

Spelunca

ISSN 0249-054

Mémoires N° 14

ÉCOLE FRANÇAISE DE SPÉLÉOLOGIE

28, quai Saint-Vincent - 69001 LYON

BIBLIOTHÈQUE

N° 003324



FEDERATION FRANCAISE DE SPELEOLOGIE



FFS013700

Actes du XVI^e Congrès
national de spéléologie
(NANCY-METZ 1985)

ORGANISATION DU XVI^e CONGRES NATIONAL SPELEOLOGIQUE DE LA FEDERATION FRANÇAISE DE SPELEOLOGIE

Organisé par la **Ligue Spéléologique Lorraine (LISPEL)** - Cité des Sports - Nancy Thermal - 54000 NANCY

Coordination Générale: Daniel PREVOT, Pierre FEVE, Dominique LECORCHE et François ROCHE

Trésorerie : Jean SCAPOLI

Autres membres du comité d'organisation : voir plaquette du Congrès

les 4 clubs de la région de Nancy directement engagés dans la réalisation du congrès.

(U.S.A.N. : Union Spéléologique de l'Agglomération Nancéienne - G.S.L. : Groupe Spéléologique de Laneuveville - A.S.S.Ca : Association Spéléologique de Sauvegarde des Cavités - S.M.-ALLAST : Spéléos Miniers de l'Allast.)

LA SPELEOLOGIE EN LORRAINE

Sommaire de la plaquette Congrès : Spéléo L n° 15, spécial, 63 p., éd. LISPEL (Ligue Spéléologique de la Lorraine) - F.F.S. 1985.

• Editorial	p. 5
• Spéléologie minière.....	p. 9
• Réseau de Debain (départ. 88).....	p. 30
• Programmes Karsto-Bio-Archéo du 16 ^e Congrès F.F.S.....	p. 31
• Programme Rassemblement National du 16 ^e Congrès F.F.S.....	p. 34
• Karstologie lorraine.....	p. 35
• Biospéologie de la Lorraine.....	p. 47
• Topographies : départements 55-57.....	p. 54
• Archéologie préhistorique Lorraine en milieu souterrain.....	p. 57
• Grotte du Chaos.....	p. 62

COLLOQUES SCIENTIFIQUES

Coordination : Jean-Paul FIZAINÉ - Daniel PREVOT

Archéologie : (Université de Nancy II) Gérard AIMÉ - Pierre FLUCK

Biospéologie : (Université de Nancy I) J. CHAUVIN

Karstologie : (Université de Metz + Centre d'Etudes Géographiques).

Journées Internationales de Karstologie organisées en souvenir de Jean CORBEL.

Organisation : (Université de Metz) Michel SARY, Jeanine CORBONNOIS, Patrice GAMEZ.

SPELUNCA MEMOIRES N° 14

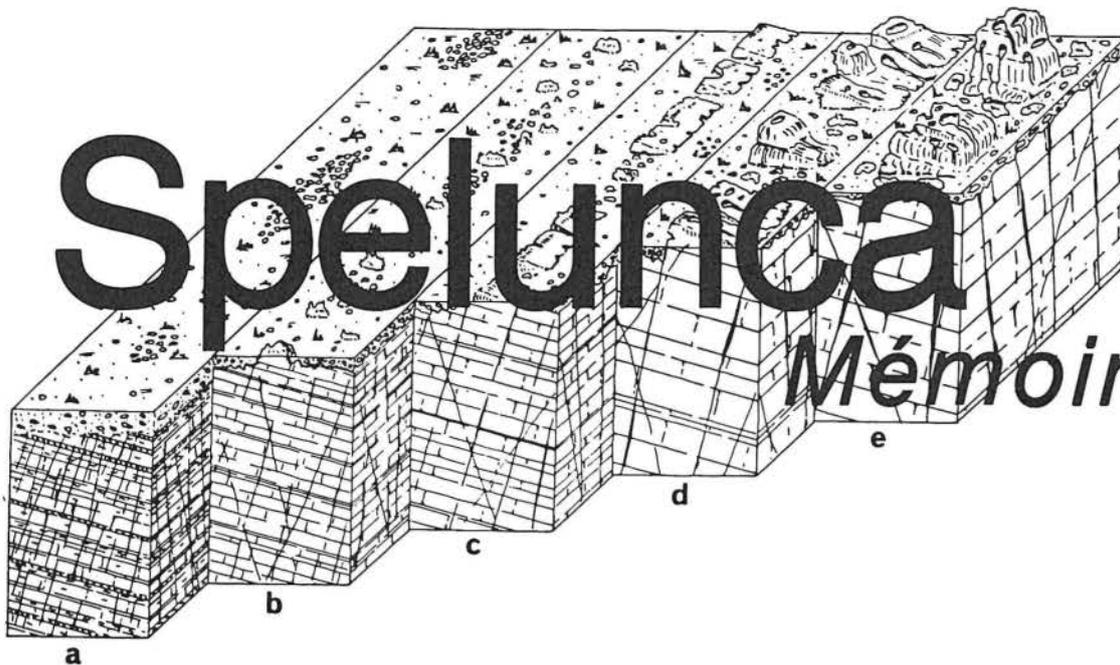
**Actes du XVI^e Congrès National Spéléologique de la F.F.S. et des
Colloques Scientifiques Archéologie - Biospéologie - Karstologie**

- . **Edition :** F.F.S. - LISPEL - Université Metz-Nancy (Dpt.Géographie) - Association Française de Karstologie
- . **Responsable de la publication :** Gérard COLLIN - Rédacteur : Philippe DROUIN
- . **Conception de la maquette :** Bernard BORDIER - Réalisation Philippe BERNARD - Coordination : R. LAURENT
- . **Photocomposition :** TEXTO à Gagnac (31)
- . **Imprimerie :** IMPRIMATIC Lyon 4^{ème}
- . **Dépôt légal :** 1^o trimestre 1988.
- . ISSN 0249-0544

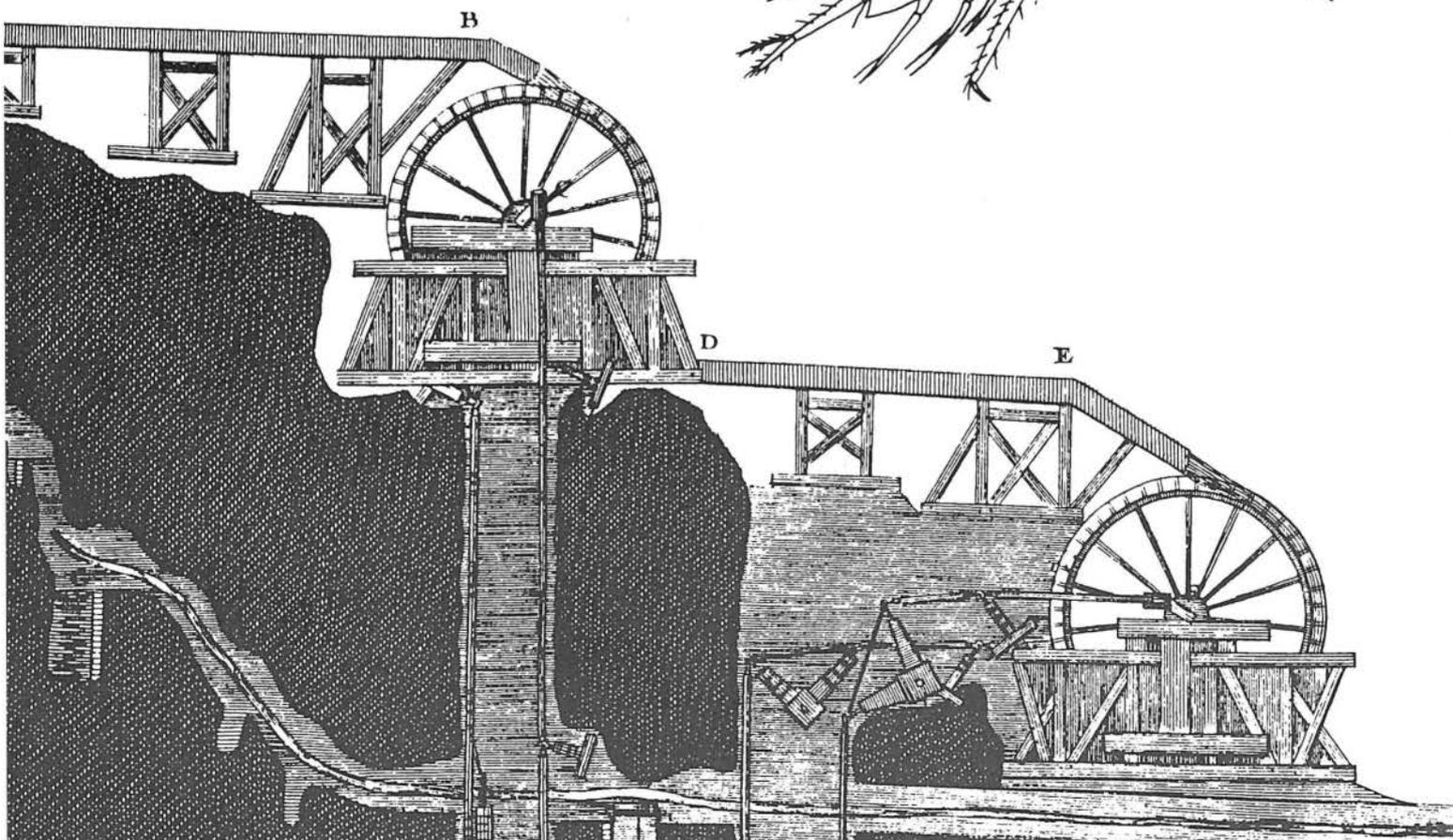
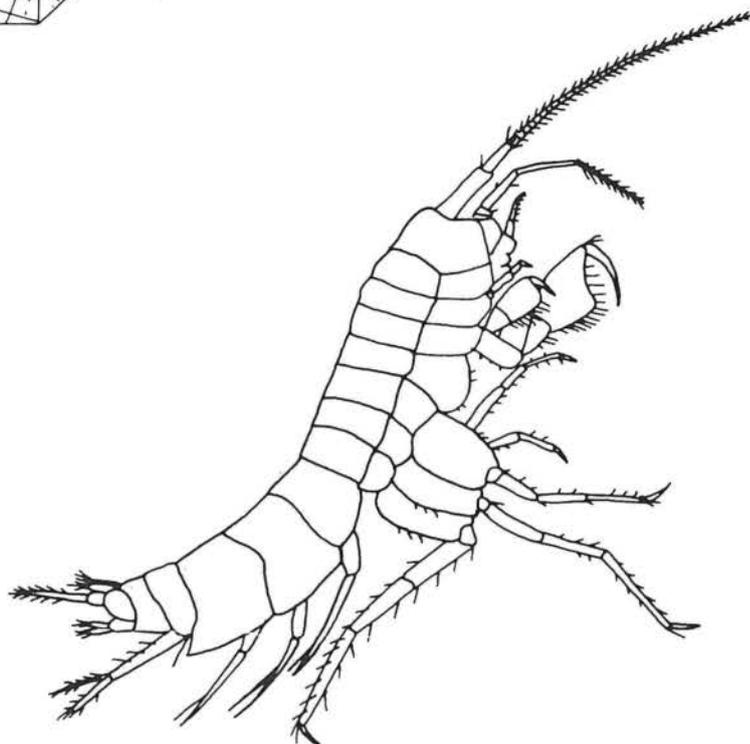
Photo de couverture
RUPT du Puits (Meuse) -
Cliché F.M. CALLOT

Spelunca

Mémoires N°14



**ARCHEOLOGIE
BIOSPEOLOGIE
KARSTOLOGIE**



**ACTES DES COLLOQUES DU
XVI^e CONGRES NATIONAL DE SPELEOLOGIE
NANCY - METZ 1985**

EDITORIAL

Le XVI^e Congrès national de la Fédération Française de Spéléologie s'est déroulé du 23 au 27 mai 1985 à Nancy et à Metz. Toujours soucieux de respecter l'esprit qu'a insufflé **Edouard-Alfred MARTEL** à notre passion au travers de l'exploration systématique des cavernes, nous avons voulu relancer et réconcilier, si besoin était les deux grands courants de la pratique de la spéléologie, à savoir le **sport** et la **science**. Le sport, en privilégiant l'engagement physique, ne doit pas méconnaître l'apport scientifique. D'ailleurs, même le sportif le plus convaincu est amené à faire un acte de science minimum au travers du relevé topographique, l'observation et la mesure (au sens quantitatif du terme) qui sont indispensables à tout esprit aventureux. L'aventure n'est-elle pas une recherche continuelle de la connaissance pour une meilleure compréhension de notre monde ?

C'est pourquoi, notre XVI^e Congrès à innové en regroupant dans des activités communes à dominance scientifique :

- les scientifiques "professionnels" en colloques spécialisés couplés avec des excursions.

- les spéléologues de la fédération pour qui l'attrait scientifique n'était pas toujours évident et qui ont ainsi pu approcher au plus près cette réalité.

Cette collaboration effective dans les domaines de l'**archéologie**, la **biospéologie**, la **karstologie** a été complétée par le rassemblement traditionnel des spéléologues pour parler plus particulièrement des actions de la fédération au travers, principalement, de ses commissions. Les échanges intergroupes ont été fructueux notamment le 25 mai avec les entrevues entre les deux catégories de participants. Signalons que le colloque de karstologie dédié **en hommage à la mémoire de J.CORBEL** : Karstologue, Instructeur de spéléologie de la FFS qui a encadré les premiers stages spéléos à Vallon-Pt.-d'Arc. Enfin les animations de nos stands ont été ouvertes au public dans le but de faire connaître et de promouvoir notre discipline. Si le bilan de ce congrès est très largement positif, il subsiste cependant un point noir: la sortie des Actes des Colloques intervient très tardivement pour des raisons liées uniquement au fonctionnement interne de la fédération. Aussi, je demande aux souscripteurs et aux acquéreurs potentiels de ce document de bien vouloir excuser cette défaillance: la qualité de son contenu rachètera, j'en suis sûr, ce retard important.

Gérard DUCLAUX
Président de la F.F.S.



Stands d'exposition à St.-Nicolas-de-Port.



A.G. FFS: Y.BESSAC (Sec. gén.) - G.DUCLAUX (Président) - J.SAUTEREAU (Vice-Président).



Dîner de clôture: autour de M.SIFFRE, MM. GEZE et ABEL

LE XVI^e CONGRES NATIONAL DE SPELEOLOGIE

Daniel PREVOT

2 rue de Cronstadt, 54000 Nancy

Mon allocution de bienvenue en Lorraine lors du vin d'honneur qui réunit, le samedi 25 mai 1985, l'ensemble des congressistes et des personnalités pour l'ouverture officielle du XVI^e Congrès National de Spéléologie, se terminait par : «**Sollicitée à Cahors en juin 1984 pour organiser le XVI^e Congrès National, la LISPEL a répondu favorablement. Depuis cette date, les spéléologues lorrains œuvrent pour faire de ce congrès un congrès exceptionnel.**».

J'espère que les quelque 600 spéléologues que nous avons accueillis à cette occasion ont réellement gardé de ce rassemblement un excellent souvenir et que le terme d'exceptionnel ne fut pas une vaine promesse. Les lignes qui vont suivre sont la suite logique de cette allocution qui servit d'éditorial de la plaquette de présentation **Spéleo L n° 15**, et introduisent tout naturellement ces Actes.

Depuis plusieurs congrès déjà, notre fédération éprouve des difficultés à trouver des candidats pour l'organisation, tous les deux ans, de cette importante manifestation de notre vie fédérale. La nécessité pour l'organisateur de s'appuyer sur une base de plus en plus solide, et de disposer d'une garantie financière de plus en plus forte, à cause justement de l'importance grandissante des congrès, est responsable de la réduction progressive de l'ensemble des organismes organisateurs potentiels. Il semble donc que l'organisation d'un congrès puisse de moins en moins être du ressort d'un simple club, et qu'il faille de plus en plus faire appel de candidature au moins auprès des C.D.S. Aussi depuis plusieurs années, on m'invitait à proposer la candidature de la Lorraine. La vingtaine de spéléos composant la délégation lorraine à l'Assemblée Générale de la F.F.S. à Cahors était informée de cette situation. Remarquons au passage que cette A.G., du fait de la modification des statuts de la F.F.S., fut la dernière de son type, c'est-à-dire à avoir l'allure d'un congrès non déclaré comme tel. Aucun Lorrain ne fut donc surpris de la nouvelle sollicitation dont je fus l'objet, avec cette fois une pression particulièrement insistante. Tous donnèrent avec enthousiasme leur accord. Ce qui est remarquable et à souligner, c'est l'absence de défection. Les «décideurs» à Cahors, sauf cas de force majeure, participèrent activement à l'organisation du Congrès de Nancy. Ils seront très rapidement rejoints par d'autres, tout aussi enthousiastes.

En réalité, le choix de la Lorraine pour héberger le XVI^e Congrès avait été tacitement décidé à notre insu, bien avant l'A.G. de Cahors par la Commission Scientifique Fédérale. On doit reconnaître que les responsables de cette dernière ont su faire croire à la délégation lorraine et à son président, qu'ils décidaient ce qu'on avait déjà décidé pour eux. Ce choix avait été réalisé afin de faire correspon-

dre le XVI^e congrès avec le XV^e anniversaire de la mort de J. Corbel, éminent professeur de géographie de la faculté de Lyon. On doit à ce brillant karstologue, de renommée mondiale, de nombreux travaux notamment sur les karsts alpins et les karsts nordiques et surtout sur les karsts de haute altitude et de haute latitude. Sur la proposition de notre commission scientifique, l'Association Française de Karstologie lors d'un congrès en Belgique en 1984 (avant Cahors) avait fait retenir la Lorraine pour héberger les «Journées Corbel». Les raisons de ce choix me sont totalement inconnues. Il était dès lors souhaitable que ces journées se déroulent dans le cadre du congrès spéléo, et par conséquent il devenait impératif que ce congrès ait lieu en Lorraine, il ne restait plus qu'à décider les Lorrains à...

La grande aventure du XVI^e congrès devait donc ainsi commencer à Cahors en juin 84. Dès l'annonce effectuée officiellement à l'A.G., les Lorrains se réunirent et décidèrent unanimement de chercher un lieu unique permettant de regrouper l'ensemble des manifestations du congrès. L'unicité de lieu est un impératif qui garantit déjà au moins 50% de la réussite d'un congrès, donc de la satisfaction des participants. Dès notre retour à Nancy, les premiers contacts étaient pris avec les autorités des Universités lorraines, de la ville et du district de Nancy, du Conseil Général de Meurthe-et-Moselle, du Conseil Régional de Lorraine, des Directions Départementale et Régionale de la Jeunesse et des Sports... Et dès le début septembre les demandes de subventions exceptionnelles étaient déjà déposées. Seules les Universités, la ville de Nancy et les Directions Départementale et Régionale de la Jeunesse et des Sports y répondirent favorablement, je veux dire financièrement.

Depuis 1971, chaque année sont organisées 5 réunions régionales (plus précisément les derniers samedis des mois impairs, hormis juillet), appelées Séminaires de Spéléologie Lorraine. Dans ces séminaires, sont exposés les travaux des clubs ou les comptes rendus d'expéditions (de clubs, régionales, nationales), sont présentés des montages diapos ou projetés des films, sont diffusées des informations locales, régionales, fédérales, voire internationales..., des cours techniques ou scientifiques y sont effectués. C'est aussi l'occasion de communiquer, d'échanger. Les conférenciers sont parfois extérieurs à la Lorraine et peuvent venir de très loin (Brésil, Argentine, Pérou, Pologne, etc.). Certains d'entre eux ne sont pas spéléos mais leur activité professionnelle ou leurs connaissances en font de précieux interlocuteurs pour les spéléos. Ces séminaires sont la base même de l'organisation spéléologique lorraine actuelle et de cohésion régionale. Ce sont eux qui ont permis en 1971 la réconciliation des

membres de l'organisation régionale dite FéRéS (Fédération Régionale de Spéléologie) créée en 1963 quelques mois avant la F.F.S., avec la F.F.S. Ils ont impulsé la création du CRSAL (Centre Régional de Spéléologie d'Alsace et de Lorraine) en 1971 sous l'égide de la F.F.S., mettant ainsi fin à 8 années de relations très tendues entre la F.F.S. et la FéRéS. La FéRéS comptait alors quelque 300 membres et il y avait seulement une quarantaine de membres F.F.S. en Lorraine. Le CRSAL, héritier de la FéRéS, fut construit progressivement lors des séminaires de 1971. Dès sa création, le CRSAL crée la Lisper (Ligue Spéléologique Lorraine) qui devient à son tour l'organisateur des séminaires, dans la continuité. Et c'est encore au cours et autour de ces séminaires que la Lisper organisera le XVI^e congrès.

