport du réseau de fentes, de phénomènes de reptation sur paroi dans un cas, de dépôts de crue dans d'autres cas. Le mécanisme présidant à la localisation préférentielle en certains points de la paroi apparaît encore incomplètement élucidé.

— V —

CONCLUSION

Cette réunion n'a pas été suivie de discussions acharnées portant sur des points théoriques fondamentaux. Elle a cependant permis de passer en revue un certain nombre de phénomènes importants. L'intervention des auditeurs conduisit dans certains cas à élargir notablement le point de vue présenté par le rapporteur. Qu'ils soient remerciés ici pour leur contribution.

Pour finir le rapporteur exprime sa reconnaissance et manifeste sa gratitude à l'égard du Comité d'Organisation qui a bien voulu lui faire l'honneur de le convier à prendre la parole devant cette assemblée. Il espère avoir rempli correctement sa tâche.

Presidente NANGERONI:

Ringrazio della comunicazione della relazione definitiva dell'Amico Prof. Renault, che mi ha molto interessato. La fenomenologia fisica è apparentemente meno complicata della fenomenologia chimica, ma ha pur essa degli aspetti estremamente vari da angolo ad angolo della stessa grotta. Quindi ringrazio, e ringrazio anche per gli interventi e per le risposte a questi interventi.

Prego il Dr. Franke di riferire sulla datazione dei sedimenti delle grotte. Cominciamo quindi l'argomento che il Prof. Renault ha volutamente lasciato un po' in sordina.

FRANKE:

Sehr geehrter Herr Präsident, meine sehr geehrten Damen und Herren. Ich bin in der angenehmen Lage, mich kurz fassen zu können, denn einige der aufgeworfenen Probleme sind bereits geklärt worden, und ein paar Herren waren sogar so freundlich, ihre eigenen Fragen zu beantworten.

Ich möchte zunächst auf eine prinzipielle Frage von Prof. Warwick eingehen, der sich erkundigte, wie die Bestimmungen von Temperaturen und ähnlichen Werten, die nicht direkt mit dem Alter zusammenhängen, überhaupt in Verbindung mit Altersbestimmungen zu bringen sind. Ich darf hierzu sagen, dass wir leider nur sehr wenige

Mittel haben, um die Jahreszahlen direkt zu bestimmen, und deshalb oft auf indirekte Wege angewiesen sind. In Fällen, wie etwa bei den Warven oder bei den Baumringen, erhalten wir direkte Jahreszahlen, allerdings auch nicht immer absolute Werte, sondern nur eine Datierung eines Abschnittes, eine Datierung, die relativ zu irgend einem Ereignis gilt. Auch die Radiokarbondatierung ist genau genommen keine direkte Datierung. Hier sind wir ja darauf angewiesen, die Strahlenintensität des radioaktiven Elements festzustellen, und erst daraus, durch die Abhängigkeit der Intensität mit der Zeit, durch den Abfall, sind wir in der Lage, die eindeutige Zuordnung Intensität-Zeit vorzunehmen. Ich darf das vielleicht durch eine Skizze erläutern.

Bei der Radiokarbon-Methode stützen wir uns auf das Abflauen der Intensität mit der Zeit, ich trage nach rechts die Zeit auf hier haben wir 100%, die Anfangsintensität, und wenn es uns nun gelingt, einen Wert festzustellen, dann wissen wir genau, wieviel Zeit seit dem Beginn des Zerfallsprozesses vergangen ist. Hier haben wir die Halbwertszeit, die Zeit, in der die Hälfte der Substanz zerfallen ist, also im Fall des Radiokarbons etwa 5600 Jahre, und sehen, dass die bestimmte Probe, die diese Intensität gezeigt hat, etwa 6000-7000 Jahre alt ist.

In Fall einer indirekten Datierung, wie bei einer Datierung durch Temperaturen, haben wir leider keine eindeutige Zuordnung zwischen der Zeit und der zeitabhängigen Grösse. Wir müssen hier einige Informationen mehr erhalten, um eine zeitliche Einordnung vornehmen zu können. Ich nehme an, wir haben durch irgendeine Methode den Temperaturgang in Abhängigkeit von der Zeit absolut festgestellt, und wir finden nun etwa durch eine andere Methode, auch wieder die Abhängigkeit der Jahresdurchschnittstemperatur von der Zeit, aber nur für einen kleineren Abschnitt, dann können wir, falls dieser Abschnitt gross genug ist — er muss natürlich grösser sein, als ich hier schematisch aufgezeichnet habe — die Zuordnung eindeutig vornehmen und so haben wir durch eine Bestimmung eines Abschnittes der Temperatur eine zeitliche Einordnung zustandegebracht.

Ein anderes Problem, das aufgeworfen wurde, ist die Frage, ob wir mit einer Entmischung von C 12 und C 14 rechnen müssen. Ich kann Sie hier beruhigen. Dieser Effekt ist nicht gross genug, um Fehler zu erzeugen. Auch das möchte ich aufzeichnen. Nehmen wir an, das wäre der Prozentgehalt an Kohlenstoff; nun kommt C 14, das radioaktive Isotop, in einer ganz geringen Menge dazu, noch immer übertrieben gezeichnet, vielleicht so viel. Und nehmen wir jetzt an, dass bei solchen Entmischungsvorgängen in einem Fall 0,1% Prozent mehr vom normalen Isotop, verdampft, als vom seltenen; dann hätten wir also hier mit 0,1% zu rechnen, und hier mit 0,2%, das ist aber ein Wert, bezogen auf die Gesamtmenge des C 14, der nicht zu berücksichtigen ist, da der hervorgerufene Fehlereffekt viel zu klein ist, als dass er eine Beeinflussung des Ergebnisses mit sich bringen könnte, die ja durch die Fehlergrenzen der Apparatur und der Methoden selbst gegeben sind.