Lors du 69^e séminaire (fin septembre 1984) la grande nouvelle fut annoncée. Elle reçut un accueil favorable mais silencieux. Un appel aux bonnes volontés et aux idées fut alors lancé. Pour la réussite d'un congrès il faut des locomotives mais il faut aussi des wagons. Un premier schéma directeur élaboré par le bureau de la Lisper transformé en bureau de coordination générale du congrès, fut présenté. Au 70^e séminaire (fin novembre 84) l'organisation générale et les lieux sont définitivement arrêtés. Le congrès sera composé de 3 colloques scientifiques se déroulant les jeudi 23 mai, vendredi 24 mai et samedi 25 mai matin :

— un colloque de Karstologie dit «Journée Corbel» à l'Université de Metz, sous la responsabilité de P. Gamez et de la faculté;

— un colloque de biospéologie à l'Université de Nancy 1, sous la responsabilité de J. Chauvin et D. Prévot;

— un colloque d'archéologie à l'Université de Nancy 2, sous la responsabilité de G. Aimé et D. Prévot;

Et les samedi 25 mai, dimanche 26 mai et lundi 27 mai, aura lieu le rassemblement national comportant l'A.G. de la F.F.S., dans l'enceinte fermée du F.M.S. (Foyer d'Hébergement et de Soutien) dit «L'Espace», dépendant de l'A.E.I.M. (Association des Enfants Infirmes Mentaux) de Meurthe-et-Moselle, à Saint-Nicolas-de-Port, à 12 km de Nancy Centre. Ainsi pour les organisateurs, ce congrès durera 5 jours pleins.

A partir de ce 70^e séminaire, tous les 15 jours, le bureau de coordination organise une réunion étendue à l'ensemble des organisateurs volontaires pour parer aux tâches les plus urgentes et faire le point. Au fur et à mesure de ces réunions le programme est affiné, les tâches sont redécoupées, à nouveau réparties...

A la mi-janvier 85, 6000 feuilles d'inscription sont déposées au siège fédéral pour être distribuées aux spéléologues. Elles resteront

dans les tiroirs fédéraux pour subir finalement... un classement vertical ! Il se dégage de ce regrettable incident la règle impérative suivante : «L'organisateur d'un congrès doit assurer lui-même la publicité de son congrès et se charger de la diffusion des plaquettes et autres circulaires liées au congrès. La F.F.S. doit lui fournir les moyens. L'organisateur responsable du congrès ne peut faire confiance aux irresponsables». Nous avons eu malheureusement d'autres déceptions. A Cahors, certains nous avaient laissé entendre qu'ils s'occupaient intégralement ou presque des colloques scientifiques... Ceci n'a en fait pas été clairement défini, et le seul colloque qui ne nous a créé aucun souci est celui de karstologie dont la Lorraine était seule responsable. Là aussi, j'en ai déduit une règle de conduite : «la responsabilité ne peut être partagée avec des extérieurs non engagés, et l'organisateur doit assumer seul l'organisation des colloques que le congrès héberge». A Cahors également, bien des promesses nous furent faites en ce qui concerne la publication de ces Actes qui fut très compromise. Je rends donc hommage aux efforts de B. Bordier et de R. Laurent, sans lesquels les Actes auraient subi le sort des fiches d'inscription. Il faut remercier aussi Lucien Gratté qui a bien voulu retravailler sur la maquette initiale. Là encore, j'en ai tiré une leçon érigée en règle : «L'organisateur assurera la publication des Actes lui-même, la F.F.S. devant lui fournir les moyens. Dans tous les cas il doit conserver les originaux, sinon au moins une copie de ce qu'il transmet».

Le paragraphe ci-dessus exprime l'amertume (le terme est faible) que nous avons gardée concernant certains problèmes dont nous n'avions pas la maîtrise. Dans le cadre de l'organisation d'un congrès, il y a déjà suffisamment de problèmes à régler, sans que l'on permette à des extérieurs d'en créer qu'on ne peut résoudre, «l'organisateur doit avoir la maîtrise intégrale du congrès». Cette amertume n'est rien en comparaison de la joie que cette aventure nous a procurée. Le bénéfice moral que la région en a retiré est considérable. Les nombreux Lorrains qui se sont engagés, ou qui d'une manière ou d'une autre ont participé à la réussite de ce congrès, sont fiers d'avoir vécu cette expérience.

Dès la décision prise à Cahors, j'ai personnellement insisté pour organiser un congrès devant accueillir 1000 personnes. Cette prévision optimiste (il y eut quelque 600 participants) a permis de satisfaire toutes les demandes sans problème, qu'il s'agisse de la restauration comme de l'hébergement. Ainsi certaines tentes implantées dans le lieu du congrès en guise de dortoirs sont restées vides les nuits du congrès. Cette prévision optimiste est, elle aussi, un facteur de réussite.

A partir du 71^e séminaire (fin janvier 85) les réunions du comité d'organisation ou du bureau devinrent hebdomadaires, les équipes étant clairement organisées autour des responsables et les tâches clairement définies et réparties. Si bien que pour le 72^e séminaire (fin mars 85) l'organisation du congrès était presque achevée (il restait toutefois encore quelques tâches importantes comme par exemple l'impression de la plaquette qui nous a causé quelques soucis). Ainsi donc nous étions pratiquement prêts 2 mois avant la date fatidique. Avant d'écrire cet historique, j'ai relu notamment l'introduction de B. Bordier aux actes du XI^e congrès de Périgueux en 1974 publié dans *Spelunca Mémoires* n° 8, Il se plaignait du lymphatisme chronique de ses associés qui «3 mois avant la date fatidique» se partageaient «tant bien que mal les différentes tâches nombreuses et diversifiées, allant de l'hébergement au badge de poitrine, qui toutes sont importantes». Pour ma part, je

n'eus qu'à me louer de mes collaborateurs : une quinzaine de locomotives assistées d'une cinquantaine de wagons issus des 4 clubs de la région de Nancy, engagés dans cette aventure et auxquels il convient d'ajouter toutes les autres bonnes volontés de la région qui prêtèrent le coup de main quand il le fallut le jour du congrès.

Il y eut certes quelques grains de sable imprévisibles dans tout ce mécanisme parfaitement huilé, ajusté, mais non rôdé, qui me firent blanchir 2 ou 3 cheveux. Ce qui est peu quand on sait que certains organisateurs d'autres congrès sont chauves depuis. Pour être sérieux, ce congrès a très bien marché et je remercie tous ceux qui par leur contribution, même petite, ont œuvré à sa réussite.

Jeu 23 mai 85, dès potron-minet, j'arpente les couloirs de la faculté des Lettres et des Sciences Humaines de l'Université de Nancy II pour peaufiner l'accueil du colloque d'archéologie qui commence à 9 h ce même jour. G. Vaucel fait de même à la faculté des Sciences de l'Université de Nancy I pour le colloque de biospéologie et P. Gamez fait sans doute de même à l'Université de Metz pour le colloque de karstologie. Le congrès est commencé : en ce qui concerne le programme détaillé des colloques et des différentes communications, nous renvoyons à la plaquette *Spéléo L*, n° 15 et au sommaire de ce *Spelunca Mémoires*.

Le rassemblement national à Saint-Nicolas-de-Port s'est déroulé comme suit

LE SAMEDI 25 MAI

9 h-11 h : Suite des colloques scientifiques - expositions - ventes.

11 h : Inauguration officielle - apéritif.

15 h-19 h : Table ronde : comptes rendus des colloques scientifiques - dernières découvertes importantes - projections de films et diapos - expositions.

17 h-20 h : Table ronde sur les nouveaux statuts.

21 h : Projection de films.

LE DIMANCHE 26 MAI

Expositions - ventes - élections - présentation des nouveautés - forum photo - réunion des commissions - sorties diverses.

14 h-18 h : Assemblée Générale de la Fédération.

18 h-20 h : Projection films et diapos.

20 h 30 : Repas lorrain - soirée de gala.

LE LUNDI 27 MAI

9 h-12 h : Proclamation des résultats des concours - expositions - ventes - réunion des commissions - congrès de l'ASE - Sorties diverses.

12 h : Clôture du 16^e Congrès.

Pendant que se déroulent les colloques scientifiques, certains organisateurs préparent le terrain pour l'arrivée du «gros» des congressistes le samedi matin. Il faut installer le chapiteau de 1000 places, préparer les salles d'exposition, le stand d'accueil, mettre en place les balisages (externe, interne), le pavillon d'information, installer la sonorisation... Il faut beaucoup de bras... Le salon d'honneur de la gare SNCF a été mis à notre disposition, des membres du service d'accueil y assurent une permanence nuit et jour, du vendredi soir au dimanche midi, et une navette assure régulièrement la liaison gare-congrès. Nous avons constaté que peu de congressistes arrivent par le train; il est toutefois nécessaire de prévoir ce type d'accueil. Les heures brusquement se bousculent, la terre tourne plus vite, je vais, je viens, à droite, à gauche... J'ai l'impression d'être inutile..., la machine marche sans son président..., les installations se poursuivent..., je prends le temps d'emmener

les archéologues visiter une mine de sel..., tout est en place..., déjà les premiers congressistes hors colloque arrivent (ils vont dormir, eux...).

Programme

Samedi 25 mai 85, une aube radieuse se lève sur les lieux du congrès, annonciatrice du beau temps qui de fait ne nous quittera pas jusqu'à la fin. En cette époque de l'année, en Lorraine, on peut toujours craindre le pire, et les jours précédents le temps était très incertain. La relève au stand d'accueil s'effectue, le rassemblement des spéléos commence. Enfin il est 11 heures et j'accueille les personnalités et les quelque 200 spéléos déjà arrivés, par un discours d'ouverture, c'est l'éditorial de la plaquette *Spéléo L* n° 15. Les spéléos sont patients et regardent les verres se remplir de l'apéritif lorrain (à base de gris de Toul et de sirop de quetsches) que nous avons concocté à leur intention.

Le XVI^e Congrès National de Spéléologie (qui dure en fait depuis deux jours) est officiellement ouvert et le rassemblement national va se dérouler. Les responsables sont tous à leur poste sauf celui de la sécurité qui, ayant oublié d'organiser le sien, a préféré s'éclipser dans la nature ce jour-là. Fort heureusement il n'y eut pas de problème médical important et le docteur A. Ballereau, médecin spéléo de la Lissel régla les quelques petits incidents qui survinrent. De même que les autres organisateurs, je n'ai pas vu la moitié du congrès. Il faut d'ailleurs à ce sujet souligner quel a été le dévouement des organisateurs dont certains avaient spécialement pris des jours de congé et qui tous paieront leur entrée, comme tout congressiste, à la seule différence qu'ils payaient... pour travailler ! On appelle cela le **bénévolat pur**. A ces bénévoles purs qui offrirent leur temps, leurs congés et même leur argent, j'adresse mes remerciements. La satisfaction d'un congrès réussi fut leur seule récompense et les quelques lettres de félicitations reçues ultérieurement furent très appréciées...

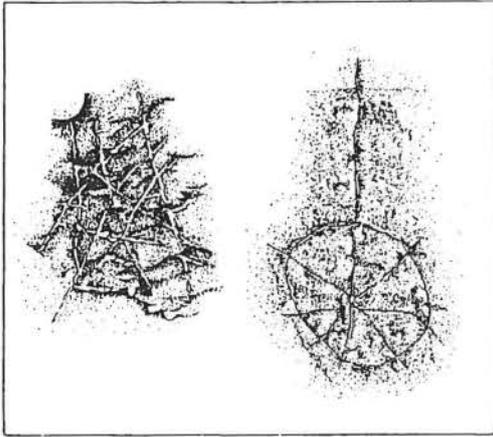
L'hostilité aux nouveaux statuts que le ministère nous a imposés dès juillet 84 dans un souci d'uniformisation des fédérations sportives, a été manifeste lors de la table ronde organisée à cet effet. L'assemblée générale du dimanche 26 mai 1985 devait doter notre fédération de ses statuts actuels.

Le dimanche soir quelque 400 personnes se regroupaient pour le traditionnel repas ou banquet. Au menu : des spécialités lorraines dont la quiche, la potée, le munster... arrosés d'un gris de Toul. Soudain je vois une quiche volante traverser le chapiteau..., le déplorable comportement devenu malheureusement tradition de certains excités, est certes loin d'encourager d'éventuelles candidatures à l'organisation de congrès futurs. Je fus également navré de constater que dans cette guerre des quiches, des Lorrains étaient aussi engagés.

Le lundi 27 mai 85, le terrain de camping aménagé sur le lieu même du congrès, retenissait du ronronnement des moteurs des véhicules que nos lointains visiteurs préparaient pour le retour. Après un petit déjeuner pris sur place et les derniers achats de gris de Toul pour beaucoup c'était le départ. A midi il ne restait plus sur le terrain que les Lorrains et quelques amis de la région K voisine pour remettre en état l'ensemble des installations.

Le XVI^e Congrès National de Spéléologie était terminé.

D. PREVOT



1



2



3

1 ARCHÉOLOGIE

LISTE des PARTICIPANTS au COLLOQUE ARCHEOLOGIE Université NANCY II - 23, 24 et 25 mai 1985

Organisation : PREVOT Daniel - BUR Michel

Coordinateurs : AIMÉ Gérard - FLUCK Pierre

Participants : AIMÉ Gérard - ANCEL Bruno - BAILLY-MAITRE Marie-Christine - BENOIT Paul - BRUINING Jeannette - COLAS - EMRETSMANN Martin - FLUCK Pierre - GITTA Claude - GRANDE-MANGE Yvette - HERR Michel - JEUNESSE Christian - LAURENT Jacques - PIBOULE Patrick - THEVENIN André - WILLICH Dieter.

Excusés : MOURET Claude.

Ce premier colloque d'archéologie souterraine organisé par la Commission Scientifique de la F.F.S. n'a pas été sans poser de problèmes (la date, le thème...). Il a même suscité quelques réactions inattendues d'hostilité. Il est vrai que l'appellation même d'«archéologie souterraine» peut être aisément combattue. Le fait aussi qu'un colloque d'archéologie soit organisé hors des circuits et structures traditionnels pouvait faire naître des réticences, voire des doutes.

Le risque était donc grand de voir bouder cette manifestation par ceux-là mêmes qui, dans la région d'accueil (la Lorraine) ou ailleurs, pouvaient apporter une contribution scientifique décisive.

Malgré ce contexte, le colloque s'est déroulé devant un auditoire quasi confidentiel (nous étions en semaine) mais dans une ambiance excellente; il a été l'occasion de communications de bon niveau, étayées par une iconographie très riche et variée, et centrées autour de deux thèmes essentiels :

— l'apport des grottes dans l'établissement des ensembles chronostratigraphiques;

— l'archéologie minière (la région s'y prêtait) puisque tout l'Est de la France est riche en anciennes mines... et en chercheurs spécialisés dans ce domaine.

C'est la substance de ces travaux qui est présentée dans les pages qui suivent.

Gérard AIMÉ

Illustrations page précédente

1. Signes gravés du traouc del Calel, Tarn (dessin L. Gratté)

2. Grotte de Chancia, Jura (photo F. Jacquier), fouille d'un habitat refuge du bronze final III a.

3. DE RE METALLICA, ouvrage de G. Agricola (1657) : descente dans le puits. A avec des échelles. B sur un siège. C sur du cuir. D par des escaliers.

LE SECTEUR MINIER DU NEUENBERG : ARCHITECTURE, ORGANISATION ET EVOLUTION DYNAMIQUE D'EXPLOITATIONS MINIERES DE LA SECONDE MOITIE DU XVI^e SIECLE

Bruno ANCEL
25, rue des Bornes 67200 STRASBOURG

Le district minier de Sainte-Marie-aux-Mines est, d'après des considérations historiques et géologiques, divisé en 4 secteurs : l'Altenberg, le Neuenberg, le Blutenberg et le Versant Lorrain. Le secteur du Neuenberg occupe essentiellement la montagne du Rain de l'Horloge située au sud d'Echery, entre les vallées de la Petite Liepvre et du Rauenthal. Le Neuenberg est traversé, perpendiculairement à son allongement, par sept principaux filons qui sont du sud vers le nord : Saint Jean, Saint Jacques, Saint Guillaume, Saint Louis, le filon de zonc, Chrétien et Fürstenstollen-Saint Paul. Ces filons, de direction approximative est-ouest, sont très diversement minéralisés en cuivre, plomb, zinc, argent, cobalt, arsenic... et s'opposent au gros faisceau filonien de l'Altenberg, essentiellement plombifère.

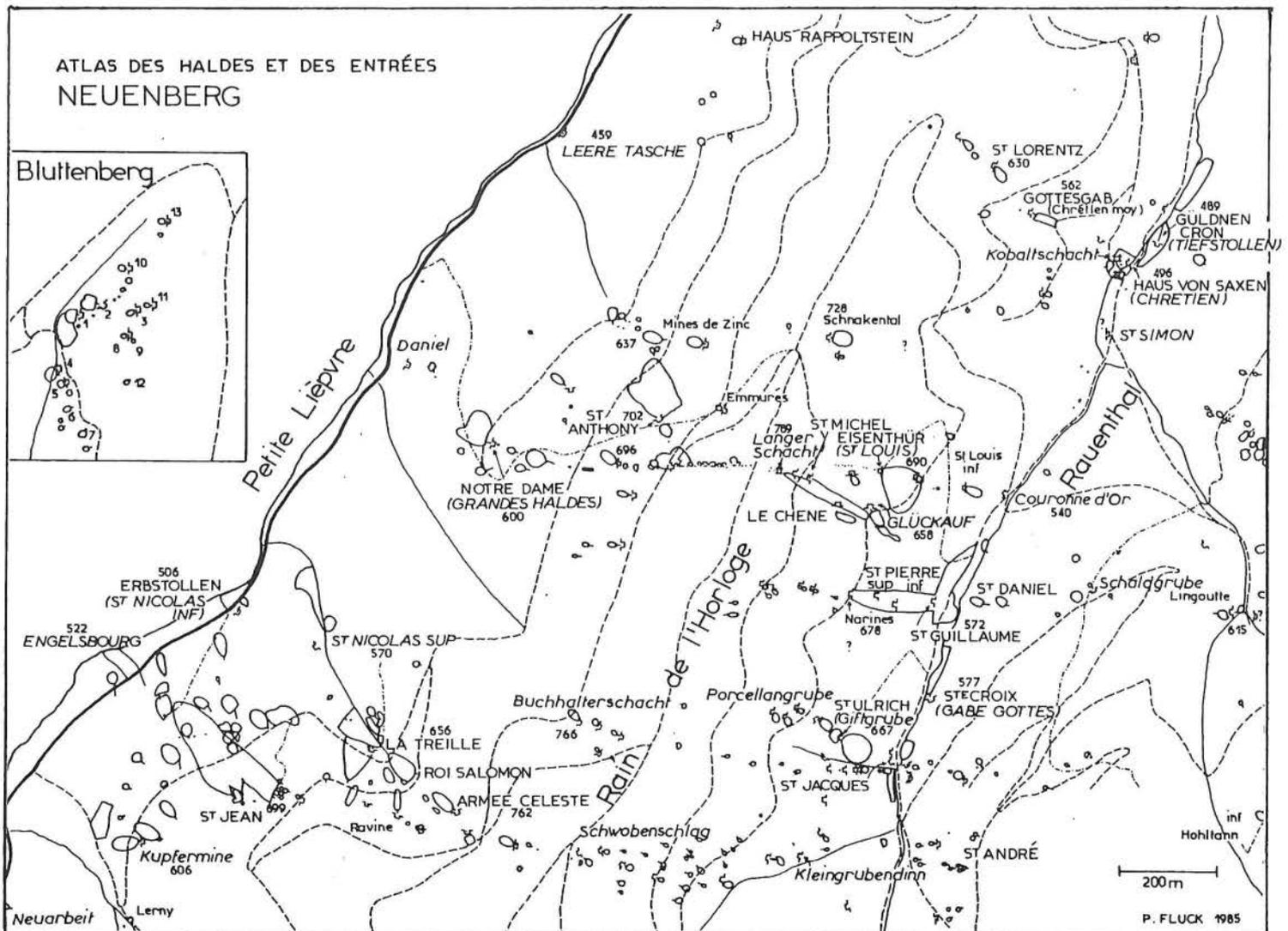
La découverte des filons du Neuenberg n'a eu lieu qu'au milieu du XVI^e siècle à une période considérée comme l'Age d'Or de l'exploitation minière à Sainte-Marie et dans les Vosges. La présence, depuis plus d'un demi-siècle, de main d'œuvre qualifiée, de techniques minières avancées et d'une organisation de travail qui faisait ses preuves, font alors de la «Nouvelle Montagne» le théâtre d'une exploitation intense et méthodique. Cette période de prospérité montre des signes de faiblesse dès la fin du XVI^e siècle, suite à l'épuisement des filons et aux difficultés d'exploitation dues aux grandes profondeurs atteintes. Une épidémie de peste vers 1630 puis la Guerre de Trente Ans conduisent l'exploitation à la ruine.

L'activité minière reprend au début du XVIII^e siècle mais n'atteint pas les sommets

de l'exploitation précédente. Elle se poursuit tant bien que mal, souffrant des mêmes maux, jusqu'à ce que la Révolution occasionne une nouvelle ruine. Durant le XIX^e siècle ont encore lieu plusieurs reprises d'activités minières, vaines et éphémères, car ce que les Anciens ont laissé ne garantit plus la rentabilité d'une exploitation. Enfin de 1936 à 1940 fut encore exploitée la mine Gabe Gottes pour son gisement d'arsenic natif.

Sûr ce secteur, environ 240 mines furent ouvertes au XVI^e siècle (fig. 1) mais seule une trentaine ont véritablement été productives. Depuis 20 ans les spéléologues miniers ont

Fig. 1. Carte des vestiges de surface du Neuenberg. Les haldes ou tas de déblais correspondent généralement à une entrée de mine ou à un puits au jour.



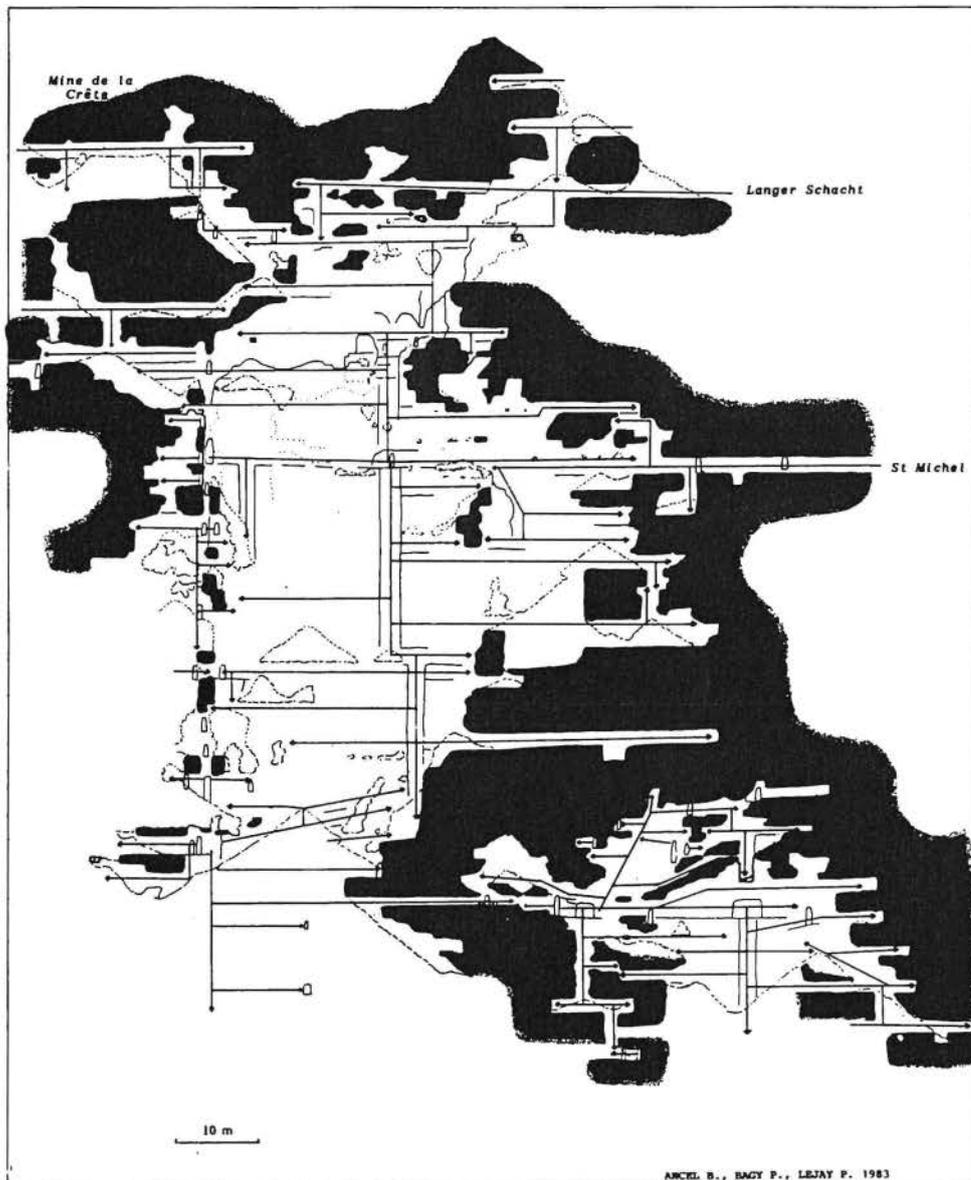


Fig. 2. Profil du Grand Dépilage de Saint Michel (Filon Saint Louis). Projection sur un plan vertical N 100. En grisé, la roche en place dans le plan du filon; traits fins, éboulis; traits fléchés, parcours effectués par les mineurs (galeries, puits) pour reconnaître l'étendue de la colonne minéralisée avant de l'exploiter (dépilage). Constatez que la mine Langer Schacht a «exploré» le filon sur plus de 100 m de dénivellée, réalisant successivement des jonctions avec Saint Michel (-35) puis Saint Louis (-86) par lesquelles s'est alors fait l'évacuation du minéral et des stériles.

vent regroupés en zones, explorent le filon dans un plan sub-vertical et relient les différents niveaux de galeries entre eux. Les dépilages sont le résultat direct de l'exploitation; leurs parois conservent les traces des anciens niveaux de galeries et de puits qui témoignent de la phase d'exploitation de ce filon. Il est ainsi possible de reconstituer les techniques et la chronologie de creusement d'un dépilage (fig. 2).

Chaque filon du Neuenberg a été reconnu sur plusieurs centaines de mètres de dénivellation (près de 500 m pour le filon Saint Jean). Les principales mines étaient interconnectées entre elles par des systèmes de puits et des travers-bancs (Saint Oriel, Glückauf, Couronne d'Or...), constituant à l'échelle du massif un seul grand réseau de 50 km, aujourd'hui morcelé par les éboulements.

La spéléologie minière allie l'exploration à l'étude archéologique et géologique des anciennes mines. En confrontation avec les archives et les fouilles de surface, elle permet de retracer à différentes échelles l'évolution dynamique d'une exploitation minière, et de comprendre son organisation et ses techniques propres.

Bruno ANCEL

BIBLIOGRAPHIE

ANCEL (B.) et FLUCK (P.) - 1984 - Le filon Saint Louis au Neuenberg : caractères et évolution dynamique d'une exploitation minière de la seconde moitié du XVI^e siècle. *Pierres et terre*, n° hors série 2, 138 pp.

BARI (H.) - 1982 - Minéralogie des filons du Neuenberg, Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin). *Pierres et Terre*, n° 23-24, 143 pp.

FLUCK (P.) - 1975 - Le filon de Saint Guillaume à Sainte Marie : histoire de l'exploitation, minéralogie, géologie du site. *Bull. Station Géophysique, I.P.G., Strasbourg*, n° 1. 27 pp.

FLUCK (P.) - 1975 - La spéléologie minière, une activité méconnue. *Spelunca*, 1975, n° 2, p. 5-10.

FLUCK (P.) - 1978 - Les 15 plus belles courses souterraines à Sainte Marie. *Pierres et Terre*, n° 13, p. 3-52.

FLUCK (P.) - 1985 - Sainte-Marie-aux-Mines (rubrique mines). *Encyclopédie de l'Alsace*, sous presse.

réouvert 87 entrées de mines et exploré plus de 30 km de réseaux. Ces ouvrages souterrains sont constitués principalement de galeries de puits et de dépilages. Ils datent pour la grande majorité de l'époque XVI^e, et ont donc été taillés au marteau et à la pointerolle, outils/symboles de l'activité minière.

Les mineurs du XVI^e siècle ont exploré la montagne en tous sens, en y perçant des kilomètres de galeries qui suivent généralement soit un filon stérile ou minéralisé (galerie s.s.) ou une faille (travers-banc). Ainsi le réseau de ces galeries est calqué sur le découpage du massif par les accidents géologiques. La nature de ces derniers et l'état de la roche conditionnent la forme architecturale des galeries. Lorsque les conditions sont bonnes, leur section est de type «ogival tronqué» avec une hauteur supérieure à 2 m et une largeur voisine de 50 cm. Les traces d'outils, la forme des parois et des fronts de taille renseignent sur les techniques de creusement, d'exhaure (évacuation des eaux d'infiltration) et d'aéragé. Sur l'ensemble de la mine, on distingue des galeries principales d'accès, généralement hautes et équipées d'une voie de roulage, et des galeries secondaires de recherche, souvent basses (sitzort) et parfois comblées. Certains travers-bancs dont les entrées sont situées dans les fonds de vallée (erbstollen) peuvent s'enfoncer sur plus de 2 km dans la montagne et recouper plusieurs filons (Couronne d'or au Rauenthal, Saint Nicolas inférieur à la Petite Lièpvre). Ils venaient ainsi en

aide à de nombreuses mines pour l'exhaure et l'aéragé.

Les puits ont une section rectangulaire, leur gabarit est très variable (en moyenne 2,50 x 1 m) et ils sont toujours creusés sur un accident géologique (faille ou filon). Leur profondeur varie de 10 à 35 m. Leur sommet est aménagé en une salle de manutention (hornstätt) où s'effectuaient les opérations de treuilage. Les puits ont souvent joué le rôle de travaux de recherche avant de devenir, pour certains, des puits d'extraction. Les foncés sont de petits ouvrages descendants peu étendus et non aménagés à leur sommet. Les montages sont des travaux montants où les parois d'aspect tortueux, réalisant fréquemment des jonctions avec des mines supérieures.

Les dépilages peuvent être assimilés à de grandes fissures ouvertes qui correspondent au corps filonien qui a été exploité. Leur largeur n'excède guère 60 cm, sauf dans certaines zones où le filon était particulièrement puissant, ou encore aux endroits où les parois instables du dépilage se sont effondrées, donnant naissance à des salles. Le Grand Dépilage de Saint Michel, qui s'étend sur près de 50 m de long et sur une hauteur de plus de 80 m, est à l'heure actuelle le plus vaste dépilage des Vosges.

Tous ces vestiges souterrains sont organisés dans l'espace et constituent les réseaux miniers. Les galeries explorent les faisceaux filoniens dans un plan horizontal et donnent accès aux zones productives. Les puits, sou-



d'après DE RE METALLICA de G. AGRICOLA - 1657

L'ARGENTERIE DE BRANDES UNE EXPLOITATION MINIERE MEDIEVALE (XIII^e-XIV^e SIECLES)

Marie-Christine BAILLY-MAITRE
5, rue Commandant Debelle 38000 GRENOBLE

La problématique historique s'intéresse de plus en plus à l'histoire des techniques dont l'évolution est désormais considérée comme un élément de compréhension des sociétés passées.

Si le Moyen Age est un âge de la terre, le métal y a cependant tenu une place déterminante en conditionnant les progrès de l'agriculture, de la construction, de l'armement, et c.

La possession des mines a suscité la convoitise des puissants et l'histoire politique s'en est trouvée infléchie. La production des métaux, matière première rare et précieuse, a engendré la formation d'une catégorie socio-professionnelle spécifique (surtout pour les non-ferreux) dominée par une élite de techniciens très recherchés.

Le site archéologique de Brandes (Huez, Isère) était tout indiqué pour aborder cette étude. Précurseur en la matière, ce chantier a débuté en 1977. Le village minier de Brandes présentait un grand intérêt en raison de la complémentarité des informations qu'il pouvait fournir :

- des archives permettaient de connaître la période de mise en valeur de la mine et donnaient quelques indications sur l'organisation juridique de l'exploitation (1);
- le terrain livrait les vestiges encore importants et bien conservés des structures d'extraction et de traitement du minerai (2);
- enfin par les textes et le terrain, il était possible d'aborder l'histoire des mines dans ses aspects économiques, politiques et sociaux.

LA MINE D'ARGENT DE BRANDES : EXTRACTION

A. Contexte géologique (3)

Le site de Brandes s'est développé sur une zone de contact entre une résurgence du massif cristallin des Rousses et un plateau fait d'alluvions glaciaires (argile). Un filon de quartz-barytine, de tracé sygmoïdal, prend en écharpe l'ensemble du site depuis le plateau de Brandes (1800 m d'altitude) jusqu'au Lac Blanc (2700 m). Des zones d'extraction le jalonnent sur toute sa longueur. Des ramifications secondaires du filon ont également fait l'objet de travaux. Le métal extrait contenait principalement du plomb argentifère et un peu de cuivre gris.

(1) Testament du Dauphin Guigue-André (1236), ADI, CHEVALLIER (U.), Le *registre dauphinois*, B.3373, n° 7496.
Reconnaissance des habitants de Brandes au Dauphin (1261), ADI, MARCELLIER, *inventaire des documents de la Chambre des Comptes de Grenoble*, vol. 6, f° 2887-2888.
Enquête delphinale dite Le Probus (1250), ADI, B.2262, f° 368.
Enquête delphinale de 1339, ADI, B.3120.
Enquête pontificale de 1339, Arch. Vatican, coll. 410, f° 32 à 37.
Enquête judiciaire (1337), ADI B.3333.
Révision de feux (1428), ADI, B.2744 (copie XV^e).

(2) Rapports de fouille de 1977 à 1985 déposés à la Direction des Antiquités Historiques Rhône-Alpes.
(3) Carte topographique 1/25 000 Vizille Est 33-35.
Carte géologique 1/50 000 Vizille XXXIII-35.



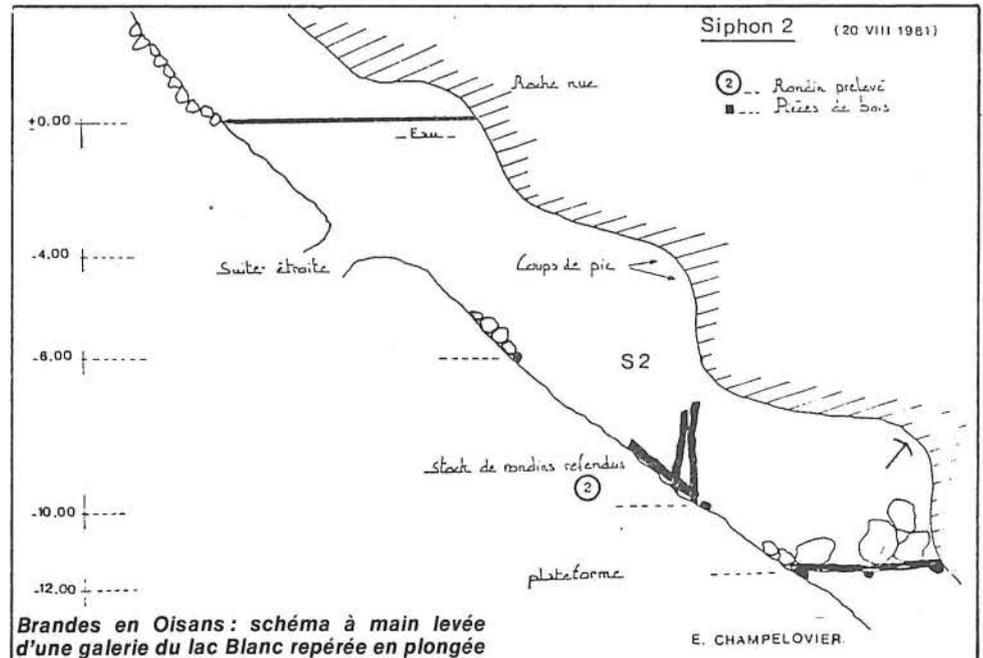
Vue générale du site

B. Les techniques extractives

Le repérage de la quasi-totalité des points d'extraction a montré que la technique s'était adaptée à la configuration du filon : extraction à ciel ouvert ou en galeries.

L'extraction à ciel ouvert : chaque fois que le filon principal affleurait à la surface du plateau il a été entièrement défilé à ciel ouvert.

Son tracé est aujourd'hui matérialisé par une longue tranchée de puissance variable. Les ramifications secondaires ont été exploitées en courtes galeries n'excédant pas 10 m de longueur, ce qui les fait classer dans la catégorie « ciel ouvert ». Autre forme représentée au Lac Blanc : le filon a été défilé sur plus de 20 m de profondeur en grande faille verticale. Dans ce dernier cas, des traces de potelles encore visibles témoignent des aménagements de bois mis en place pour permettre l'exploitation.



Brandes en Oisans : schéma à main levée d'une galerie du lac Blanc repérée en plongée

E. CHAMPELOVIER

L'extraction en galeries : cette technique est représentée aussi bien sous le plateau de Brandes qu'au Lac Blanc. Les 8 entrées de galeries repérées à 2700 m sont toutes noyées par les eaux de fusion des névés, le système d'exhaure ne fonctionnant plus. Le CNRAS (4) y a effectué des plongées à deux reprises, ce qui a permis de constater le grand intérêt des vestiges conservés : boisages encore en place, traces d'outils sur les parois, possibilité de dendrochronologie sur les étais. L'ennoyage, probablement dès l'abandon au XIV^e siècle, assurait aux observations faites une grande qualité scientifique. L'exhaure partiel de l'une de ces galeries au cours de l'été 1985 a confirmé les premières observations et a permis une meilleure étude des systèmes de creusement et d'étaillage des travaux souterrains. La technique employée est celle dite du « gradin droit », des chambres de dépilage se succédant dans l'axe du filon. Un palier de bois était encore en place à la base de chaque chambre. Une autre galerie est en cours de dégagement en contrebas du plateau qui porte les ateliers. Creusée dans la puissance du filon elle se subdivise en deux galeries superposées au bout de quelques dizaines de mètres après l'entrée. L'étaillage est dans ce cas différent puisqu'il semble fait ici de murettes de pierres, utilisant ainsi une partie du stérile, comme on l'observe aux mines de Largentière en Ardèche, à la même époque (5).

Pour conclure sur les techniques extractives il importe de souligner le soin apporté par les hommes du temps pour exploiter la moindre parcelle du filon grâce à une prospection systématique sur tout son tracé et à une adaptation des techniques utilisées. Tous les travaux ont été faits dans l'épaisseur du filon à l'exclusion de tout travers-banc. Les outils employés étaient le pic, la masse et la pointe, rôle. Il est intéressant de constater que dès la première moitié du XIV^e siècle, cette exploitation possédait un réseau complexe de travaux souterrains avec puits d'accès, longues galeries munies de niches pour les lampes, galerie d'exhaure, etc.

BRANDES, UN CENTRE DE TRAITEMENT METALLURGIQUE

L'étude du terrain et la fouille archéologique ont permis de suivre tout le processus de transformation du minerai depuis son extraction jusqu'à la fabrication du plomb d'œuvre, dernière étape avant l'affinage final.

Les haldes encore en place au début du XX^e siècle étaient estimées à 900 000 tonnes sur le plateau. Elles témoignent d'une exploitation importante mais aussi que Brandes était un centre dans lequel se traitait du minerai provenant de divers points d'extraction du massif de l'Oisans. Enfin l'observation des résidus de ces haldes fournit de précieuses informations sur le traitement mécanique du minerai, complétant les indications données par le dégagement de plusieurs ateliers.

Un véritable « quartier industriel » a été mis au jour en bordure du plateau qui porte les habitations, à proximité immédiate de la source du village.

Le traitement mécanique : après un premier tri sur le carreau de la mine, le minerai était ramené dans les ateliers, ce qui supposait un long portage à dos d'homme et un équipement des abrupts rocheux où s'ouvrent les



Brandes en Oisans : intérieur d'une galerie au lac Blanc

failles d'extraction avec des échelles et des passerelles de bois. Le minerai était ensuite **concassé** à l'aide de mortiers, simples pierres excavées en grès houiller, à l'aide de perceurs, pierres taillées pour faciliter la préhension.

Suivait un **broyage** plus fin à la meule et enfin le **lavage**. Pour toutes ces opérations des ateliers correspondants ont été mis au jour. Plusieurs dizaines de mortiers et perceurs, certains encore en place, ont été retrouvés. De gigantesques **aménagements hydrauliques** drainaient les eaux du lac Blanc jusqu'au plateau, soit sur plus de 1000 m de dénivellation. Cette eau servait à actionner les meules et au lavage. Plusieurs types de bassins ont été dégagés. Ils témoignent qu'à Brandes, dès les XIII^e-XIV^e siècles, on pratiquait plusieurs lavages (tamisage, décantation, peut-être sluice) comme cela se faisait au XVI^e siècle dans les mines d'argent des Vosges. Enfin, lorsque la gangue était trop résistante, les métallurgistes de Brandes pratiquaient la **décrépitation**, opération qui consiste à brûler la gangue après un concassage grossier. Dévoreur de bois, ce traitement n'était appliqué qu'en cas d'absolu besoin. Cela confirme bien le haut niveau technique déjà atteint dans cette exploitation.

Le traitement chimique : le dégagement de plusieurs ateliers et l'analyse chimique des résidus de métallurgie (scories) ont livré des indications précises sur cette phase du traitement. La poudre obtenue après lavage était **grillée** pour éliminer les poisons métallurgiques. Les analyses physico-chimiques en témoignent. La fabrication du **plomb d'œuvre** se faisait dans des fours de petite dimension. L'étude de détail de ces structures est en cours car la variété des formes observées pose un problème quant à la morphologie exacte de ces fours. Les analyses réalisées en laboratoire sur les scories attestent une grande maîtrise technique de la part des métallurgistes : bonne utilisation des fondants, calcul satisfaisant du lit de fusion, températures de fusion atteintes proches des températures optimales, etc.