Ich erwähnte in meinem Referat ganz kurz die Möglichkeit, auf Grund der Grössen von Stalagmiten Schlüsse auf das Alter zu ziehen, und bin mir bewusst, dass das sehr schwierig ist und dass wir insbesondere keine absoluten Angaben erwarten können. Ich möchte aber die Aufmerksamkeit auf eine Erscheinung lenken, die uns vielleicht in der Zukunft weiterhelfen könnte, und zwar denke ich an jene Stalaktiten, die sich in Kaskaden aufbauen. Dem Symposium liegt eine Arbeit vor, die sich mit diesen Vorgängen etwas genauer beschäftigt. Ich möchte nur darauf hinweisen, dass wir mit ziemlicher Sicherheit annehmen können, dass die Höhe des Tropfsteins mit der Zeit zusammenhängt, wenn auch keine lineare Zeitabhängigkeit vorliegt, und dass Abschnitte, die von einer zunehmenden Dicke zu einem Abnehmen führen, oder umgekehrt, bestimmt eine erhebliche klimatische Aenderung anzeigen.

Die Möglichkeiten, die Pollenanalyse in Höhlen vorzunehmen, ist bereits so eingehend besprochen worden, dass ich nichts Näheres darüber zu sagen brauche. Dasselbe gilt für die Methode, mit Hilfe von Kalzit und Aragonit Temperaturen zu bestimmen.

Ich möchte vielleicht hier nur einen Vorschlag anschliessen. Ich selbst habe in diesem Fall ja nur über die Arbeit von Moore referiert; vielleicht könnte es möglich sein, Moore, den wir von vielen anderen Veröffentlichungen kennen, und zu dem wir auch ein gewisses Vertrauen haben dürfen, die Diskussionsbemerkungen zugänglich zu machen, und vielleicht ist es ihm möglich, auf einige selbst zu antworten.

Zuletzt möchte ich noch besonders Herrn Prof. Tongiorgi für seine Ausführungen danken. Er hat uns ein sehr anschauliches Bild von Isotopenentmischungsvorgängen vermittelt, mit deren Hilfe es möglich ist, die Methoden zu korrigieren, besonders die Radiokarbon-Methode. Und ich denke, dass wir gerade in den Diskussionsbemerkungen von Herrn Prof. Tongiorgi eine sehr interessante Anregung empfangen haben, der nachzugehen sich lohnen würde. Er mache uns darauf aufmerksam, dass eine Abhängigkeit des Verhältnisses $o\ 17 / o\ 18$ — also Sauerstoffisotop 17 zum Sauerstoffisotop 18 — mit der Jahreszeit besteht, eine Abhängigkeit, die gross ist, die wir also gut messen können. Dadurch müsste sich eine Schichtung ergeben. Es müssten Schichten, entstehen, deren $o\ 17 / o\ 18$ — Verhältnis im Winter kleiner, im Sommer grösser wäre oder umgekehrt.

Vielleicht darf ich in Bezug auf Ihre Diskussionsbemerkungen, die sich auf Farbstreifen in den Schichten ergeben haben, noch ganz allgemein etwas aufmerksam machen. Wenn wir eine Sinterschicht untersuchen, dann können wir nur einen ganz geringen Teil der Erscheinung, die sich darin abgespielt haben, in einer sichtbaren Form erkennen. Wir sehen vielleicht einige Farbstreifen, gelb, rot oder braun, es sind aber bestimmt auch noch Schichtungen in diesen Profil enthalten, die wir mit freiem Auge nicht sehen können, die wir aber mit Messungen enträtseln können, und die vielleicht in gewissen Fällen viel interessanter wären als das, was man mit freiem Auge sieht, und was übrigens nicht immer eindeutig den klimatischen Voraussetzungen zuzuordnen ist. Ich denke gerade an die Schichtung, die sich durch die Verschiedenheiten des Verhältnisses $o\ 17 / 18$ ergeben müssten, und ich bin überzeugt davon, dass es noch eine ganze Menge anderer Verschiedenheiten gibt, die teilweise von der Zeit, teilweise vom Klima, teilweise von der Jahreszeit u. s. w. abhängen. Ich glaube, dass sich das Bild der Entwicklungsvorgänge und auch die Rückschlüsse, die sich auf die Zeit, auf den Klimagang u.s.w., ergeben, in einer sehr befriedigenden Weise vervollständigt würden, wenn wir möglichst viele dieser Dokumentationsvorgänge eindeutig untersuchen würden.

Vielleicht darf ich abschliessend bemerken, dass wir im Laufe des Symposiums auf noch etwas gekommen sind, das uns auch die Einschätzung dieser Datierungsmethoden zu verstehen hilft. Es wurde nämlich bemerkt, dass es vielleicht gar nicht immer der besondere Wert der erwähnten Methoden sei, mit ihnen Altersangaben zu gewinnen. In vielen Fällen können die Methoden auch dazu verhelfen, zu prüfen, ob jene Vorgänge, die ihnen zugrunde liegen, auch wirklich so verlaufen, wie wir uns das vorstellen. Also ist es durchaus ein positives Ergebnis, wenn wir eine Methode anwenden wollen, und sehen, dass sie unseren Erwartungen nicht entspricht und dass sie etwas ganz überraschend Neues bringt. Das ist immer der Beweis dafür, dass in unseren Vorstellungen ein Mangel besteht, und dass wir hier auf einen Vorgang gestossen sind, der vielleicht im Zug der hier behandelten Probleme besonders interessant ist.