La dernière étape, la **coupefaction**, se faisait très certainement ailleurs, dans des ateliers delphinaux, car elle n'a laissé aucune trace sur le terrain. Cette opération qui donnait accès au métal pur devait être très surveillée, comme cela se pratiquait sur d'autres sites argentifères contemporains (6).

LES IMPLICATIONS ECONOMIQUES, SOCIALES ET JURIDIQUES

A. L'organisation juridique de l'exploitation

Les archives montrent que le Dauphin était propriétaire d'une partie du revenu de la mine (1/5^e à 1/9^e) mais on ignore qui possédait le reste. Aux XIII^e-début XIV^e siècles, cette mine était la plus riche du Dauphiné. L'organisation du travail, telle que l'approche archéologique permet de l'envisager, semble être caractérisée par de petites unités de travail, à dominante artisanale, voire familiale. Il est probable que toute la population vivant à Brandes participait à l'exploitation.

B. Le village de Brandes

Autour de cette exploitation minière, s'est développé, dans un site inhospitalier, un village permanent, habité par une population équilibrée dans ses structures.

Les vestiges sont nombreux :

- au sommet du rocher qui domine les habitations se trouve la **motte castrale**, supportant encore la base d'une tour de 18 m de diamètre ;

- le même rocher porte l'**église paroissiale**, qui présente plusieurs étapes de construction.

- Tout autour s'est développée la **nécropole**. L'étude anthropologique a révélé que la population était exclusivement composée d'alpins (ce qui exclut une implantation germanique) et avait certainement souffert du Saturnisme ;
- enfin, les **habitations** ont montré le mode de vie et le niveau de vie de ces mineurs, hommes libres et vassaux libres du Dauphin : régime alimentaire, vêtement, parure, jeux, etc.

Conclusion

Pour conclure, il importe de souligner le grand intérêt de sites de ce type qui permettent d'aborder la question des mines et de la métallurgie anciennes de façon globale et complète : tableau des techniques utilisées précis et bien daté et instantané d'une population de mineurs représentative de cette catégorie socio-professionnelle pour les XIII-XIV^e siècles.

La nouveauté de la recherche sur les mines et la métallurgie est que, plus que toute autre, elle requiert une démarche pluridisciplinaire et nécessite la collaboration avec des spéléologues, des métallurgistes, des ingénieurs des mines, etc.

Marie-Christine BAILLY-MAITRE

(4) Centre National de Recherche Archéologique Subaquatique.

(5) BAILLY-MAITRE (M.C.) rapport de prospection 1983 déposé à la Direction des Antiquités Rhône-Alpes.

(6) SIMONIN (L.), De l'exploration des mines et de la métallurgie en Toscane pendant l'Antiquité et le Moyen Age, *Annales des Mines*, 5^e série, T. XIV, 1858.

ARCHEOLOGIE MINIERE A SAINTE-MARIE-AUX-MINES LE SECTEUR DE L'ALTENBERG

J. et Y. GRANDEMANGE

La vallée de Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin), ou Val de Liepvre, fut au XVI^e siècle le plus important centre de production argenti-fère du territoire national actuel. Si nous ne connaissons pas la date des premiers tra-vaux, l'exploitation est néanmoins attestée au XIII^e siècle, l'apogée se situant au XVI^e siècle.

Le paysage conserve de nombreuses traces de ces exploitations minières : haldes, cavités d'exploitation, mines, ruisseaux aménagés à l'usage de lavoirs, bocards, forges ou fonde-ries, etc. La toponymie et l'architecture urbaine en portent également la marque : pri-son de mineurs, église Saint-Pierre édiflée au XVI^e siècle pour les mineurs, Maison des Dîmes, demeures d'officiers ou de maîtres des mines.

Sur le plan linguistique et religieux, l'acti-vité minière entraînant l'afflux de travailleurs venus de Saxe, de Bohême et du Hanovre, contribua dès le XVI^e siècle à la «germanisa-tion» d'une région jusqu'alors francophone.

Cette région constitue donc un domaine privilégié où le but des travaux archéologi-ques est d'établir l'histoire des différentes phases d'exploitation associée à l'histoire des techniques minières.

Cette recherche s'appuie d'abord sur les sources d'archives : rapports de maîtres mineurs, règlements miniers, cartes et plans, comptes des receveurs des mines, de gruerie, des domaines, etc. Si ces archives sont rela-tivement abondantes pour la période moderne, nous permettant ainsi de saisir l'essentiel de ces travaux et de leurs techniques, elles nous font cruellement défaut lorsqu'on commence à remonter le temps...

C'est précisément ici que l'enquête arché-ologique intervient pleinement et que ses résul-tats sont essentiels pour reconstituer ce que les textes ne nous ont pas laissés.

Sur le plan méthodologique, il s'agit d'asso-cier la fouille et l'analyse de toutes les sour-ces documentaires. La convergence des approches permet de reconstituer très préci-sément l'histoire de ces phases d'exploitation et de leurs techniques, mais aussi d'élucider l'histoire des abandons et des reprises, un des problèmes majeurs des activités de pro-duction et par là même, d'apporter un param-ètre essentiel à l'histoire de la conjoncture éco-nomique et sociale.

Les sciences de la terre apportent une pierre à cet édifice en fournissant des don-nées essentielles à la compréhension globale de l'exploitation passée. On ne saurait en effet se passer de l'étude structurale pour comprendre les motifs de l'organisation des ouvrages souterrains.

La mine est donc, par excellence, un lieu pluridisciplinaire où archéologues, géolo-gues, minéralogistes, spéléologues, voient un terrain d'étude privilégié ; mais l'archéologue, de par la nature de certains vestiges, revendi-que d'avoir en ce lieu le premier regard.

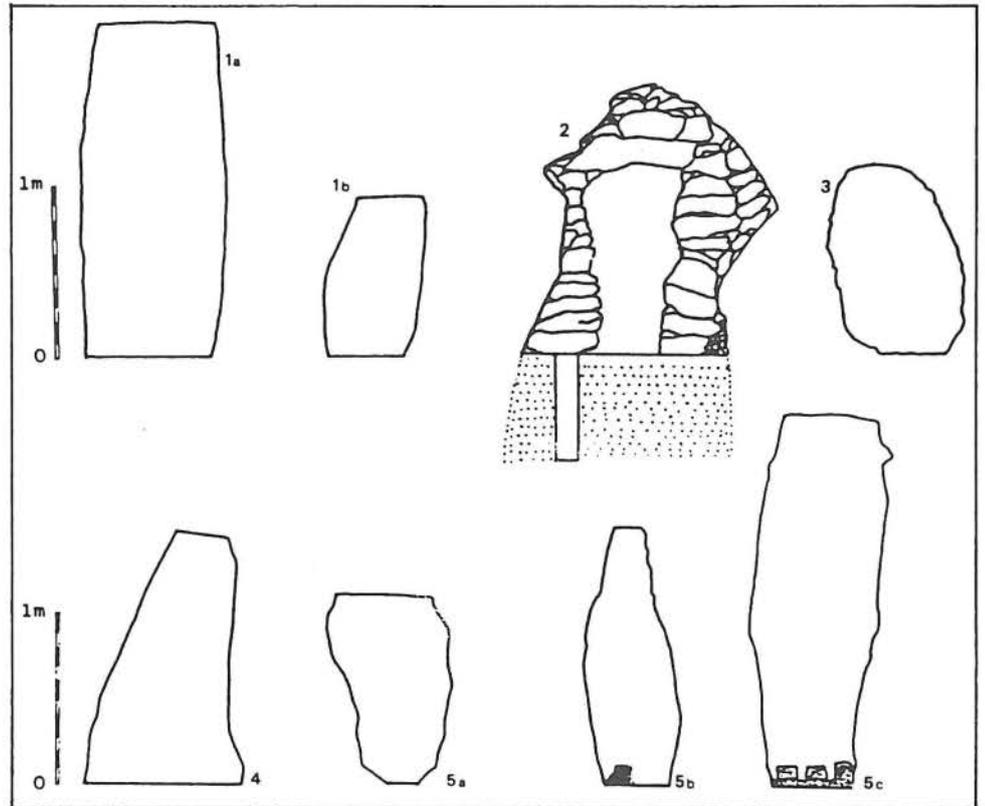


Planche 1 : Profils architecturaux de galeries supposées antérieures au XIX^e siècle

- 1) Mine de la Filature à La Croix-aux-Mines :
a) Travers-banc, H = 1,975 m. b) Sitzort, H = 0,915 m.
- 2) Mine Saint-Martin dans le val Saint-Philippe à Sainte-Marie-aux-Mines :
entrée, H = 1,1 m. ; l = 0,40 m.
- 3) Mine Sapin Vert dans le val Saint-Philippe à Sainte-Marie-aux-Mines :
travers-banc du niveau 17,4 : H = 1,1 m.
- 4) Mine berg-Armuth dans le val Saint-Philippe à Sainte-Marie-aux-Mines :
H = 1,515 m.
- 5) Mine Saint-Martin dans le val Saint-Philippe à Sainte-Marie-aux-Mines :
a) H = 1,1 m. ; b) H = 1,515 m. ; c) H = 2,18 m.

Encore faut-il pour cela qu'il soit rôdé aux pra-tiques de progression en milieu souterrain, c'est-à-dire qu'il soit spéléologue.

Très globalement, le district de Sainte-Marie-aux-Mines est divisé en trois secteurs correspondant à des données géologiques et historiques : le Neuenberg, l'Altenberg et le Versant lorrain.

L'Altenberg à son tour, de par la direction des filons qui le parcourent et les versants des vallons, se redécoupe en trois zones : le versant de Fertrupt au nord, le vallon de Saint-Philippe s'étirant du nord au sud et les mines de plomb de Saint-Pierre-sur-L'Hate au sud.

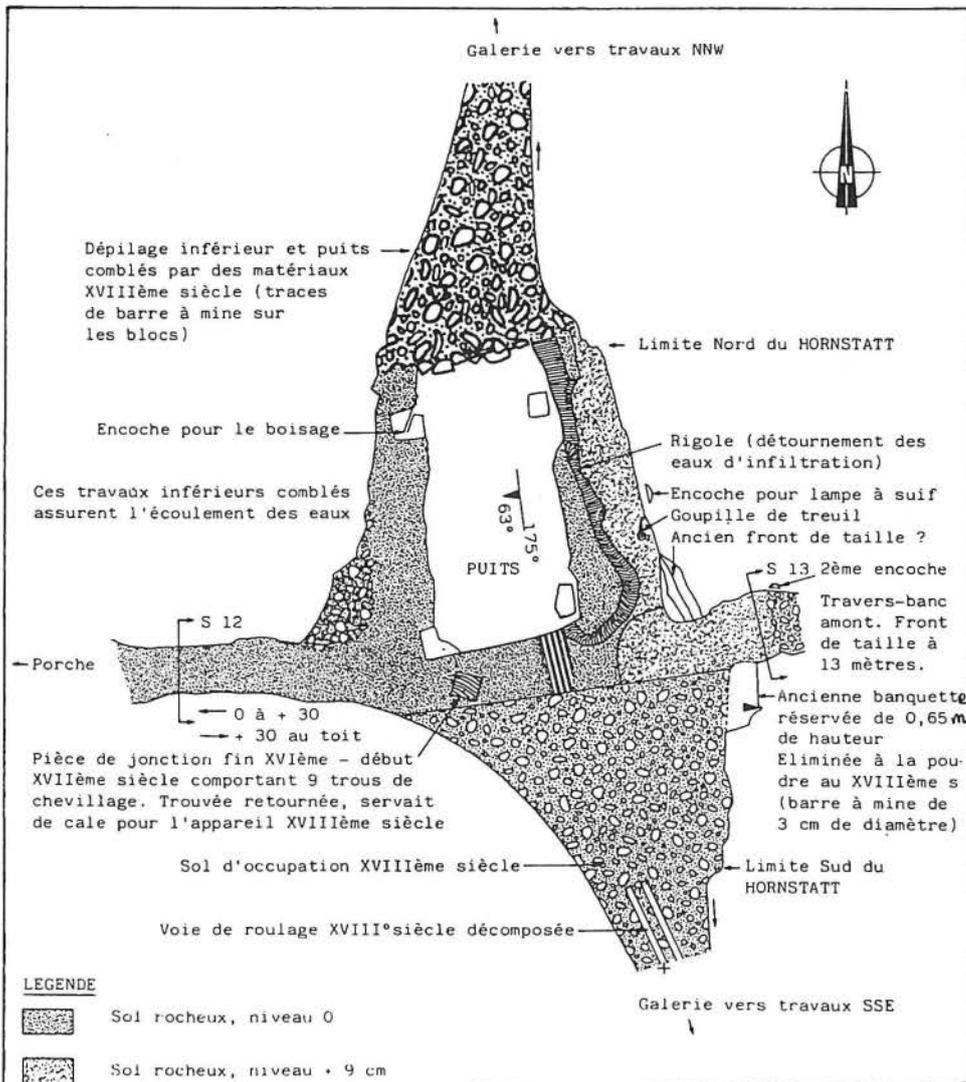
Nous ne présenterons ici que les travaux les plus récents et les plus conséquents qui ont été menés dans l'Altenberg, cette «vieille

montagne» qui connut la première le renou-veau de l'exploitation minière au XVI^e siècle.

LES MINES DE PLOMB ET LE PFAFFENLOCH (1)

Cette grande partie méridionale fit l'objet en 1982 d'une fouille programmée compre-nant les relevés des vestiges de surface et l'étude du vaste système des Mines de plomb. Le thème directeur de cette étude était de mettre en évidence l'évolution dynamique

(1) Pour ce paragraphe, nous avons emprunté toute la subs-tance à P. Fluck : «L'énigme du Pfaffenloch», rapport de fouil-les 1984.



et comment ?). Enfin, il a été établi avec certitude l'existence d'un «filon pfaffenloch» composé en apparence de deux branches qui divergent avant de toucher ou de recouper le filon Traugott, soit le principal axe filonien du vallon Saint-Philippe. C'est au voisinage du «croisement» de ces deux filons que se situerait la riche colonne de minerai qui fit jadis naître un conflit entre les exploitants du Vieux-Saint-Guillaume et ceux de «Bergarino»...

Le VAL SAINT-PHILIPPE, LA MINE SAPIN VERT

Le filon principal de l'Altenberg s'étire du nord au sud et correspond au vallon de Saint-Philippe. Les trois principales mines de ce vallon, Saint-Philippe, Sapin vert et Mont Armont atteignent rapidement des proportions considérables tant en extension horizontale que verticale. L'étude des sources écrites nous apprend beaucoup plus que cela : les travaux du XVI^e siècle ont parfois rencontré des ouvrages plus anciens.

Les auteurs confirment l'existence d'une exploitation médiévale sur le faisceau filonien de Saint-Philippe, comme en témoignent encore aujourd'hui les innombrables vestiges de travaux en surface : puits et dépilages effondrés. La cartographie de ces vestiges, permettant aussi l'ébauche d'une carte des filons est en cours. Elle devrait s'achever au printemps 1985 et s'ajouter aux relevés effectués par P. Fluck sur la partie méridionale de l'Altenberg.

Le Val Saint-Philippe a donc retenu toute notre attention depuis plusieurs années, mais l'ouverture d'une mine étant une entreprise aléatoire, les années 1980 à 1982 ne révélèrent dans ce secteur que 148 m de galeries, répartis sur trois chantiers. Chaque tentative d'ouverture de mine aboutissait effectivement à une exploitation, mais la roche à l'Altenberg

MINE "SAPIN VERT" PLAN AU SOL DU HORNSTATT

d'une exploitation conduite à travers six époques de notre histoire, sur une extension de 2,7 km. Une telle ampleur des travaux a fourni aux chercheurs B. Ancel et P. Fluck de multiples sujets d'études pluridisciplinaires en mettant l'accent sur la complémentarité de l'archéologie et des sciences de la terre.

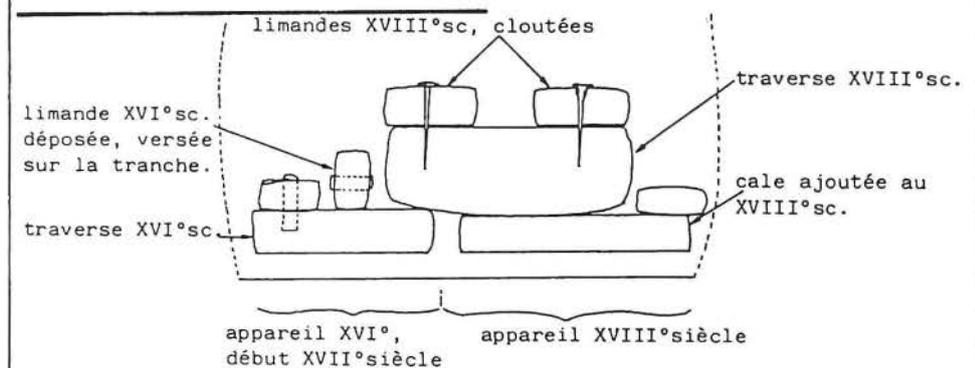
Dans l'impossibilité de poursuivre leur progression par les Mines de plomb et afin d'achever l'exploration du filon, l'équipe de P. Fluck et B. Ancel tenta d'accéder à ce réseau par un autre versant de la colline, comptant sur la correspondance altimétrique entre l'entrée présumée de la mine Pfaffenloch et les parties reculées du réseau des Mines de plomb.

Les tentatives d'ouverture de la mine dite Pfaffenloch occupèrent l'été 1984, plus de 100 tonnes de pierres furent déplacées à la main, 300 à la pelle mécanique. Après ces six tentatives d'ouverture, Pierre Fluck demande : «Mais où sont donc les mines ?».

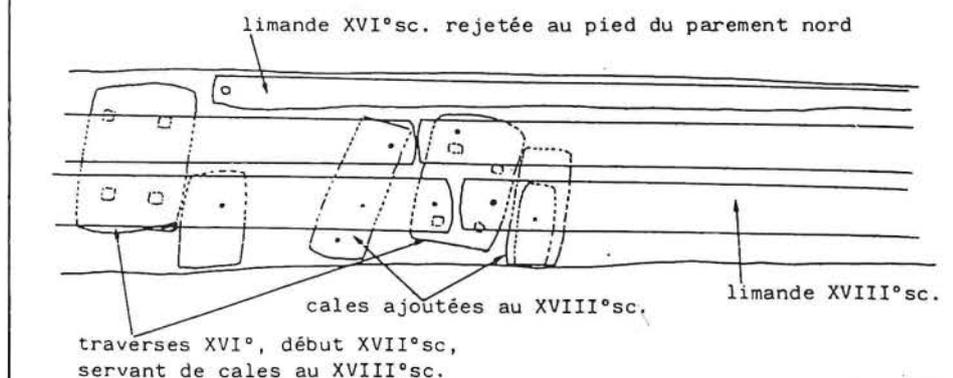
Le Pfaffenloch est donc bien une énigme (titre de son rapport de fouilles), car s'il n'a pu ouvrir la mine, il a pu mettre en évidence de nombreux éléments en rapport avec cette exploitation. D'abord, des haldes d'un type morphologique jusqu'alors inconnu à Sainte-Marie-aux-Mines, extra-plates, étirées en un glacis peu épais, puis des résidus de fonte du minerai (mais pourquoi fondait-on sur place,

Mine de Sapin-Vert. Travers-banc. Réemploi de la structure de roulage XVI^e-XVII^e siècle dans l'appareil XVIII^e siècle.

COUPE TRANSVERSALE station topographique V -1,42 m



PLAN station topographique X -3,92 m



étant beaucoup moins solide qu'au Neuenberg, des effondrements infranchissables arrêtaient à chaque fois notre progression.

Ces 143 m de galeries furent pourtant riches d'enseignement : à elle seule, la mine Saint-Martin (niveau altimétrique du Mont Armont) offrit à l'étude trois phases d'exploitation, dont une médiévale, un étayage de la galerie en pierres sèches au toit et aux parements, une architecture évolutive, des traces d'un faux plancher d'aérage et d'une exploitation au feu, enfin la fouille d'une voie de roulage.

C'est en 1983 que le Val Saint-Philippe se laissa enfin découvrir par la réouverture de la Mine Sapin vert.

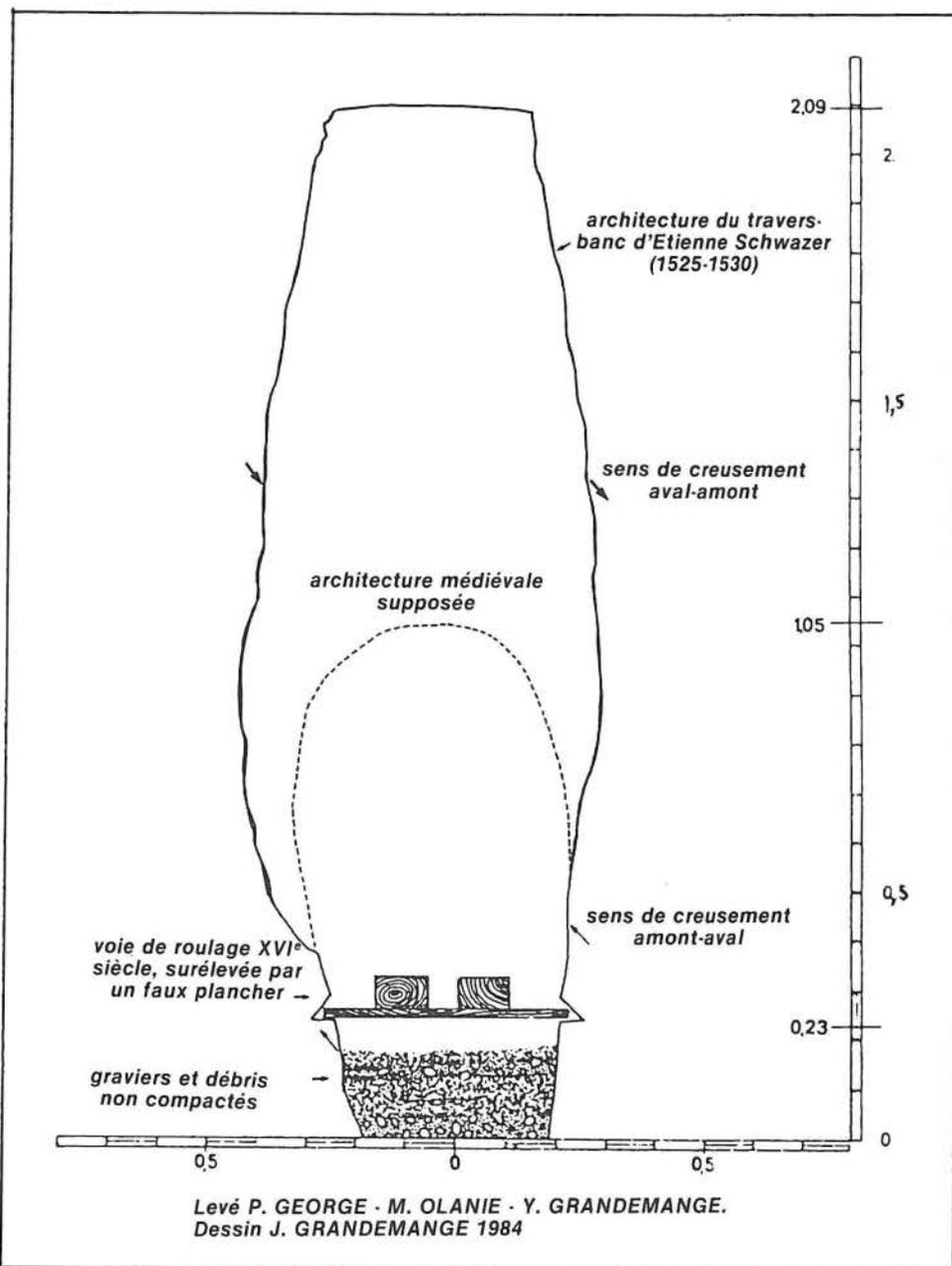
Cette mine, très importante — plus de 10 km par jonction avec les mines inférieures et supérieures d'après les archives — a été reconnue au 30.8.1984 sur un kilomètre; la suite et l'importance des travaux amont est attestée par la violence du courant d'air qui souffle au travers de l'éboulement terminal actuel.

Ce «réseau» minier est très complexe, car deux mines et trois époques tranchées d'exploitation se «télescopent» sur le faisceau filonien. De par les sources d'archives, nous nous attendions à deux phases distinctes d'exploitation : l'époque XVI-XVII^e siècles recoupée par des travaux du XVIII^e siècle. Nous avons, en outre, découvert une phase très certainement médiévale (VIII^e-XIII^e siècle), qui est exceptionnellement représentée par des ouvrages qui, de par leur architecture, sont uniques à Sainte-Marie-aux-Mines : en forme d'œuf, hautes de 0,95 à 1,3 m, taillées à la pointerolle, ces galeries sont semblables à celles de la mine antique de Castelmignier dans les Pyrénées (travaux de C. Dubatik).

L'étude détaillée de ces ouvrages exceptionnels doit impérativement déboucher sur une datation précise, susceptible de bouleverser nos connaissances actuelles sur les tout premiers travaux miniers du Val de Lièpvre. Dans l'état actuel des recherches, nous pouvons préciser que cette phase d'exploitation utilisait le travers banc et les techniques de dépilages montants et descendants, mais ne connaissait pas les installations de roulage qui d'ailleurs n'apparaissent dans les archives qu'au début du XV^e siècle. Enfin, les outils utilisés pour le percement de ces galeries étaient différents de ceux du XVI^e siècle : les traces résiduelles des coups d'outils sont d'une typologie autre que celle des périodes postérieures. Elles caractérisent bien cette première phase d'exploitation et nous sert maintenant de guide. C'est ainsi que nous avons pu constater l'importante extension tant horizontale que verticale de ces premiers travaux. Ils sont omniprésents sur toute l'étendue du faisceau filonien, tant en direction qu'en pendage... Pourtant, les éléments de datation susceptibles de resserrer la fourchette chronologique sont rares : aucun mobilier n'a été découvert dans ces travaux malgré une fouille méticuleuse. Nos espoirs reposent maintenant sur une planche épaisse, colorée en ocre... Le verdict est à la dendrochronologie !

La difficulté de l'étude de cette mine réside en fait dans la superposition et le croisement dans le plan spatial des différentes périodes d'exploitation qui ne s'effacent pas systématiquement en se succédant.

A titre d'exemple, le travers banc d'accès au filon, long de 94 m, dénoyé pour pouvoir être fouillé, a fourni les précisions suivantes : — creusé au début du XVI^e siècle «de par le jour», il avait été timidement amorcé «de par l'intérieur» à l'époque médiévale. Un écart altimétrique très faible au point de rencontre des travaux avait néanmoins obligé les mineurs du XVI^e siècle à installer un faux plancher dans les derniers mètres accédant au carrefour avec l'axe filonien;



ARCHITECTURE MINIERE

MINE SAPIN VERT

SECTION S 12

— leurs successeurs du XVIII^e siècle n'ont pas eu cette peine, profitant du comblement et du tassement des matériaux sur toute la longueur du travers banc. Ils ont purement et simplement posé leur voie de roulage sur l'installation du XVI^e siècle.

L'étude archéologique d'une mine ne peut pas toujours passer par les méthodes de fouilles dites «classiques», quoiqu'il soit souhaitable de les appliquer, quitte à les adapter le plus souvent possible. Il est parfois préférable, après des sondages, de recourir à une prospection électromagnétique afin d'aboutir à un inventaire exhaustif du mobilier métallique. Cette méthode a permis de mettre à jour, dans la mine de Sapin vert, 246 objets métalliques concernant essentiellement les installations de roulage, la découverte maîtresse dans cette série étant les premiers clous de guidage des chiens de mine, tout à fait comparables à la représentation donnée dans le «Schwazer Bergbuch» de 1556.

C'est grâce à ce type de prospection systématique que l'on peut arriver à découvrir les outils et les objets des mineurs qui, au cours des siècles, reflètent les évolutions techni-

ques. En outre, il faudrait aussi que le pillage des objets par détecteur ou aimant interposé cesse d'une façon ou d'une autre car, à chaque fois, ce sont des informations et des objets qui sont définitivement soustraits au patrimoine public.

En dépit de quelques aléas dus aux conditions particulièrement difficiles que réservent l'ouverture de certaines mines, le bilan des recherches en archéologie minière, bien qu'il ne compte que cinq années d'exercice officiel est largement positif. L'étude minutieuse de tous les éléments : architecture, traces d'outils, installations de roulages, équipement des puits, etc., en relation avec ce que veulent bien nous fournir les sources écrites et iconographiques, devra aboutir à une typologie et une datation précise des ouvrages qui risquent de bouleverser les acquis de l'histoire minière du Val de Lièpvre... La légende des moines-mineurs du VIII^e siècle n'est peut-être pas un miracle.

LES PUIITS DE MINE AU XVI^e SIECLE: ARCHITECTURE ET BOISAGE

Bruno ANCEL

25, rue des Bornes 67200 STRASBOURG

Les puits de mine permettent d'explorer le filon dans un plan vertical et de relier entre eux différents niveaux de galerie. Ce sont des ouvrages creusés du haut vers le bas qui possèdent un aménagement à leur sommet.

Leurs sections sont rectangulaires et ils sont toujours creusés sur un filon, une faille ou le croisement d'une faille et d'un filon. Leur pendage dépend de celui de l'accident suivi. Les puits sont souvent regroupés en «zones de puits», superposés et légèrement décalés.

Ces zones constituent ainsi des axes verticaux privilégiés de la circulation dans la mine.

Le sommet d'un puits est aménagé en salle de manutention (hornstatt). Ces hornstats consistent en un élargissement d'une galerie, à partir duquel est creusé le puits, et dont l'espace permet l'installation et la manipulation d'un treuil. Le puits peut y occuper une position centrale et être bordé par deux margelles souvent étroites, ou être rejeté sur le côté, plus ou moins encastré dans la paroi du hornstatt et bordé par une seule margelle assez large. Au sommet et dans le puits, il existe des encoches taillées dans la roche destinées à recevoir les poutres transversales qui arment le boisage. Le cadre sommital était destiné à soutenir un treuil mû par une ou deux manivelles. Lorsque la place manque, on observe au niveau de ces manivelles des niches verticales taillées dans la paroi du hornstatt (fig. 1).

Pendant l'exploitation des mines tous ces puits étaient boisés, mais depuis le XVI^e siècle ces boisages se sont généralement effondrés et sublimés. Seuls les puits inondés sont restés à peu près intacts. Lors de fouilles archéologiques à Sainte-Marie-aux-Mines, 3 exemples de puits boisés ont été étudiés.

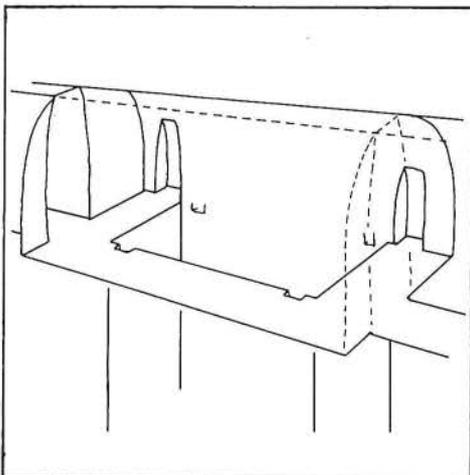


Fig. 1. Schéma d'un hornstatt de puits au XVI^e siècle : salle de manutention du treuil.

En 1982, dans la mine de Plomb inférieure (Altenberg), a été découvert au cœur de la montagne, à plus d'un kilomètre de l'entrée, un petit puits inondé recouvert de planches. Son dégagement a permis l'étude de son boisage sommital, parfaitement conservé. La chaîne, l'axe et la manivelle du treuil furent découverts à proximité. Ce puits fut par la suite abîmé par des vandales.

En 1983, dans la mine Glückauf (Neuenberg), un effondrement fortuit donne accès à un vaste réseau inférieur. A la cote - 42 se trouve un grand puits, probablement inondé à l'arrêt de l'exploitation XVI^e siècle et dénoyé par la suite lors de l'exploitation XVIII^e siècle. De ce fait son boisage est assez bien conservé et a pu être étudié sur toute la hauteur du puits.

Fin 1984, la réouverture de la mine Wurtzelmauerstollen à la Goutte des Pommes (versant lorrain) a livré, à 120 m de l'entrée, un très beau puits inondé. Son dénoyage par pompage sur une dizaine de mètres de hauteur, effectué dans le cadre d'une fouille de sauvetage, a permis l'étude d'un très bel exemple de boisage, très bien conservé (fig. 2).

Tous ces boisages étudiés ont eu pour seule fonction d'équiper le puits pour le passage des mineurs et du minerai, et non pas de renforcer les parois. Des poutres transversales calées dans des encoches supportent des poutres longitudinales où sont fixées échelles, planches de glissement des cuveaux (la paroi du puits étant trop rugueuse) et poutrelles de séparation (pour éviter l'emmêlement des chaînes). Cette armature définit un petit compartiment de circulation des mineurs, un vaste compartiment de descente et de remontée des cuveaux, et parfois, un conduit d'aéragé étanchéifié par des planches et de l'argile.

Au sommet du puits, deux montants fichés dans les poutres transversales du cadre sommital, soutenaient le tambour du treuil (aujourd'hui disparu car il s'est dégradé hors de l'eau). Ce dernier comportait à chaque extrémité un axe en fer solidement fiché dans le bois. Une ou deux manivelles assuraient la remontée et la descente simultanée de deux cuveaux comme le montre l'iconographie minière.

L'assemblage de tous ces éléments en bois est relativement simple et comporte peu de pièces métalliques de fixation : des clous pour fixer les planches, et des crochets pour les échelles. A l'échelle d'un puits, un grand nombre de pièces de bois ont des dimensions standardisées. Seules quelques pièces, comme les poutres transversales, ont subi des réajustements «in situ».

Ainsi il apparaît qu'au XVI^e siècle l'équipement d'un puits est une opération relativement simple. Le dispositif est standardisé et

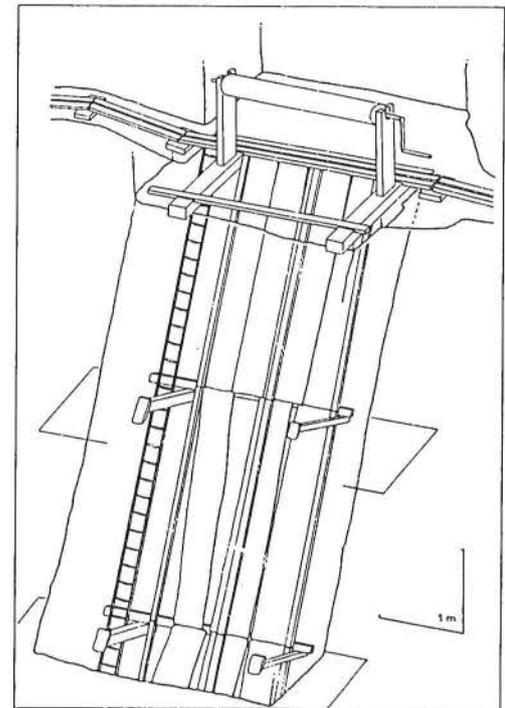


Fig. 2. Reconstitution d'un boisage de puits au XVI^e siècle : exemple de la mine Wurtzelmauerstollen.

facilement adaptable à la configuration de chaque puits. Des mineurs-charpentiers ont équipé de cette façon des centaines de puits dans le district minier de Sainte-Marie-aux-Mines.

Bruno ANCEL

BIBLIOGRAPHIE

FLUCH (P.) et ANCEL (B.) - 1984 - Rapport de fouille sur les Mines de Plomb, 1982. *Pierres et Terre*, n° 28, p. 3-135.

ANCEL (B.) et FLUCK (P.) - 1984 - Le filon Saint Louis au Neuenberg : caractères et évolution dynamique d'une exploitation minière de la seconde moitié du XVI^e siècle. *Pierres et Terre*, n° hors série 2, 138 pp.

ANCEL (B.) et FLUCK (P.) - 1985 - La mine Wurtzelmauerstollen et le secteur de Saint Pierremont Ouest, Versant Lorrain. Rapport de sauvetage archéologique. Sous presse.

LE PROBLEME DE L'EXHAURE DANS LES MINES VOSGIENNES

Bernard BOHLY
Pierre FLUCK*
François LIEBELIN

* Institut de géologie, 1, rue Blessig
67084 STRASBOURG Cédex

Cette étude est présentée sous une forme quelque peu exhaustive, que nous avons préférée à une présentation condensée. La raison en est son caractère totalement inédit. Il s'agit en effet de la première tentative de synthèse sur ce problème de l'exhaure dans les Vosges. Problème capital, car l'eau, dès les époques les plus reculées, fut la hantise des mineurs. La figure 1 aidera à situer les nombreuses localités minières citées.

On peut considérer l'exhaure comme l'ensemble des solutions appliquées au problème de l'accumulation des eaux dans les mines. On verra que cet aspect de la technique minière a fortement conditionné l'histoire de cette activité depuis ses origines.

A l'époque médiévale, les exploitations vosgiennes étaient menées aux parties affleurantes de filons au moyen de puits («Pingen» en allemand). Des alignements de tels puits, accompagnés chacun de son déblai, ont été retrouvés dans la plupart des districts importants de la région et, malgré l'absence de fouilles rigoureuses, on admet qu'ils marquent généralement cette première phase des travaux. L'inconvénient majeur de ce système simple était celui de l'accumulation des eaux de ruissellement qu'il fallait vider à l'aide de treuils et de seaux, manipulés par une main d'œuvre coûteuse; les frais ainsi occasionnés diminuaient puis annulaient rapidement la rentabilité des exploitations au fur et à mesure de leur avancement.

Ainsi, ce problème aurait été à l'origine de l'abandon de ces premières mines après le XIII^e siècle (?) à Sainte-Marie-aux-Mines.

On connaît cependant de plus en plus dans les Vosges d'ouvrages médiévaux par galeries, telles à Sainte-Marie-aux-Mines des portions des réseaux Saint Jacques-Lorraine, Sapin Vert (fouillé en 1983, 84, 85), Cep de Vigne et Saint Martin* (fouillé en 1981), ou encore à Munster la galerie dite «Auf der Eyl» (appellation spéléo) au Silberwald, qui décrit un étonnant tour de spire sur elle-même en gardant une forte pente montante (jusqu'à 12 degrés!), ce qui ne lui fait gagner que... 8 mètres en hauteur d'exhaure (au lieu de 20 mètres potentiels), ceci pour un parcours de 124 mètres qui aboutit à un point situé à... 57 mètres seulement de l'entrée.

Vers la fin du Moyen Age, la galerie (d'abord basse et de section ovoïde) revêt un plus haut degré de technicité : sa pente se rapproche de la pente idéale, sa section devient subrectangulaire (beaux exemples à la Croix-aux-Mines, Travers-Bancs de la Filature, et à Sainte-Marie-aux-Mines, Vieux Rimpy, non datés; peut-être aussi mines dans les vallées de Guebwiller et de Masevaux). De telles galeries fréquemment à travers-bancs avaient déjà fonction de galeries d'écoulement.

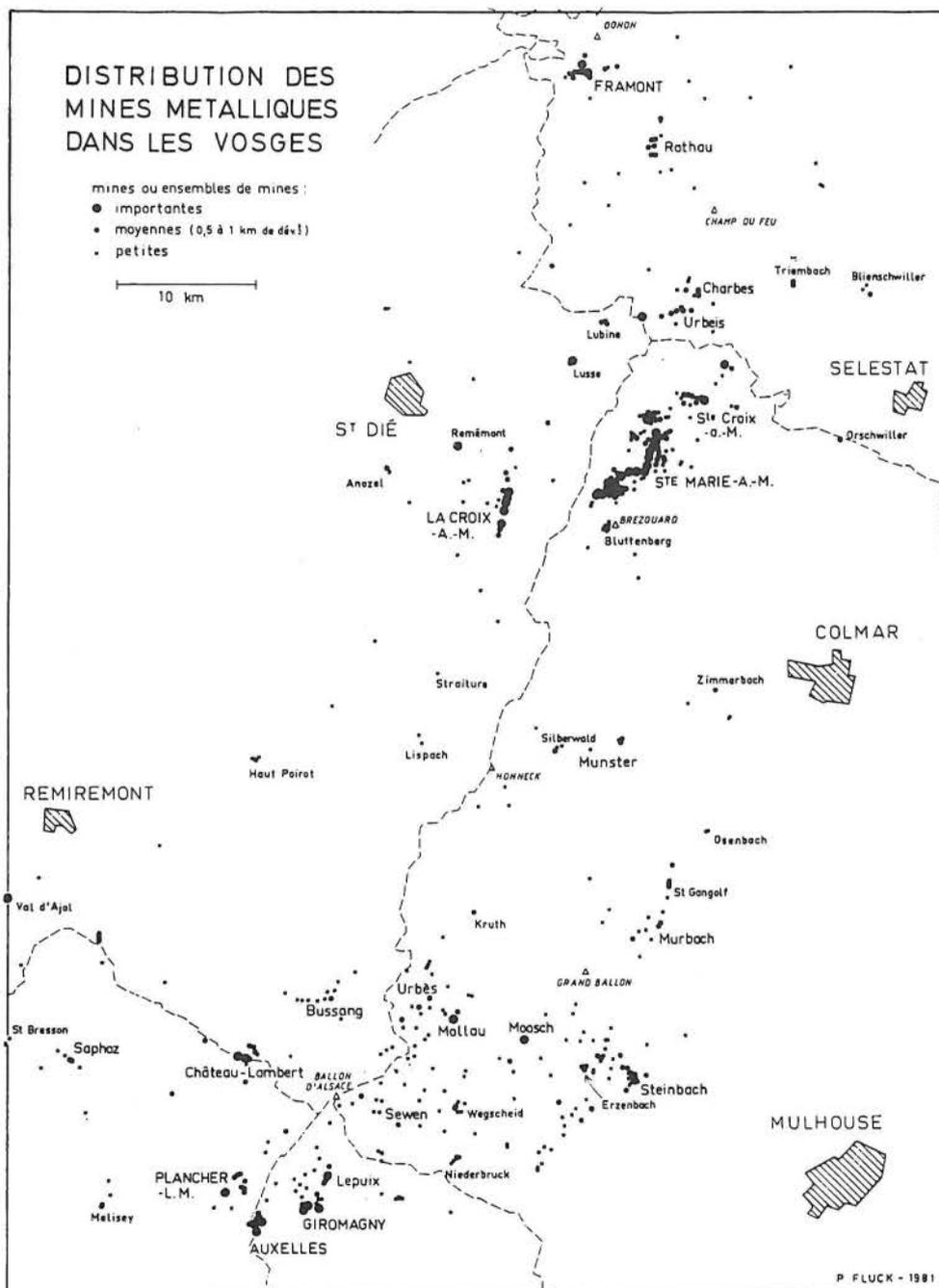


Fig. 1. Distribution des mines métalliques dans les Vosges.