Zum Schluss möchte ich noch dem Herrn Präsidenten und dem Organisationskomitee für die ehrenvolle Einladung und für die fruchtbare Zusammenarbeit danken.

Presidente NANGERONI:

Ringrazio il Dr. Franke della sua interessante relazione conclusiva, che è certamente la più complicata fra tutte perchè riassume teoricamente quello che si è detto dal punto di vista chimico, dal punto di vista meccanico e, naturalmente, dovrebbe poi concludersi con la parte biologica.

Ma io credo che sarebbe opportuno disporre adesso di 10 minuti per riposo; prendiamo dunque, come ha detto la signora Pasa: « Eine Zigarettenpause ».

Riprendendo, io prego il Prof. Gèze di riferire.

B. GÈZE

REMARQUES FINALES (après discussions)

Je tiens d'abord à remercier très vivement ceux de nos confrères qui ont bien voulu apporter leurs critiques et parfois leur approbation à mon exposé sur les rapports entre l'évolution karstique et les alternances climatiques quaternaires.

MM. Bögli, Ciry, Corbel, Mancini, Pasa, Tongiorgi, Trimmel, Trombe, Warwick et Mme Williams nous ont ainsi fait bénéficier du fruit de leur expérience. Je crois que nous devons tous leur en être reconnaissants.

Je ne répondrai pas directement à chacune des observations, mais je chercherai à présenter mes réponses, ainsi que les réflexions et compléments auxquels j'ai été conduit par ces observations, d'une façon méthodique, aussi logique que possible. Bien entendu, la discussion ne sera pas close ainsi et je souhaite au contraire qu'elle puisse se développer dans l'avenir.

1. J'insiste encore beaucoup sur le fait que les schémas plus ou moins cycliques qui ont été proposés ne doivent être considérés que comme des images devant lesquelles réfléchir, mais je serais absolument désolé qu'on les prenne trop au sérieux!

2. Volontairement, la période des sinusoides dessinées n'a pas été définie car j'estime qu'on la connaît très insuffisamment. Il ne s'agit d'ailleurs certainement pas de sinusoides vraies, mais de courbes irrégulières, présentant des points hauts et des points bas avec de nombreux crochets de détail (par exemple les épisodes Würm I, II, III au lieu du seul maximum de la glaciation dite würmienne). L'égalité de distance entre maximums et minimums est également douteuse: j'ai dit que, suivant toute probabilité, les périodes de déglaciation progressive ont dû être plus longues que les périodes de début de glaciation.

Je me suis très largement inspiré des courbes classiques de G. C. Simpson (basées sur les variations du rayonnement solaire), qui ont l'avantage d'être très schématiques et de conserver une valeur figurative quelle que soit la cause initiale invoquée pour les alternances climatiques. Par contre, j'ai évité de me rattacher aux courbes calculées du type de celles de Milankovitch car j'estime que, malgré leur très grand intérêt, leur apparente rigueur masque tout ce qu'elles ont de théorique. Il faut d'ailleurs avouer qu'elles ont peu dirigé les recherches et qu'on les a au contraire souvent retouchées pour les faire « coller » avec les observations de terrain. De plus, il est permis de leur adresser une critique grave: si nous ignorons évidemment la valeur de leur prolongement dans l'avenir, nous savons que dans le passé, avant les glaciations quaternaires, elles se montrent inexactes. L'éventualité de phénomènes glaciaires pendant la période de passage du Pliocène au Quaternaire demeure douteuse et nous sommes assurés qu'il n'y en a pas eu dans nos régions pendant tout le Tertiaire, où régnait au contraire presque constamment un climat subtropical (températures moyennes en France de 25° à l'Eocène, 22° à l'Oligocène, 18° au Miocène, 14° au Pliocène, pour 11° à l'époque actuelle).

3. Il a été fait allusion, au cours de ce symposium, à l'existence de glaciations anté-quaternaires, qui auraient pu jouer un rôle dans les évolutions karstiques anciennes. A vrai dire, on ne connaît bien que celle de la base du Cambrien (nette en Scandinavie et au Groenland, mais mentionnée en Normandie, Ghana, Togo, Congo, etc.) et celle du Permo-Carbonifère (reconnue surtout en Afrique du Sud, Inde et Australie). Il est presque certain qu'il n'y en a pas eu d'autres avant le Quaternaire, cette période étant

donc la seule, en définitive, pour laquelle nous ayons quelques précisions quant aux alternances climatiques et à leurs effets sur l'évolution karstique.

4. Je n'oublie pas cependant l'existence de cavernes antérieures au Quaternaire, non seulement pour les grandes cavités des régions tropicales dont le creusement a pu commencer il y a fort longtemps, mais même pour celles de nos régions. Je l'oublie d'autant moins que j'ai personnellement étudié des grottes du Pliocène (Languedoc), de l'Eocène (gouffres à phosphorite du Quercy et du Bas-Languedoc), du Crétacé (gouffres et lapiaz comblés par les bauxites du Languedoc et de Provence), du Dévonien supérieur (avec comblement du Carbonifère inférieur dans la Montagne Noire et les Pyrénées orientales). Pour ces cavités, il y a eu non seulement creusement mais aussi quelquefois remplissage par des concrétions qui ne sont donc évidemment pas une particularité du seul Quaternaire.

Je considère cependant l'étude du Quaternaire comme particulièrement importante puisque, ainsi que je l'ai dit, c'est à cette période que nous devons rattacher la genèse et l'évolution de la majorité des grottes que nous explorons en Europe occidentale tout au moins.