A la fin du XV^e siècle, on remarque un véritable renouveau de l'activité minière, marquée dans les années 1470 par la multiplication des demandes de concessions. Cette reprise a été rendue possible par l'application de solutions

nouvelles au problème de l'exhaure, importées des grands districts de l'Europe Centrale (Saxe et Tyrol) : le travers-bancs d'écoulement (Erbstollen en allemand) et les systèmes de pompage.

* Ces noms sont tous des appellations ultérieures.

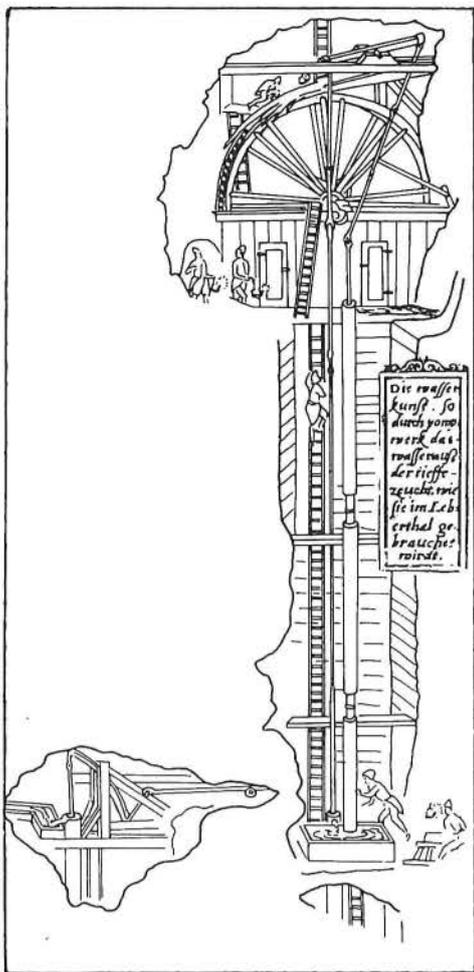


Fig. 2. La roue de la Lehenchaft à Sainte-Marie-aux-Mines. Extrait d'un «Paysage minier» de la fin du XVI^e siècle (Staatsgalerie Stuttgart), montrant des ouvertures «éclatées» dans la montagne. Celle de gauche figure le mode de transmission du mouvement horizontal au mouvement vertical des tirants des pistons. Gravure publiée dans «Der Anschnitt», 1982, et dans «Pierres et Terre» N° 25/26. Il s'agit de l'une des deux représentations iconographiques de cette roue.

1. LE TRAVERS-BANCS D'ÉCOULEMENT

Il s'agit d'une galerie creusée en zone stérile à partir du point le plus bas de la vallée (si possible) vers la base des zones exploitées, destinée à évacuer les eaux circulant dans l'ensemble des travaux par simple gravité. Ils avaient une pente minimale oscillant autour de 1 à 2°. Ce type de galerie, qui représentait souvent un investissement assez lourd supporté parfois par les concessionnaires de plusieurs mines à la fois, a été observé dans la quasi-totalité des districts vosgiens. Du nord au sud, nous signalerons :

- l'hypothétique «mine de Derlingoult» à Framont;
- deux erbstollen à Rothau et à Ranrupt (mines de fer);
- l'erbstollen à l'Altenberg à Sainte-Marie-aux-Mines, commencé en 1527 et qui développe 4 000 toises en trois branches;
- l'erbstollen au Neuenberg à Sainte-Marie-aux-Mines qui, commencé en 1549, draine la partie de ce secteur appelée Warmenberg (longueur env. 1 150 m);
- toujours à Sainte-Marie-aux-Mines, de nombreuses autres galeries qui remplissent un rôle d'erbstollen sans forcément avoir été ainsi nommées : à Musloch (longueur 650 m), au Bois de Saint Pierremont (plusieurs, dont celle dite de la Fontaine des Chouettes fouillée en 1983, longueur 355 m), sous la ville de Sainte-Marie-aux-Mines (la fameuse «mine Réber» fouillée en 1984, erbstollen supposé

de Saint Barthélémy, longueur 250 m), au pied du coteau de Saint-Pierre-sur-l'Hâte (erbstollen inachevé du filon Saint Paul, appelé plus tard Fürs tenstollen), au Rauenthal (A la Couronne d'Or, plus tard Tiefstollen, longueur 1500 m), à la Petite-Lièpvre (la future Leere Tasche), au Bluttonberg (Storckenbacher Stollen);

- la galerie dite de la Croix à La Croix-aux-Mines, qui fut relevée au XVIII^e siècle sur 1 426 mètres sans qu'en soient atteintes les limites;
- des erbstollen à Lusse, et à Remémont (galerie prise au bord de la Meurthe);
- la galerie dite «Tiergarten» (appellation spéléo) au Silberwald, poussée très au-dessous de la capricieuse «Auf der Eyl» (v. plus haut);
- les galeries dites «la Stolle» (langage populaire) à Bussang et au Thillot;
- la galerie de base du quartier de la Grande Montagne à Plancher-les-Mines;
- l'Erbstollen d'Auxelles-haut, dans le quartier Gesellschaft (longueur 800 m).

2. LES POMPES À BRAS

Elles font leur apparition à une date indéterminée, au début peut-être du XVI^e siècle. Les planches du «De re Metallica» d'AGRICOLA nous montrent plusieurs types de pompes utilisées dans les mines de Saxe vers 1550. Il s'agit toujours de pompes aspirantes et foulantes.

La pompe aspirante seule devrait en théorie pouvoir remonter une colonne d'eau de 10 mètres, car la pression atmosphérique a pour valeur 1 kg par cm²; autrement dit la pression atmosphérique peut soulever une colonne d'eau de 1 cm² de base et pesant 1 kg, c'est-à-dire dont la hauteur est 1000 cm ou 10 m. Mais au XVI^e siècle l'étanchéité entre piston et cylindre était souvent des plus aléatoires. La colonne d'eau ne s'élevait vraisemblablement qu'à 5 ou 6 mètres, par contre le piston dans son mouvement ascendant pouvait refouler l'eau sur une hauteur bien supérieure.

Description d'une pompe à bras

Deux gros tuyaux de sapin d'environ 10 à 12 pieds de longueur chacun, d'un diamètre extérieur d'un pied, assemblés par un «schliessring» (collier en fer blanc), frettés à chaque extrémité et au milieu pour éviter l'éclate-

ment, constituaient le cylindre. La longueur totale d'une pompe pouvait d'après Agricola mesurer au maximum 24 pieds (environ 7,68 m).

Un piston «kolben» en bois, parfois en cuir, percé de cinq à six trous pouvant être obturés par une lamelle de cuir, faisait office de soupape «ventil» lequel piston était fixé à une longue tige de bois ou fer «kolbenstange» (petite perche d'engin), longue de plus de 4 m pour une pompe de 7,68 m.

Une deuxième soupape, semblable à celle du piston était fixée directement sur la crépine «saugkorb» située à la base du tuyau d'aspiration.

Pour faire fonctionner une telle pompe on descendait d'abord le piston tout au fond du cylindre puis on amorçait artificiellement en remplissant d'eau la partie supérieure du corps. Quand le piston remontait, le cuir de la soupape de crépine se soulevait et l'eau aspirée montait dans le corps de pompe en même temps que la soupape du piston se refermait et permettait ainsi le refoulement du liquide situé au-dessus du piston.

Ces pompes à bras, fort pénibles à manœuvrer immobilisaient une main d'œuvre importante qu'il fallait relayer de 8 h en 8 h pour assurer un travail efficace.

Ce sont des pompes à bras qui équipaient les puits de Rumpump à Sainte-Marie-aux-Mines. Celles-ci plongeaient vers 1550 déjà jusqu'à 290 mètres au-dessous du niveau de l'erbstollen! Dans la mine Lingoutte au Neuenberg furent retrouvés en 1971 divers éléments d'une pompe à bras, dont un clapet en cuir.

3. LES MACHINES HYDRAULIQUES AU XVI^e siècle

Au XVI^e siècle, les machines hydrauliques sont toujours désignées par les termes : «wasserkunst», «kuntswerk» ou «kunstrad». A partir de 1648 le mot «kunst» est francisé, une machine hydraulique devient un «engin», un kuntmeister : un maître d'engin (responsable de l'entretien et du bon fonctionnement de la machine).

Un «kunst» couramment utilisé dans les mines des «Monts Métallifères» vers 1555,

Fig. 3. Mine Saint Jean d'Auxelles. La machine d'exhaure de Dupin en 1714. Elle met en mouvement 18 pompes qui élèvent l'eau sur la hauteur de 235 mètres. On n'indique pas l'échelle, les proportions n'étant pas respectées (v. texte).

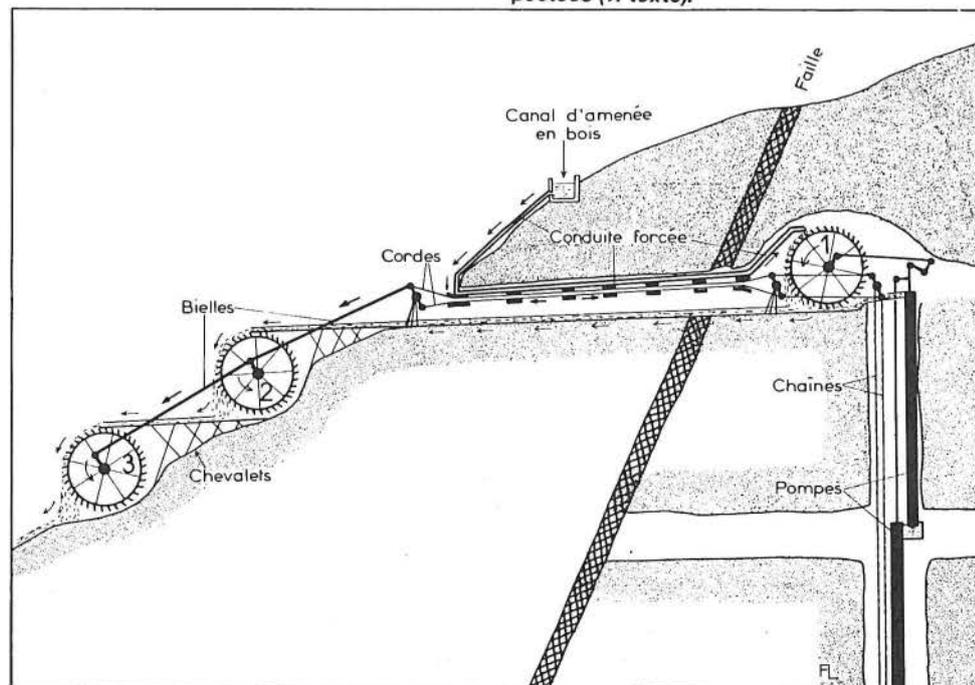
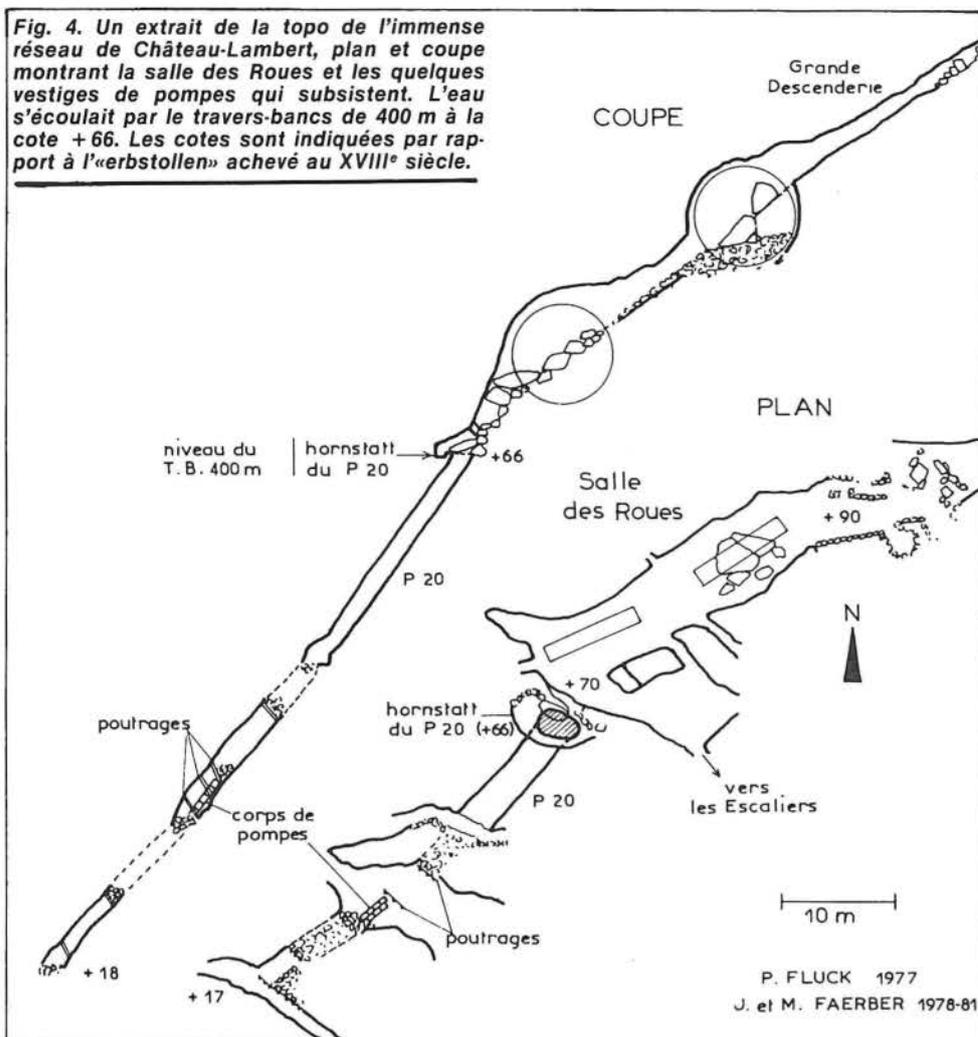


Fig. 4. Un extrait de la topo de l'immense réseau de Château-Lambert, plan et coupe montrant la salle des Roues et les quelques vestiges de pompes qui subsistent. L'eau s'écoulait par le travers-bancs de 400 m à la cote +66. Les cotes sont indiquées par rapport à l'«*erbstollen*» achevé au XVIII^e siècle.



décrit par Agricola livre VI, était mis en mouvement par une roue hydraulique d'environ 4,80 m de diamètre couplée à une manivelle (ou horne) ayant pour fonction de transformer le mouvement circulaire en mouvement linéaire. Cette manivelle (rayon environ 1,90 m) actionnait trois bielles ou «gestänge» (perches d'engin) mettant en mouvement trois pompes superposées «pumpensatz». L'eau remontée par la pompe inférieure se déversait dans un réservoir «*wasserkasten*» (ou sumpf) qui alimentait la pompe suivante... Une batterie de trois pompes montées en série pouvait élever l'eau d'un puits.

Dans les mines vosgiennes, les machines hydrauliques ont bénéficié de la longue expérience que leurs constructeurs avaient acquise en Autriche ou en Saxe.

Nous décrivons d'abord les principales machines hydrauliques dans l'ordre approximatif de leur apparition, puis dans l'ordre géographique. La plus ancienne serait celle de **Wegscheid**, d'après un document des Archives d'Innsbruck retranscrit par STOLZ (1939). Sur ce site, une mine nommée «*Der Reichberg*» dépensa en 3 ans, avant 1522, la somme de 2843 florins en grande partie pour la construction d'une machine hydraulique. C'est probablement dans ces mêmes puits, qui descendent à 80 mètres sous le niveau du ruisseau, que les exploitants modernes de la mine Brandeskopf (vers 1907) retrouvèrent en parfait état les corps de pompes et les pistons.

A **Sainte-Marie-aux-Mines**, la célèbre roue de la **Lehenschafft** (ou **Fundgrube Saint Guillaume**) date d'avant 1563 (c'est la seule certitude !). Sans doute était-elle placée au niveau de l'*erbstollen*, soit 39 mètres au-dessous du niveau de l'entrée, c'est-à-dire du ruisseau de Fertrupt. Les pompes élevalent les eaux sur une hauteur d'environ 140 mètres. Si le diam-

tre de la roue nous est inconnu, nous possédons cependant deux représentations iconographiques de cet engin (fig. 2).

Avant 1586, une deuxième roue fut adjointe à la première (rapport de Hans Hipp).

A **Giromagny**, le premier «*wasserkunst*» fut construit en 1566 à **Pfennigthurm**. Une roue de diamètre inconnu mettait en mouvement une dizaine de pompes, qui permettent en plus de dénoyer trois mines voisines. L'alimentation en eau s'avérant particulièrement difficile, on se résolut par la suite à aménager un canal en terre et bois.

Deux autres machines hydrauliques furent construites à **Giromagny**. Celle du **Deutschgrund** (fin du XVI^e siècle ?) «descendait» (en 1608) à 175 mètres; elle est mise en mouvement par une roue de 9,60 m abritée dans une salle souterraine («*Radstube*», récemment explorée). En 1608 et 1632, pour alimenter le canal dérivé de la **Beucinière**, on doit aménager trois étangs de retenue. En 1633, la machine occupe en permanence un «*Kuntmeister*» et 5 valets. Entretien à grands frais jusqu'en 1637, elle est alors entièrement démontée, ses ferrements vendus.

La machine de **Gesellschaft**, et de ses voisines l'*erbstollen* et **Saint Nicolas**, fut terminée peu avant 1585. En 1608, il faut reconstruire 7 à 8 pompes et mettre en place une centaine de lourds tuyaux de bois (conduite forcée), édifier également deux réservoirs dans la montagne (étangs **Boigeol** actuels). La mine est alors profonde d'une centaine de klaffter (175 m), mais nous ne savons quel niveau a été pris comme référence. La machinerie, d'une technologie tout à fait particulière pour surmonter le handicap dû au faible débit des deux ruisseaux d'**Auxelles-Haut**, nécessitait 5 roues hydrauliques «placées en cascade», chacune récupérant l'eau de la roue supérieure; lesquelles, vu leur faible diamètre

tiraient seulement 9 «perches d'engin» c'est-à-dire 9 pompes.

En 1632, un «*kuntmeister*» et 5 valets suffisaient à peine à entretenir l'engin. L'année suivante une révision complète s'impose, mais la guerre empêche de trouver les fonds nécessaires, la mine est alors abandonnée définitivement et les canaux récupérés pour être dérivés sur **Saint Jean**.

A **Moosch** (vallée de **Saint-Amarin**), les mineurs du XVI^e siècle, mais sans doute aussi ceux du XVII^e siècle, descendirent jusqu'à 160 mètres sous le niveau du ruisseau, très probablement par le moyen d'une machine hydraulique. Les exploitants modernes recoupèrent à diverses reprises ces vieux travaux qui inondèrent aussitôt leur puits.

A **Sainte-Marie-aux-Mines** en dehors de la célèbre **Fundgrube** (v. plus haut), des «*wasserkunst*» ont été installés à la fin du XVI^e siècle (ou au début du XVII^e siècle) dans les mines **Saint Jacques** au **Backoffen** (avant 1597, cette machine fonctionnant jusqu'en 1602) et **Saint Philippe** à **Fertrupt** (1600), ainsi qu'au **Neuenberg** à **Saint Jean** (signalé en 1630, asséchant une colonne de 7 puits sur une profondeur de 150 à 200 mètres) et à la **Maison de Saxe** (mine Chrétien du XVIII^e siècle; au moins 3 puits), enfin en versant lorrain à **Sainte Anne** à **Musloch**.

A **Urbeis** se trouvait une machine hydraulique placée dans une mine du nom de **Notre-Dame**: un rapport de 1578 en fait état. **DE DIETRICH** (1785) signale cette machine «adaptée par les anciens», précisant qu'au XVIII^e siècle, un nommé **M. POMMEL** en fait tirer les eaux à **bras d'homme**. La mine s'appelle alors **Saint Nicolas**. C'est très probablement la même qui sera ouverte en 1894 sous le nom de **Donner**. Elle ne put prospérer en raison de l'affluence des eaux.

4. LES SYSTEMES D'EXHAURE AU XVII^e siècle

Le remplacement progressif des cylindres de bois par des corps de cuivre améliora notablement le rendement des machines au XVII^e siècle (avant 1624 à **Saint Pierre** à **Giromagny**). En 1698 p. ex., une pompe manuelle avec corps de cuivre, placée dans un puisard de **Saint Jean d'Auxelles-Haut**, atteignait la hauteur de 5 toises (env. 9 mètres).

Les machines hydrauliques les plus remarquables au XVII^e siècle, époque d'indigence pour la plupart des mines vosgiennes, sont celles de **Pfennigthurm** et de **Saint Pierre** à **Giromagny**, de **Saint Jean d'Auxelles** et de **Château-Lambert**.

A **Pfennigthurm**, à la place de l'ancien système à une roue, on trouve en 1656 deux roues actionnant 13 pompes, le tout étant mû par les eaux de canaux issues de 5 étangs, auxquelles doit encore s'ajouter, pour pallier le manque d'eau l'été, une dérivation de la **Savoureuse** au moyen d'un canal de 7,38 km.

En 1716 à la destruction de la machine, les deux roues de 9,60 m de diamètre chacune actionnent 22 pompes élévatoires sur la hauteur de 342 mètres.

A **Saint Pierre** (**Giromagny**) se trouvent deux roues de 9,60 m de diamètre, dont l'une à l'intérieur de la mine à 15 m sous le niveau de l'entrée; elles actionnent 22 pompes (en bois et cuivre) sur la hauteur record de 382 mètres. L'installation de **Saint Jean d'Auxelles** est un véritable monument dans l'art de l'exhaure. A partir de 1610, les travaux s'étendent sous le travers-bancs inférieur (cote 600) et l'épuisement des eaux était exécuté par une batterie de pompes à bras sur une hauteur de 3 puits, immobilisant une main d'œuvre considérable.

En 1635, on dérive les canaux de la mine **Gesellschaft** défaillante (v. plus haut). Deux roues de 9,20 m de diamètre placées en «cascade» à la sortie de la galerie de roulage

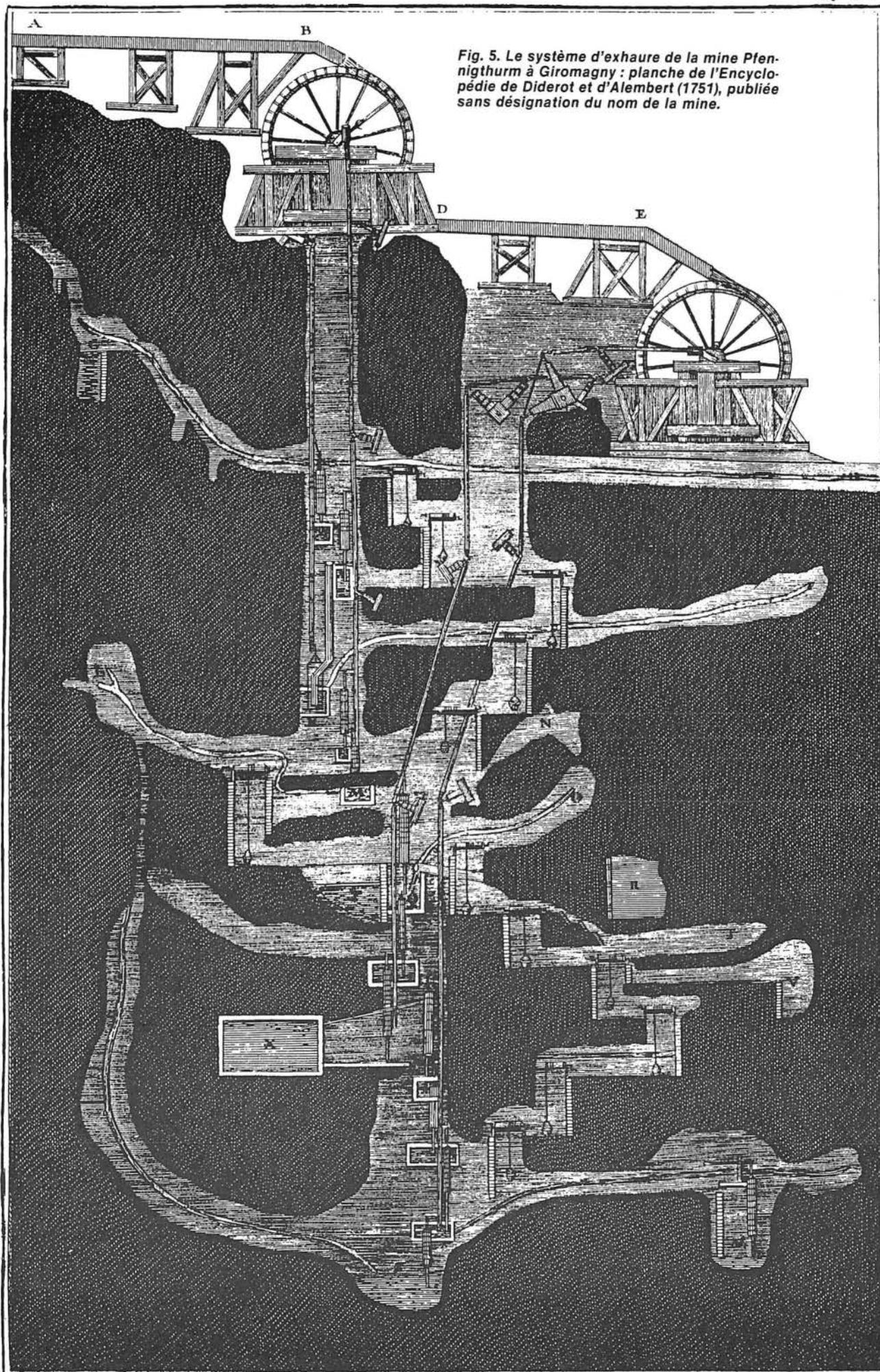


Fig. 5. Le système d'exhaure de la mine Pfen-nigthurm à Giromagny : planche de l'Encyclo-pédie de Diderot et d'Alembert (1751), publiée sans désignation du nom de la mine.

Benard fecit.

Minéralogie, disposition des Machines servant aux Epuisements

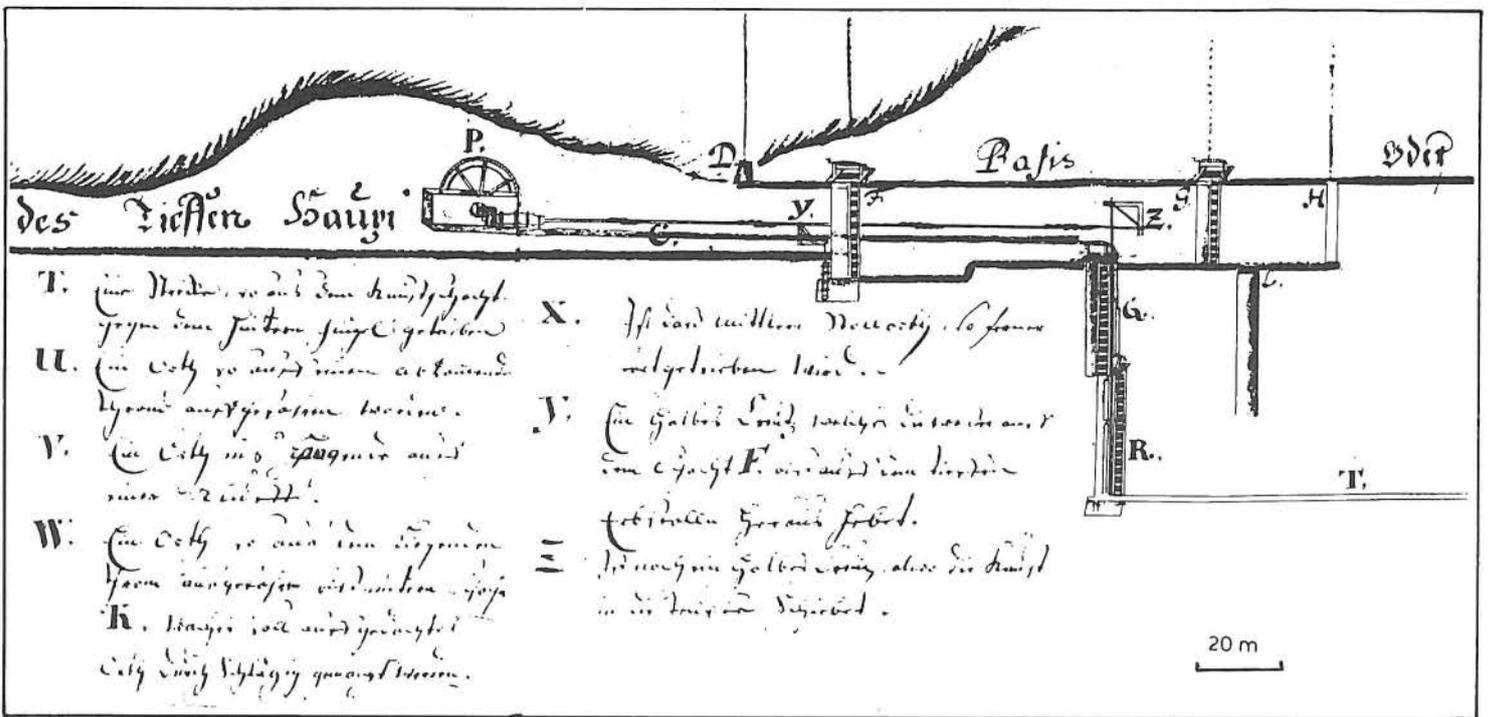


Fig. 6. Le système d'exhaure à Musloch : un extrait du plan polychrome de Michael Köhlem, 1740. On y voit la roue P placée dans une chambre taillée dans le roc, les tirants horizontaux, les triangles de transmission Y et Z et les pompes dans les puits Q et R.

s'avèrent à peine suffisantes en 1656 à remonter l'eau des 5 puits alors existants. Une bonne partie de l'énergie est consommée inutilement dans une multitude de renvois et balanciers nécessaires pour arriver aux puits d'exhaure (plus de 200 mètres).

Dès 1669, les entrepreneurs menacent d'abandonner les travaux, d'autant plus qu'il est pour eux moins coûteux de s'approvisionner en plomb d'affinage en provenance de Cologne. Mais faire cesser cette mine, c'est signer à court terme l'arrêt de mort de l'exploitation resemontoise : on le vit bien en 1674-75, lorsque les communications avec l'Alsace et l'Allemagne interrompues par faits de guerre, obligent les fondeurs à éteindre leur fourneau, faute de plomb d'affinage.

Aussi en 1680, le prévôt des mines Jacques Dupin va se révéler un technicien averti en faisant construire une machine unique en son genre, et qui coûtera pas moins de 9000 livres. Une roue de 9,50 m de diamètre est placée dans une chambre spéciale creusée à la «recette» du premier puits d'exhaure. Une conduite forcée en bois de sapin d'un pied de diamètre extérieur amène l'eau sur la roue, en suivant la galerie qui a dû être retaillée dans les courbes très prononcées. Un canal de fuite situé à la partie inférieure de la galerie évacue à l'extérieur les eaux et les déverse sur une autre roue qui «aide» la première à l'aide de cordes.

Vers 1702, cette machine étant devenue insuffisante, on lui adjoint une troisième roue à l'extérieur (fig. 3). En profondeur, les travaux ont pu ainsi se développer sur la hauteur de 235 mètres au moyen de 18 pompes. Il est possible à l'heure actuelle de visiter la salle qui contenait la roue intérieure.

En 1716, l'exploitation de toutes les mines du Rosemont ayant cessé, la machinerie fut démontée et vendue.

A **Château-Lambert**, une machine d'exhaure à deux roues superposées (d'environ 9 mètres de diamètre) fut construite aux environs de 1610 au cœur de la montagne. La salle qui renfermait ces roues a été redécouverte en 1977 (fig. 4), ainsi qu'un réseau de puits inclinés renfermant des vestiges de pompes. L'eau nécessaire était stockée dans 5 étangs, dont

4 placés en chapelet vers la crête de la montagne; une canalisation en sapin longue de 1 kilomètre, supportée par des chevalets à la traversée de zones déprimées, l'amenait à l'orifice supérieur d'une longue descenderie au pied de laquelle se trouvaient les roues.

Celles-ci actionnaient 10 corps de pompe en cuivre «plongeant» dans 2 puits superposés. L'eau était évacuée par la galerie Saint Georges, et servait ensuite à d'autres installations. Ce n'est qu'au XVIII^e siècle qu'on achèvera l'«**arbestoll**» (erbstollen!) pourtant commencé de très longue date (BOHLY, 1983).

Enfin, il est à signaler que d'autres systèmes de pompes hydrauliques étaient installés aux XVI^e et XVII^e siècles à **Plancher-les-Lines**. Nous n'avons pas recherché la documentation concernant ces installations.

A **Steinbach**, un système de 4 pompes avec roue à l'extérieur (monté par Paul Zeller) faisait intervenir lui aussi un canal sur chevalets, long de 500 mètres (1697) et alimenté par un étang. Ces pompes qui descendaient jusqu'à 100 mètres ont été retrouvées et retirées par les exploitants allemands, lorsque ceux-ci percèrent dans ces travaux en 1902, à la cote -60 (BOHLY et BARTH, 1984).

5. LE XVIII^e SIÈCLE

Les systèmes vosgiens d'exhaure les plus remarquables au XVIII^e siècle furent sans conteste ceux du **Pfennigthurm** et de **Saint Pierre** à Giromagny. Rappelons que la remarquable machine de la mine voisine Saint Jean d'Auxelles fut démontée en 1716. Cette date correspond à l'arrêt complet de toutes les mines, conséquence d'un hiver terrible au cours duquel le gel cassa les machineries.

C'est en 1733 que la compagnie Floyd reconstruit les machines d'exhaure. Ainsi à Saint Pierre, une roue de 10,20 m de diamètre put être installée au jour, bénéficiant d'une hauteur de chute d'eau de 10 mètres grâce à l'installation d'un aqueduc récupérant l'eau des anciens canaux de la fonderie du Puix (qui fut déplacée). Cette roue (qui remplace donc le système précédent à deux roues) met en action toujours 22 pompes dans une colonne de 13 puits, sur la même hauteur de plus de 380 mètres.

A **pfennigthurm** dans un but de pallier un arrêt intempestif des pompes... en période de sécheresse, on creusa dans le roc de vastes chambres intérieures destinées à servir de réserves d'eau (fig. 5).

A côté de tels systèmes, d'autres mines utilisent des technologies nettement moins élaborées. Ainsi à **Saint Daniel** voisine de Pfennigthurm, vers 1750, on assure l'exhaure, dans cette mine pourtant considérée comme la meilleure à Giromagny, à l'aide de treuils et seaux dans les 3 puits (hauteur 48 mètres), employant 23 «pompiers» (pour 20 mineurs), dans l'attente de l'achèvement d'une galerie d'écoulement. Mal «calculée», celle-ci n'aboutit... qu'au niveau du deuxième puits !

Passons à présent aux systèmes d'exhaure des autres grands centres miniers vosgiens. A **Sainte-Croix-aux-Mines**, les exploitants de **Musloch** reprirent sans doute l'idée des anciens et installèrent leur roue au jour, dans une salle creusée dans le roc (en partie décombrée dans les années 1970 par le propriétaire des lieux). Les eaux sont amenées par un canal sur chevalets qui alimente également un bocard. A la base de la roue, les eaux s'écoulent dans un embranchement de l'ancien erbstollen. La roue (fig. 6, reproduisant partiellement un plan de 1740) actionne des tirants horizontaux sur un parcours de 125 mètres jusqu'au «**Kunstschacht**», mais la hauteur exploitée sous ce niveau n'est alors que de 57 mètres; d'ailleurs, ce puits n'est pas le même que le puits d'exhaure des anciens, situé encore 30 mètres au-delà (documentation BUCKING, 1913). Dans le premier de ces puits, les modernes (1899) pompèrent pendant 18 heures sans constater la moindre modification du niveau de l'eau. Ils retrouvèrent aussi dans les galeries les vestiges des tirants horizontaux.

A **Sainte-Marie-aux-Mines**, il ne se trouvait pas de machine hydraulique avant 1740; par la suite, seules les mines Chrétien (l'ancienne Maison de Saxe, qui descend à -120 m) et Saint Jean semblent en avoir possédé. A **Saint Jean**, les anciens rapports décrivent un puits nommé **Kunstschacht**, à 980 mètres de l'entrée, surmonté d'un puits issu des réseaux supérieurs arrosé d'une grande quantité d'eau (probablement l'eau captée pour arroser les pompes). A **Chrétien**, un formidable orage en 1755 détruisit l'installation. Les exploitants de 1898 en retrouvèrent les vestiges.

Même scénario à **La Croix-aux-Mines**. Dans la mine Saint Jean, le puits de la Butte (profond de 137 m sur le pendage, soit 111 m verticalement), équipé d'une première machine qui fonctionna de 1723 à 1749, fut pourvu en 1760 d'une machine plus performante. Ce puits prit

alors le nom de **Trommelschacht** (puits du Tambour), parce que l'eau qui y tombait dans de gros tuyaux sur la roue (abritée à la cote - 20 environ) était stockée dans un énorme tambour de bois. A peine la machine était-elle en service qu'un effroyable orage détruisit en partie le canal de 1666 mètres et fit glisser la roue dans le puits (où elle se trouvait encore, paraît-il) (BORDIER, 1948).

A **Framont-Grandfontaine**, un ingénieur du nom de Pierre Launay conçut en 1757 une machine particulièrement performante; une roue de 11 mètres actionnée des perches horizontales sur une longueur de 200 mètres (!), raccordées à un système de pompes plongeant sur 63 mètres (FISCHER, 1984); cette machine hydraulique n'est pas la première à Grandfontaine (il en existait déjà une en 1731, peut-être même aussi avant), et sera suivie d'autres. En 1796, on lui adjoint des **pompes à bras**; la description qu'on a de ce système est une des plus précises pour les mines vosgiennes : au-delà des pompes hydrauliques qui assurent l'exhaure jusqu'à 48 mètres de profondeur, les pompes à bras sont disposées en trois séries de trois pompes placées en parallèle, longue chacune de 7,7 mètres (la hauteur asséchée est donc de 71 mètres (FISCHER).

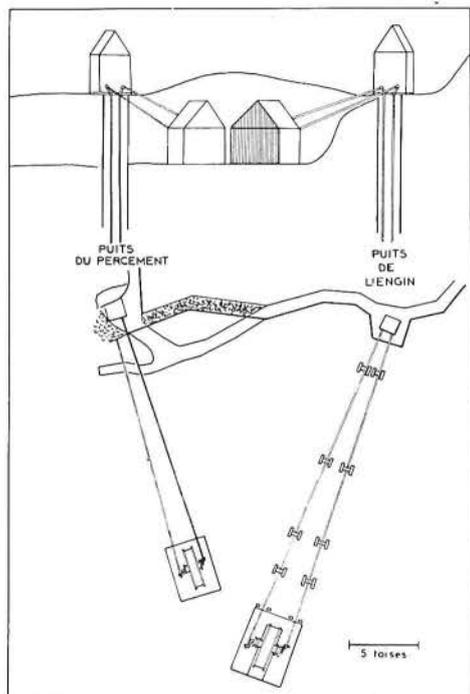


Fig. 7. Extrait d'un plan ancien de la «Mine de Grandfontaine ou Mine Rouge», non daté (env. 1830). Plan et coupe verticale.

6. Le XIX^e siècle

Trois machines construites au début du XIX^e siècle dans les mines vosgiennes méritent notre attention. A **La Croix-aux-Mines**, l'ingénieur Bader équipa en 1810 le vieux puits *Triebwerck* aux fins de dénoyer la mine *Saint Nicolas* jusqu'à un étage appelé *Grande Strecke* (- 46 m); la construction dura deux ans. Trois mois plus tard, alors qu'on nettoyait la *Grande Strecke*, la roue, détruite accidentellement, dut être remplacée par une nouvelle; c'est alors qu'une crue énorme de la rivière submergea le puits, pendant que les mineurs étaient à table. On conçut alors une autre machine à l'ancien puits de la Croix (v. plus haut la description de la machine XVI^e siècle), mieux abrité; mais ces travaux furent suspendus par la guerre. Le débit des arrivées d'eau peut être important dans ce quartier : 150 mètres-cubes/heure au fond de *Saint Nicolas* !

ALLEMAND-FONBONNE (1908) résume très

bien la situation, précisant que depuis 1759, «l'histoire de ces mines ne présente plus qu'une longue suite de tentatives infructueuses pour dénoyer les fonds».