5. G. Warwick a signalé qu'en Angleterre il n'y a pas de concrétions près des entrées de cavernes. Ce caractère est incontestablement vrai dans les régions de climat assez frais, mais inexact dans les régions chaudes: comme je l'ai souligné, le concrétionnement paraît d'autant plus intense que l'on a affaire à un climat humide plus chaud, donc plus évaporant. Le climat tropical humide à saisons alternantes, qui conditionne la genèse des latérites, favorise les larges concrétionnements carbonatés. Nous en avons la preuve dans le Quercy à l'Eocène, actuellement au Mexique, au Gabon, au Siam, etc. où les stalactites et revêtements stalagmitiques sont abondants non seulement dans les grottes, mais aussi aux entrées et jusque sur les parois des gorges à l'air libre.

6. Il demeure un problème délicat à résoudre en ce qui concerne le creusement des cavernes dans les régions plus ou moins glacées. Le pergélisol (tjäle) empêche incontestablement l'érosion souterraine, sauf dans le cas relativement limité des grottes « cutanées » (R. Ciry). Cependant, au-dessous de la glace peuvent s'accumuler du gaz carbonique et de l'eau libre (F. Bauer et F. Trombe) dont l'action corrosive sur le calcaire peut être intense. En outre, les travaux récents de l'Electricité de France pour des implantations de barrages dans des vallées alpines considérées comme franchement glaciaires ont démontré dans de nombreux cas la présence, sous un comblement alluvial récent, d'une gorge étroite et profonde, en V très aigu, au-dessous de la classique vallée en U. Une importante érosion linéaire, certainement torrentielle, a donc pu se réaliser au-dessous des langues glaciaires.

Les conditions paraissent ainsi variables et il convient de nuancer nos affirmations. Sans doute, en période glaciaire très froide (pas d'eau libre possible) le creusement karstique est-il totalement bloqué. Avec un léger réchauffement superficiel, l'eau peut travailler sous la glace. S'il y a pergélisol (régions récemment libérées de leur calotte glaciaire), les grottes cutanées seront seules possibles. S'il n'y a pas pergélisol (glaciers de montagne mais non calottes), le creusement karstique pourra au contraire se montrer extrêmement important.

7. Il n'est d'ailleurs pas certain qu'il faille mettre sur le même plan chronologique les glaciers du type inlandsis et les glaciers alpins. Les premiers semblent nécessiter un froid assez général après une période très humide. Au contraire, il demeure possible, comme certains auteurs l'ont écrit, que les seconds se soient plutôt développés pendant des périodes assez chaudes, sous réserve de l'existence de hautes montagnes sur lesquelles la neige fournissait abondamment la matière première du glacier: la langue glaciaire n'aurait pas eu le temps de fondre en totalité même en arrivant dans des vallées franchement chaudes. L'exemple actuel des Alpes de Nouvelle-Zélande est typique à cet

égard: à 300 m d'altitude on voit encore les dernières coulées du glacier François-Joseph serpenter au pied des hautes fougères tropicales.

Il est donc bien certain qu'il faut tenir le plus grand compte du type de climat qui au même instant peut être continental (sec) ou océanique (humide) suivant la région considérée, de même qu'il peut être chaud en plaine et froid en montagne. Bien certainement, les cycles schématisés sont très souvent faux. On a affaire à des épisodes tantôt froids et tantôt chauds ou plutôt tantôt humides et tantôt secs, avec glace ou sans glace, alternants, mais sans que ces alternances soient partout synchrones.

8. Le facteur biologique dans le concrétionnement est certain dans bien des cas, mais sans le minimiser nous dirons que c'est un facteur « second » puisqu'il dépend du climat. Les microorganismes et les plantes ont en effet besoin d'un minimum d'eau et de chaleur, ce qui ne fait que confirmer que les concrétions se développent surtout pendant les périodes humides et chaudes, pas dans les sèches et froides. J'ai vérifié moi-même une observation de J. Corbel suivant lequel il n'y a presque pas de concrétions en Europe septentrionale: dans la grotte de Grönli, près de Mo-i-Rana (Norvège), à quelques kilomètres du cercle polaire, sur plusieurs centaines de mètres de galeries je n'ai pas vu un centimètre cube de calcite!

Le calcaire dissous en grande abondance par les eaux froides chargées de gaz carbonique est entraîné à l'extérieur et va jusqu'à la mer où, d'après ce que nous savons, il n'y a même pas de sédimentation calcaire sur place. En règle générale, ce n'est que dans les régions assez chaudes que celle-ci se produira, aussi bien pour les dépôts marins que pour ceux que j'ai mentionnés sur terre (calcaires lacustres, travertins, tufs de sources, croûtes calcaires d'origine plus ou moins franchement pédologique) ou sous terre (concrétions). Les facteurs biologiques et les facteurs climatiques agissant directement concourent au même résultat.

9. Nous ne sommes cependant pas encore en mesure de préciser avec certitude les nuances de climat nécessaires pour la genèse de chacun des types de concrétionnement. La discussion qui a eu lieu au sujet de l'aragonite le prouve bien: minéral caractéristique des climats chauds (plus de 16°) pour les uns, apparaissant à n'importe quelle température sous réserve des possibilités d'évaporation rapide pour les autres (dont moi-même).

Je citerai encore un autre cas, celui du mondmilch, que bien des auteurs étudient maintenant (en particulier R. Bernasconi au cours du présent symposium). On avait proposé sa genèse sous climat froid et même glaciaire (F. Trombe), mais nous en avons trouvé en abondance dans des grottes chaudes et qui n'ont certainement jamais été glacées (en Bas-Languedoc et Provence notamment, ainsi qu'en Italie méridionale). Il est d'ailleurs nécessaire de nuancer toute affirmation à son sujet car sa nature minéralogique est fort peu définie: ce n'est qu'un faciès de minéraux très variés (1). Ainsi, les échantillons de mondmilch que j'ai recueillis entre 1955 et 1960, et que Melle Th. Pobeguïn a soigneusement étudiés, appartiennent aux espèces suivantes: calcite, aragonite, dolomite, huntite, hydromagnésite, nesquéhonite, giobertite, gypse, phosphate tricalcique, phosphate d'alumine. Evidemment ces divers mondmilch, qu'ils soient dus à une genèse directe ou à des phénomènes d'évolution d'origine physico-chimique ou biologique (V. Caumartin et Ph. Renault) pourront présenter des optimums de développement sous des conditions climatiques très différentes les unes des autres.

En conclusion, je recommande encore la prudence dans toutes les interprétations que pourrait susciter mon essai de synthèse. Mon but aura été atteint s'il sert d'« idée de manœuvre » pour des recherches systématiques. Je suis en tout cas extrêmement heureux qu'avec l'appui efficace du professeur Tongiorgi il en découle déjà la pro-

(1) Voir B. Gèze - Etat actuel de la question du mondmilch, Congr. nat. de Spéléo., Marseille, 1960, Spelunca (4^e Série), Mémoire n. 1, p. 25-30.

position de créer une Commission Internationale de Spéléochronologie qui sera dans un instant soumise à vos suffrages.

J'ai enfin un plaisir particulier à remercier chaleureusement notre Président, le professeur Nangeroni, ainsi que notre actif Secrétaire Général, M. Salvatore dell'Oca, qui dans le cadre de ce symposium si remarquablement organisé, m'ont donné l'occasion de présenter mes modestes réflexions devant un auditoire tout spécialement choisi.

Presidente NANGERONI:

Ringrazio molto il Prof. Géze per le sue espressioni ultime e per le delucidazioni date in rapporto alla relazione. Mi permetto di sottolineare il problema della sedimentazione concrezionare all'esterno delle grotte su cui il Prof. Géze ha insistito molto. Vorrei aggiungere brevemente un'altra cosa; siamo in periodo in cui i ghiacciai regrediscono molto; questi ghiacciai qualche volta coprono delle superfici calcaree, quindi sarebbe molto utile che, chi si interessasse del problema glaciologico si interessi anche, quando si porta sui ghiacciai in regioni calcaree, dei rapporti tra glaciazioni e carsismo.

Prego il Prof. Warwick di riferire sopra il problema di paleometeorologia connesso ai riempimenti naturali di grotte.

WARWICK:

Illustre presidente, ladies and gentlemen, I would first of all like to say a few words concerning the contributions which were made after my own review and then to make a few additions of my own and a few general remarks. I will not keep you too long, I hope. First of all I would like to extend my thanks to my friend Jean Corbel for extending and particularizing some of the ideas that I expressed. I am specially grateful for his greater precision regarding the morphological effects of climate in different limestone regions. I would also like to thank M. Tintant, acting as the spokesman, for that happy team from Dijon under the leadership of M. le Doyen Ciry, for his valuable factual information concerning the dating of the fossil cave systems of Burgundy, which I hope to visit one day. He presented his case with admirable brevity and showed what can be achieved and what may be safely inferred from the direct evidence available.

Speaking from my experiences in extremely glaciated limestone areas I am only too conscious of the fact that melt waters have washed out a great deal of the evidence that might have been obtained from cave deposits. In some areas, heavy glacial erosion has probably swept away caves well as their deposits, for example in Sutherland, N. W. Scotland. I was very careful never to use the word varve in dealing with lake deposits and I noticed the same caution observed by M. Tintant. If we can prove they are varves we may be able to obtain a dating for them, or at least a relative dating as was done in Sweden with surface varves. Such relative dates might be tied in with other geological events whose age has been established by more absolute methods. The cases I quoted from Britain, can be definitely associated with the specific advances of specific ice sheets. A further matter in this respect: I know colleagues from the Geophysics department in my own University, would be very pleased to hear of any dated deposits of this character, especially if they contained ferruginous material. They are very interested in the question of the orientation of such matter in their studies of paleomagnetism, a subject which I do not think has been mentioned as yet, but I am sure will be in the future, as it is already studied in connexion with surface archaeological sites. When the cycle of changes in the magnetic declination is known with greater precision than at present, a determination of the orientation of ferruginous material in a water-lain deposit may enable one to obtain a rough dating for it. That is theoretical and for the future, but it has been

applied in allied studies and we hope may come to be used on cave sediments.

I was very pleased also that Prof. Bögli should take me up over a matter I had not covered: the field is extremely large and I'm only too conscious myself having read so much in the last few weeks, how much I do not know in this respect, and I really thank him for drawing attention to this matter of colour of cave formations. I was very conscious though, at the end of his discourse, that even he doesn't seem to be quite clear as yet what conclusions are to be drawn from his observations. I think we have all too often attributed differences of colouration to different minerals, as do cave guides, but we have not considered what effect climatic change has played in this respect. Certainly there is some evidence published, which I did not have time to discuss, which bears on this point. Brain for example, working in South Africa established a relationship between the colour of soils derived from dolomitic sand, and the amount of rainfall experienced as well as the temperature. Such soils contributed to the cave-fills in the Transvaal and from changes of colour, supported by other evidence temperature and precipitation changes could be inferred from those deposits. When we come to discuss the question of lateritic soils, the question there of distribution of the rainfall is of great importance. As many know it is now considered by most pedologists and geologists that true laterite requires a marked dry season for its full development and I noted in reading Professor Géze's paper on the phosphatic deposits of Southern France, how careful he was to refer these deposits to near-lateritic conditions. Thus in considering past climates we must take into account precipitation as well as temperature.

In considering reports on the colouration of deposits, especially casual ones, there is the difficulty of comparability. The visual assessment of colour requires considerable training and the only scientific method is to use a standard colour chart such as the Munsell colour chart used by soil scientists.

I was very pleased to hear the contributions by Prof. Mancini, especially of the difficulties that may come in interpretation. I think we can, of course, overemphasise these, so much so that we might have a nihilistic approach and say that there are too many possibilities to make any worth-while generalisations. At the same time we must bear in mind, as Professor Mancini said, external micro-climates which can affect local soil development, and consequently, the allocthenous deposits in caves. This is aptly illustrated by the conditions in *dolines* cited by Mancini, especially as soil materials developed in these landforms often reach underground cavities in greater quantities than comparable material from flatter surfaces.

In this connexion I would just like to mention some unpublished work from Britain which raises a further complication of this character. That is some work done in South Devonshire in the cave area where on one hill side, on the sunny side, a typical, temperate, limestone soil, or *terra fusca* was developed; but on the other side of the hill, away from the sun, a *rendzina* soil was found. That was on the same rock so that when one gets these complications that derive from the soil, we see how difficult it may be to make a correct diagnosis, though of course some of the difficulties may be eliminated by checking the nature of variations in the present surface soils.

I should to add one small observation of my own concerning some of the complications to be found in soils in limestone regions, taken from central Italy, near Fiuggi. Here on the western edge of the Sabine Hills, to the east of Rome, volcanic ash is scattered over the limestone, but far from evenly. The process of hill wash — some of it no doubt induced by man's ill-usage of the soil — has concentrated this material in the large enclosed basins to be found here, such as that of Fiuggi. This material often contains organic material from the soils developed on the ash and is darker in colour than the parent material. Below limestone cliffs or free-faces, there is abundant free limestone in the soil, and on gentler slopes where the ash has been removed normal

terra rossa soils may be encountered. Thus at least four different types of residual material is available for transportation into underground cavities in one small area under the same climatic conditions. Anyone who has read any of the literature on *terra rossa* soils will be aware of the complications which exist in that group without introducing considerations of additions of volcanic ash, to which Prof. Mancini drew our attention.

From M. Guy de Lavour, we had one of his typical communications, so modestly presented, but a beautiful example of factual observation, with all the relevant data supplied, not necessarily giving an answer, but certainly posing a question relative to our enquiry. Concerning M. Dubois I have spoken to him subsequently and in fact we are in agreement; I think there was a little discrepancy here in the translation. I say this with no disrespect to our translators who have done a magnificent service. I did not intend to say that the *Grotte Casteret* was in any way eroded by the actual ice, but to point out in those cold conditions, the contrast between the very strong frost shattering of the rocks at the entrance with the calm cold conditions with no freezing and thawing constantly taking place inside. In the vestibule large blocks occasionally fall from the roof in strong contrast with the smooth walls showing no signs of frost action in the interior.

In answer to M. Siffre, I thought that I had made it clear that deposits were also being studied in the interior of caves. In fact the lacustrine deposits from *Agen Allwedd* are about half a kilometre from the entrance. There are some 14 Km. of passages in that cave and I have somewhere resting on a table or packed up in a box (as my institute is moving) a series of deposits collected for me from that point. I'm sure there are many other people who are taking samples from the interiors of caves. This is not forgotten, but it is the dating of them and the relating of such deposits to external conditions which is so difficult. It is in the external threshold zone that we've got so much evidence from other speakers. Prof. Liègeois has drawn our attention to a study of ferruginous deposits, and in this connexion I can add to the list of substances forming moonmilk made by Prof. Gèze, namely limonitic moonmilk, to be found in some of our Yorkshire caves. I think that these deposits are produced in part at least by bacterial action, as mentioned by my fellow-countrywoman, Mrs Williams. Iron bacteria may be found in some British caves, especially those near to the surface in areas with boulder clay overlying the limestone, giving rise to acid conditions and the formation of peat deposits. Some of the limonite formed under such conditions flows in a semi-liquid state into underground cavities, forming a horrid-looking deposit, which may subsequently lose much of its aqueous content and harden. Mrs Williams has also reminded me of an exception to the rule about cave formations not being active in cave entrances in Britain to-day. This is in *Ogof Ffynnon* (the Cave of the Spring), in South Wales; marks which she made in collecting moonmilk for laboratory investigation, were found to be covered over one year afterwards. It is perhaps notable that this is taking place in the relatively warm oceanic sector of Britain in the area with the greatest precipitation (some 80 inches per annum) which is experienced in our limestone regions. Conditions possibly comparable with those of Atlantic time further inland.

After reading some of the literature on cave deposits and listening to the work described at this conference, I am convinced that no longer can we afford to work on our own, within the limits of our own field observations and our own national literature. The suggestion of Prof. Tongiorgi has come at a very opportune time. We now have quite a lot of information, though much of it remains unknown and unassessed. Basic facts are essential to our purpose, but on their own they are not so valuable as when they are considered together and tentative conclusions drawn from them which can be tested by further observations. In order that observations can be compared from different sites more precise information will be required, under the controlled conditions which have been stressed from time to time during our meetings. Ideally each cave site requires the attention of a team of specialists but this is impracti-

cable, though perhaps pairs of scientists, trained in different fields, could provide a compromise solution to this problem. Already in many countries archaeologists co-operate with other scientists in order to gain more information about the conditions in which man lived in the past. When information has been obtained and conclusions drawn, there remains the problem of communication. In our particular field, this symposium will have achieved a great deal in this respect and in reading the published proceedings I am sure that we shall gain a great deal of information concerning work carried out in other countries besides our own. This should stimulate further work in order to test hypotheses originated here and also to catch up with those countries which have maintained a lead in the study of cave sediments. I think too that we have reached a stage where it would be most valuable to have a summary of the evidence and the conclusions to be drawn from this evidence for each country. Excellent examples of such studies have been published in Czechoslovakia and Switzerland to serve as models. This would avoid a great deal of digesting of scattered papers and enable comparisons to be made more easily between one country and another. It would also help in the interpretation of deposits laid down under different climatic conditions in the past if such summaries could be published for countries covering a wide range of present-day climatic conditions.

It is not only in the field of cave sediments that climatic considerations must be taken into account. In Archaeology, Geology, Geomorphology, Palaeobotany, to mention only a few fields of study; changes of climate, and especially those of the Pleistocene Period, are being most intensively studied. Some of the techniques used are so specialised, that once again scientific co-operation is required, and there already exists the International Association of Quaternary Research and in some countries special research institutes have been founded, often under the wing of one of the older scientific disciplines. Thus at the University of Cambridge, England, there is a Sub-Department of Quaternary Studies in the Department of Botany, and in Italy Professor Tongiorgi's Institute carries out similar co-operative work. Again Van der Vlerk in a recent William Smith lecture to the Geological Society of London stressed the use of evidence for climatic change in Quaternary stratigraphical studies. Conclusions drawn from all this activity will have to be applied to the study of cave sediments and in turn, the evidence from cave sediments will have to be considered by others interested in Quaternary studies.

Finally, like the other *rapporteurs*, I would like to express my thanks to Prof. Nangeroni. Speaking of him to my Italian friends, he is always described to me as a man without an enemy. All the world loves Nangeroni, especially his old pupils and his colleagues — a reputation which is all too rare in the academic world! I think it is very obvious to us here and I think that his influence has quietly been spread around. We come from many different countries, of many different political backgrounds and the contrast between this meeting and that of the United Nations is very great. I think that a great deal of this we owe to Prof. Nangeroni. That does not mean of course that his own scientific contributions have been any the less. He has certainly been giving us constantly, the fruits of his own experience within the bounds of his position and I would like to thank him most wholeheartedly and hope that he doesn't get taken to New York to help them out though he certainly would make a good job of it. Thank you.

Presidente NANGERONI:

Il Prof. Warwick è stato veramente troppo buono con me; però ha detto una frase molto giusta. Ha detto che ho avuto del grande coraggio, e il coraggio consiste in questo: nell'aver accettato la presidenza del symposium. Ringrazio delle sue relazioni e delle conclusioni che fanno di grande prudenza oltre che espresse con grande delicatezza e, scusate se aggiunto, con gradevole humour veramente britannico. Prego il Prof. Pasa e la Signora Pasa di riferire sopra le conclusioni della sua relazione: ri-

cerche paleobotaniche applicate ai depositi di riempimento delle grotte.

PASA:

Il campo delle ricerche paleobiologiche più che un apporto diretto allo studio della morfologia e della costituzione di un sedimento, è atto a fissare singoli punti ben documentati sulle condizioni paleoclimatiche nelle quali i depositi si sono formati.

I nostri dati più sicuri sono accentrati nella zona vestibolare delle grotte e penetrano nel profondo di esse con pochi elementi studiabili, come i chiroterri e in un domani, forse, la ricerca batterica.

Indubbiamente il contributo della ricerca chimica e di quella fisica potrà colmare le lacune esistenti tra i nostri risultati, tracciando una più continua catena di elementi nel campo della paleoclimatologia.

Vorremmo però consigliare sempre estrema cautela nella estrapolazione dei dati, considerando due fattori importanti e poco noti della circolazione idrica ipogea. Primo: il tempo e il modo con i quali le acque circolano nelle rocce (velocità di discesa, movimenti obliqui, risalita per capillarità); secondo: l'influenza del fondamentale elemento della copertura, rappresentato: dal suolo e dalla sua complessa biologia.

Sempre più chiaramente appare impossibile rinchiudere il campo della ricerca speleologica nell'ambiente ipogeo senza tener conto di tutto l'ambiente circostante.

Presidente NANGERONI:

Caro Pasa. Noi abbiamo sentito le tue parole ieri, abbiamo valutato molto il senso scientifico e soprattutto la grande prudenza per quello che riguarda il fatto datazione dei pollini e degli elementi paleo — zoologici; il che rappresenta veramente la tua grande sensibilità nel campo scientifico e soprattutto la grande prudenza vorrei dire, cioè, quello che veramente è la scienza: il continuo dubbio, sempre con una base di sicurezza apparente, ma sempre col dubbio di non aver detto la verità e quindi di poter procedere poi in seguito per arrivare poi possibilmente, non diciamo a quello che è la verità, perchè non so come si possa arrivare a questa grande cosa, ma perlomeno a qualche lato, a qualche cosa inerente ed aderente alla verità. Quindi grazie caro Pasa e questo battimani è veramente per te e per quello che tu hai saputo dire ed hai saputo fare ieri ed oggi.

Loro sanno che in seguito agli interventi del Prof. Tongiorgi, si è riunito un gruppo di rappresentanti delle singole nazioni per vedere di arrivare a quello che è stato detto da qualche relatore, arrivare cioè a qualche cosa di conclusivo sotto l'aspetto internazionale, sempre in rapporto ai problemi della datazione. Mi permetto leggere la risoluzione di questa riunione. « **I partecipanti al symposium internazionale di speleologia, riuniti a Varenna dal 3 al 6 Ottobre 1960, constatato che pur essendo stato fatto nei vari paesi un notevole lavoro descrittivo sulla genesi e sui riempimenti delle grotte, i dati relativi alla cronologia dei diversi fenomeni, sono tuttora molto scarsi. Considerato che manca una raccolta sistematica, una unità di criteri ed una analisi critica per i dati ottenuti fino ad oggi e che di conseguenza questi non possono servire come base sufficiente per gli studi della distribuzione nello spazio e nel tempo dei fenomeni connessi con l'origine e i riempimenti delle grotte, riconoscono la necessità di promuovere un piano di collaborazione per unificare e coordinare il lavoro di tutti coloro che in qualsiasi modo possono contribuire alle ricerche di speleocronologia. Delibera a tal fine di dar vita ad una commissione internazionale di speleocronologia i cui scopi vengono così definiti: 1) promuovere le ricerche sulle datazioni assolute o relative ottenibili con metodi diversi: fisici, chimici, geologici, biologici, archeologici ecc. sulla genesi e sul riempimento delle grotte; 2) curare la raccolta, l'unificazione, la coordinazione e la pubblicazione di tutti i dati di speleocronologia;**

3) di coordinare gli studi diretti a confrontare i risultati ottenuti per le diverse regioni e quelli ottenuti per le grotte ed in superficie in una stessa regione. A tale scopo una commissione provvisoria comprendente i delegati dei seguenti paesi: Austria (TRIMMEL), Belgio (LIEGEOIS), Cecoslovacchia (SKRIVANEK), Francia (GÈZE), Germania (HERMES), Inghilterra (WARWICK), Italia (NANGERONI), Jugoslavia (PRETNER), Polonia (BURCHARD), Portogallo (FERREIRA), Svezia (TELL), Svizzera (BOEGLI) Ungheria (JAKUCS), ha designato quale segretario generale provvisorio il Prof. TONGIORGI di Pisa e lo ha incaricato di promuovere l'esecuzione del programma su indicato, decidendo che la composizione definitiva della commissione e dei suoi organi, sarà fissata nel prossimo congresso internazionale di speleologia ». Io prego voi, se credete opportuno, approvare questa risoluzione che a noi, evidentemente, sembra molto adatta al momento come conclusione, come i relatori hanno sottolineato. Quindi io pregherei quelli che accettano questa risoluzione di alzare le mani.

Grazie. Vi è l'unanimità, quindi questa risoluzione viene approvata.

Prego il Prof. Trimmel di riferire sopra quello che riguarda l'invito per il congresso speleologico di Vienna.

TRIMMEL:

Herr Präsident, meine Damen und Herren! Ich möchte die Gelegenheit benützen, zunächst persönlich, aber auch im Namen der anderen österreichischen Teilnehmer für die Möglichkeit zu danken, an diesem so erfolgreichen Symposium teilzunehmen und uns einen Ueberblick über die augenblicklich dringendsten Probleme in den Fragen der Höhlensedimente zu verschaffen. Wenn ich jetzt noch zum Schluss das Wort ergreife, so allerdings nicht nur deshalb, sondern vor allem, um zum Ausdruck zu bringen, dass uns dieses Symposium viele Anregungen für die weitere Arbeit gegeben hat und uns auch gezeigt hat, wie notwendig es ist, den internationalen Kontakt bei unseren Arbeiten weiterhin aufrecht zu erhalten.

Und gerade deshalb möchte ich die Gelegenheit benützen, die Teilnehmer an diesem Symposium, die ja fachlich besonders dazu berufen sind, zur Teilnahme am nächsten Internationalen Kongress für Speleologie einzuladen, dessen Organisation wir in Oesterreich übernommen haben, und der in ungefähr einem Jahr, im September 1961, abgehalten werden wird.

Soweit Sie das erste Rundschreiben dieses Kongresses schon bekommen haben, werden Sie daraus entnehmen können, dass wir in gewissem Sinne die Entwicklung, die durch dieses Symposium eingeleitet wurde, bereits vorausgeahnt haben, denn einer der Themenkreise, den wir zur besonderen Berücksichtigung bei diesem internationalen Kongress vorgeschlagen haben, beschäftigt sich mit speleochronologischen Problemen. Wir werden uns in Oesterreich freuen, wenn Sie von dieser Einladung zur Teilnahme an den Kongress recht regen Gebrauch machen.

Presidente NANGERONI:

In questo modo il congresso dal punto di vista scientifico è ultimato. Ripeto, ringrazio vivissimamente, non solo i relatori principali che hanno introdotto gli argomenti, ma anche quelli che sono intervenuti con la loro esperienza particolare e personale.

S O M M A R I O

Presentazione.	pag.	3
Seduta Inaugurale	«	9
F. TROMBE: Sediments d'origine chimique dans les grottes	«	11
Seconda Seduta	«	51
P. RENAULT: Problèmes physiques en relation avec les remplissages des grottes	«	52
Terza Seduta	«	83
H. W. FRANKE: Datierung der Hoehlsedimente	«	83
Quarta Seduta	«	111
B. Géze: L'évolution karstique dans ses rapports avec les alternances climatiques quaternaires	«	111
Quinta Seduta:	«	127
G. T. WARWICK: Cave deposits and paleoclimatology	«	127
Sesta Seduta	»	153
A. e M. V. PASA: Ricerche paleobotaniche e paleozoo- logiche applicate ai depositi di riempimento nelle grotte. Metodi e risultati	»	153
Seduta conclusiva	»	167