A **Framont**, bien après la machine de Launay, on équipa de machines modernes deux nouveaux puits de la même mine (la *Rouge Mine* de Grandfontaine) qui s'ouvrent au jour, le puits de l'Engin (114 mètres) et le puits du Percement (100 mètres). La galerie d'exhaure la plus basse les atteint à la cote commune de - 21 mètres. Les deux roues, de 5,5 mètres de diamètre seulement, sont abritées dans deux maisonnettes, et transmettent l'énergie aux pompes au moyen de tirants (longs de 46 m et 34 m) s'élevant légèrement jusqu'aux sommets des deux puits (fig. 7).

Enfin à **Lembach** dans les Basses Vosges gréseuses, un filon de plomb carbonaté (mine *Katzenthal*) fut exploité durant deux ans (1826-28) jusqu'à son épuisement, sous la direction d'un ingénieur de renom, Fournet (plus tard grand savant); là aussi, le système d'exhaure consiste en une roue, mue par les eaux d'un canal de dérivation du *Steinbach*, actionnant des tirants horizontaux. Pourtant, la profondeur du puits au jour n'est que de 10 mètres.

Nous ne nous attarderons pas sur les problèmes d'exhaure de la période la plus récente de l'histoire minière vosgienne. Les épisodes de cette exploitation sont très intermittents et les pompes (actionnées par la vapeur, l'énergie électrique ou un moteur à essence) n'ont jamais été appelées à fonctionner de manière durable (une exception est peut-être la mine *Sylvestre* à Urbeis, dont le puits de 135 mètres bénéficiait cependant d'un débit d'infiltrations exceptionnellement faible).

Ainsi par exemple à la fin du XIX^e siècle, l'ingénieur Gasc forait-il un puits de 240 mètres à **Saint Jean d'Auxelles**. Ce puits au jour recoupa à - 40 le travers-bancs de la cote 600 (niveau de la machine de Jacques Dupin) et à - 150 un *erbstollen* moderne; ce sont donc les 90 derniers mètres qui posèrent des problèmes d'exhaure. Bien sûr ce puits ne parvenait pas encore **au-dessous** des anciens travaux ! (v. plus haut).

Pour la curiosité, signalons toujours à Auxelles la redécouverte en 1891 de la galerie *Gesellschaft*, qui mérite d'être contée. Au-delà de 95 mètres de portion éboulée se présentent 129 mètres de galerie noyée de boue, suivis de 60 mètres en meilleur état; c'est alors qu'on parvient dans une salle qui contenait **une roue de 13 mètres** de diamètre, coiffée d'un puits qui débouchait à +23... à 5 mètres du ruisseau. De cette roue partaient vers l'Ouest des tirants horizontaux sur une distance d'au moins 130 mètres... jusqu'à un éboulement qui empêche l'accès au filon.

Le plus souvent, les puits modernes, verticaux et couplés à un travers-bancs à la recette inférieure, creusés lors du dernier sursaut de l'exploitation minière autour des années 1900, ne firent que percer dans les anciens travaux... et s'en retrouvèrent instantanément noyés. Il en fut ainsi à *La Croix-aux-Mines* (puits *Demmler* au jour, 83 m), à *Sainte-Marie-aux-Mines* (mine *Engelsbourg*, puits inférieur de 50 m), à *Steinbach* (puits au jour de 60 m), à *Moosch* (puits au jour de 200 mètres) et peut-être à *Urbeis* (mine *Donner*, puits au jour de 45 m).

CONCLUSIONS

Nous avons tenté de retracer avec le maximum de précision l'évolution des techniques d'exhaure à travers les âges dans les mines vosgiennes. L'apport le plus digne d'admiration est celui de l'introduction au milieu du XVI^e siècle de la roue hydraulique. Ce système, considéré comme «bien primitif» par

les exploitants modernes (ALLEMAND-FONBONNE, 1908), a pourtant révolutionné l'industrie minière, et produit des résultats jamais égalés. Il permit d'assécher des tranches de 100 à 200 mètres dans les filons les plus productifs, généralement sous les vallées. L'introduction des corps de pompes en cuivre au XVII^e siècle en améliora le rendement : les profondeurs asséchées atteignent alors leur record pour les mines vosgiennes (382 mètres à *Saint Pierre*, district de *Giro-magny*), qui ne sera jamais amélioré. Les constructeurs s'ingénierent à s'adapter à chaque cas particulier, comme le montrent par exemple la remarquable réalisation de Dupin à *Saint Jean d'Auxelles*, ou le chapelet d'étagements au sommet de la montagne de *Château-Lambert*.

A côté de telles machines hydrauliques, on constate, généralement dans les mines bien moins loties, la survivance de techniques artisanales comme les pompes à bras (répandues partout), voire archaïques comme l'exhaure par treuil et seaux, toujours pratiquée au XVIII^e siècle. Parfois, les deux systèmes hydraulique et manuel se complètent.

L'histoire de ces installations d'épuisement est émaillée de nombreux accidents ou catastrophes : gel qui «casse» les machines à *Giro-magny*, orages qui précipitent les roues dans les puits...

Au XIX^e siècle, les seules machines à fonctionnement durable sont celles de Grandfontaine; sur le plan technologique, on remarque alors que les roues sont plus petites en diamètre, mais alors plus larges en épaisseur. Enfin durant la dernière période, les systèmes de pompage se diversifient avec les sources d'énergie nouvelles (moins «écologiques»), mais les filons épuisés ne se prêtent plus à une exploitation continue.

Sur le plan de l'archéologie minière, nous trouvons là un domaine de choix pour la confrontation entre le terrain et les documents d'archives, mais aussi une voie nouvelle encore peu exploitée. Certes, on s'efforce dans les réseaux complexes en cours d'étude d'en dégager les caractéristiques hydrologiques : le cheminement actuel des eaux apporte bien des informations. Peu nombreuses encore sont cependant les anciennes «*radstuben*» dans lesquelles on est déjà parvenu à pénétrer (*Château-Lambert*, *Saint Jean d'Auxelles*, *Teutschgrund*), plus rares encore les puits équipés de vestiges de pompes. De belles découvertes en perspective peuvent être entrevues par... le pompage des puits.

Bernard BOHLY
Pierre FLUCK
François LIEBELIN

BIBLIOGRAPHIE

- AGRICOLA (G.) - 1556 - *De Re Metallica*. Bâle 1556.
- ALLEMAND-FONBONNE (G.) - 1908 - Les mines de plomb et d'argent de *La Croix-aux-Mines* en Lorraine. Bayonne 1908, 17 p.
- BOHLY (B.) - 1983 - Les mines de *Château-Lambert* en 1648. *Cahiers de Recherches du Musée Albert Demard*.
- BOHLY (B.) et BARTH (A.) - 1984 - Les mines de *Steinbach*. 27 p.
- BÜCKING (H.) - 1913 - *Zur Kenntnis der Erzgänge im Leberthal unterhalb Markirch*. *Mitteilungen der Geologischen Landesanstalt von Elsass-Lothringen*, VIII, 2, p. 201-213.
- BORDIER (R.) - 1948 - Mines de la Croix-en-Lorraine. Histoire générale et travaux. *Saint-Dié* 1948, 44 p.
- DE DIETRICH (Ph.-Fr.) Description des gîtes de minerais, etc... de la France. Tome II, *Alsace*, 1789; tome III, *Lorraine méridionale*, 1800.
- FISCHER (G. et M. Th.) - 1984 - Historique des mines de Grandfontaine. In : *Encyclopédie de l'Alsace*, éd. Publital.

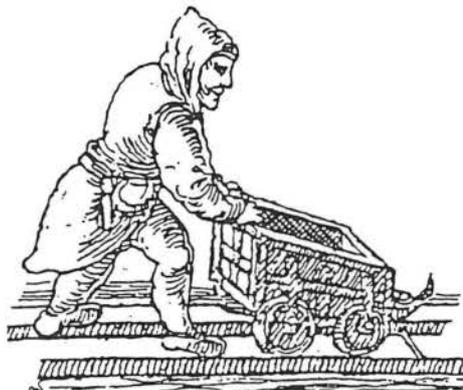
LE ROULAGE DANS LES MINES EUROPEENNES AUX XV^e ET XVI^e SIECLES

Paul BENOIT
Université Paris 1 - CNRS
9, rue Mahler 75004 PARIS

Quiconque a parcouru d'anciennes mines de métaux non ferreux exploitées en Europe du XVI^e au XVIII^e siècle, et même au-delà, n'a pu qu'être frappé par l'importance des vestiges provenant du roulage. Des planches de bois disposées parallèlement, deux par deux, s'allongent sur le sol des galeries et forment des voies qui s'étendent parfois sur plusieurs centaines de mètres. L'archéologie fournit une part très importante des données qui permettent de tenter une histoire du roulage dans les premiers temps de son existence, les XV^e et XVI^e siècles. Elle nous renseigne sur les lieux et les conditions du roulage, sur les techniques de pose et d'assemblage des voies (1). Si jamais encore un chariot ancien, un **chien de mine** n'a été retrouvé, de nombreuses pièces métalliques provenant de ces véhicules aident à mieux en comprendre la structure et l'utilisation (2).

Abondantes, d'une exceptionnelle qualité pour tout ce qui touche aux mines d'argent, les représentations figurées, miniatures, dessins, gravures, fresques et tableaux, sont souvent très explicites, même si certaines, en particulier les plus anciennes, posent des problèmes d'interprétation. Mais, fait bien connu de tous ceux qui cherchent à faire l'histoire des techniques anciennes à partir de sources iconographiques, les représentations sont, dans l'immense majorité des cas, largement postérieures à l'innovation et il s'avère extrêmement difficile de tenter une chronologie à partir de documents figurés (3).

Avant l'extraordinaire floraison du milieu du XVI^e siècle, les sources écrites n'apportent que des renseignements disséminés dans une documentation beaucoup plus large et



coureur de chien - détail extrait des planches d'Heinrich GROSS (Début XVI^e)

d'un accès difficile, pour cette raison elles sont restées longtemps mal connues. Dans l'état actuel de nos connaissances, les règlements miniers ne s'intéressent guère au roulage, par contre les recherches récentes sur les comptes d'exploitation minière, même s'ils restent très pauvres sur le plan purement technique permettent de saisir les aspects économiques et sociaux du roulage, de tenter une évaluation des coûts et aussi de fixer certains repères chronologiques, ils sont, pour l'histoire dont nous traçons les premières lignes, une source de toute première importance qu'il faudra continuer d'interroger (4).

L'année 1556 apporte deux documents exceptionnels qui bouleversent l'état des connaissances que nous avons des mines d'argent. A Bâle, l'éditeur Froben publie alors

le *De re metallica* de Georgius Agricola, ouvrage illustré dont les multiples éditions et traductions prouvent le succès (5). De la même année date le *Schwazerbergbuch* qui trace un portrait extrêmement vivant du district minier de Schwaz, alors au premier rang en Europe pour la production d'argent (6). Ces deux ouvrages, où texte et dessin s'expliquent mutuellement, donnent du roulage une vue très précise mais ils datent de l'époque où la technique est au point, où l'innovation semble largement diffusée. Les documents les plus riches proviennent donc, tant en ce qui concerne les textes que l'archéologie, du XVI^e siècle et souvent du milieu du siècle en un temps où l'essor minier se ralentit alors que le siècle qui a vu la naissance et le développement du roulage est celui d'une expansion exceptionnelle.

La technique, telle qu'elle apparaît d'après les fouilles et les documents iconographiques du XVI^e, est facile à comprendre, plus difficile sans doute à mettre en œuvre. Sur le sol des galeries, des longrines de bois, de taille variable en fonction de la topographie mais pouvant atteindre 4 m de long (7), sont posées deux par deux, parallèles, comme des rails et forment une voie. La largeur de ces longrines varie entre 10 et 15 cm en moyenne, et leur épaisseur, à l'état neuf, est de l'ordre de 5 à 6 cm. Ce ne sont pas, à proprement parler des rails puisque leur forme, de simples planches, ne contraint pas la roue à rester en contact avec la voie. Les anciens mineurs appelaient ces pièces de bois *gestängen* en Allemagne et *limandes* en France (8). Les *limandes* parallèles étaient séparées par intervalles de 3 à 4 cm. La voie atteignait donc une largeur de 25

(1) L'essentiel des données archéologiques de cet article proviennent des fouilles effectuées dans le cadre du programme «Mines et métallurgie de la France de l'Est de l'Antiquité à l'époque moderne», programme H 27 de la sous-direction de l'Archéologie, en particulier des travaux de B. ANCEL, B. BOHLY, P. FLUCK, J. GRANDEMANGE, R. MAURER, D. METZGER et les fouilles que je mène moi-même à Pampailly.

(2) Le terme de chien de mine n'apparaît jamais dans les textes français des XV^e et XVI^e siècles. Venu de l'allemand, il est employé dans les documents des XVIII^e et XIX^e siècles.

(3) J'ai moi-même abordé les problèmes de la représentation du monde minier, P. BENOIT, Histoire des techniques et iconographie, *Pierres et Terre*, n° 25-26, L'Art et les Mines dans les Vosges, 1982, p. 67-83. La même livraison comprend la reproduction des vingt-cinq planches du manuscrit d'Heinrich GROSS qui, par des dessins à la plume rehaussés de couleurs, décrit avec beaucoup de détails l'activité de la mine de Saint-Nicolas à La Croix-aux-Mines dans les Vosges, ce document est d'une importance essentielle pour l'histoire de la représentation des mines en général, et du roulage

en particulier. A. RONSIN, Heinrich Gross et son recueil de 25 dessins sur la Rouge Mine de Saint Nicolas de la Croix (vers 1530), *id.*, p. 61-63, date le manuscrit des années entourant 1530, probablement 1529.

(4) Les comptes de la mine de Pampailly ont été étudiés et édités par A. Th. RENDU, les travaux dans les mines de Jacques Cœur, Pampailly et Joux (1454-1457), dans P. BENOIT et Ph. BRAUNSTEIN, *Mines, carrières et métallurgie dans la France médiévale*, Paris 1983; A. Th. RENDU, La main d'œuvre d'une grande exploitation minière au milieu du XV^e siècle; la mine de Pampailly en Lyonnais, 1454-1457, *Cahiers d'Histoire*, 1983, n° 4, p. 59-95; *Comptes d'exploitation de Pampailly et de Joux en Lyonnais*, *Comptes de Pierre Granier*, Thèse de troisième cycle, Université de Paris I, 1984, dactylographiée; les comptes du Val de Saint-Dié sont en cours d'étude par Jacques LAURENT et ceux du versant lorrain de Sainte-Marie-aux-Mines par Jacques GRANDEMANGE. Différents comptes germaniques ont fait l'objet de recherches et de publications.

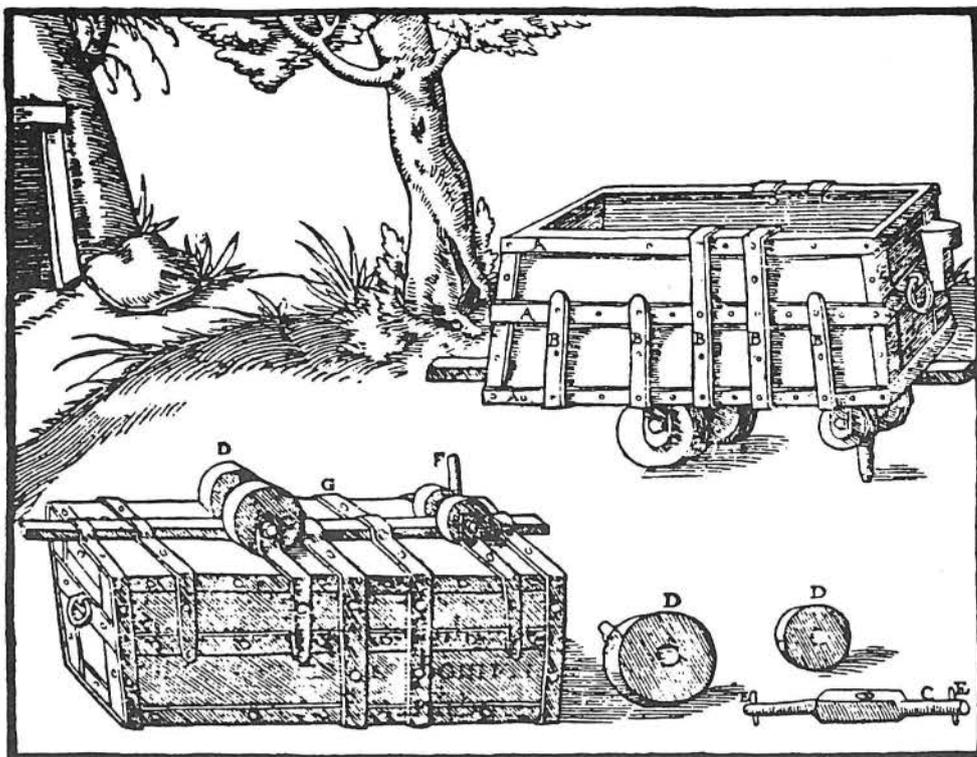
(5) G. AGRICOLA, *De re metallica*, libri XII, Bâle, 1556, l'ouvrage a fait l'objet de plusieurs traductions récentes dont celle de H.C. HOOVER, New

York, 1912, en anglais (plusieurs réimpressions), et l'édition type poche, en allemand, Munich, 1977.

(6) Actuellement sept exemplaires du *Schwazerbergbuch* sont connus, H. WINKELMANN, *Das Schwazerbergbuch. Ein Siebentes Exemplar im Bergbau Museum Bochum*, *Des Anschlitt*, 9, 1-2, 1957, p. 5-8, une édition en allemand contemporain très richement illustrée et accompagnée du facsimilé du *Kodex Dip. 856 du Tiroler Landesmuseums Ferdinandeum* a été établie par H. WINKELMANN, *Schwazerbergbuch*, Bochum, 1956.

(7) Cette longueur de 4 m a été retrouvée dans les nombreuses mines du XVI^e siècle en particulier dans les «Mines de plomb» à Sainte-Marie-aux-Mines, P. FLUCK, *Les mines de plomb*, 1982, rapport de fouille dactylographié, p. 78. A cette occasion P. FLUCK cite le rapport de Prechter, de 1602 qui donne aux *limandes* une longueur de 2 toises, soit environ 4 m.

(8) Le terme de *gestänge* est utilisé dans le *Schwazerbergbuch*, *op. cit.*, p. 114, il apparaît francisé dans les comptes lorrains du XVI^e siècle (renseignement communiqué par J. LAURENT) mais le mot *limande* semble inusité en France au XV^e et XVI^e siècles.



Chien de mine. AGRICOLA, *De re metallica*

à 35 cm; elle pouvait ainsi être posée dans les galeries étroites que connaissaient les mines de la Renaissance (9). Des traverses maintenaient l'écartement et des pièces de jonction assuraient la liaison avec les limandes aval et amont.

En règle générale, des chevilles de bois fixaient les limandes sur les pièces de jonction ou les traverses mais la présence de clous est aussi attestée (10). Dès le milieu du XVI^e siècle, au moins des bandes de fer, clouées sur les limandes, les *reibeisen* du *Schwazerbergbuch*, renforcèrent les liaisons longitudinales dans certaines mines (11). Les traverses et les pièces de jonction reposaient directement sur le sol de la mine sauf en de rares cas où une sorte de ballast semble avoir existé (12). Des pierres de petite taille ou parfois des cales en bois maintenaient les traverses et les pièces de jonction contre les parois, lorsque les virages étaient accentués et que la force centrifuge risquait de faire supporter à la voie des contraintes trop fortes, des pièces de bois, parfois d'anciennes limandes, formaient un calage latéral plus résistant (13). Si la galerie n'était pas plane, d'autres cales posées sur le sol assuraient à la voie une certaine régularité.

Le chariot, ou chien de mine, se composait d'une caisse de bois renforcée de fer, montée sur des roues de bois elles aussi. De nombreuses représentations placent, sur une planche dépassant à l'avant, une lampe de mineur. La forme pouvait varier, Agricola montre une caisse parallélépipédique alors que, dans la plupart des documents iconographiques, les flancs du chariot ont la forme d'un trapèze rectangle incliné vers l'avant, probablement pour donner une meilleure position au mineur qui poussait le véhicule, le *coureur de chien*.

Le chien de mine avait, selon les sources écrites, un peu plus d'un mètre de long et environ 0,70 m de haut (14). Le chariot reposait sur quatre roues placées nettement sous la caisse afin de ne pas perdre d'espace. Selon certaines représentations du XVI^e, confirmées par l'iconographie postérieure, les roues étaient de tailles différentes, les roues arrière, plus grandes, fixées à proximité du centre de gravité, permettaient des manœuvres assez faciles (15). L'ouvrier, pesant sur

l'arrière du chien de mine, pouvait soulever les roues avant et ainsi faire tourner le chariot en fin de voie, lui faire changer de voie à un carrefour ou encore le basculer pour le vider. Un clou métallique, fiché à l'avant, glissait dans l'intervalle ménagé entre les limandes, maintenant sur la voie le chariot dont les roues auraient pu glisser latéralement. La trace d'usure occasionnée par le frottement du clou de guidage est visible sur les traverses et les pièces de jonction mais plus encore sur la face interne des limandes dans les virages, preuve s'il en était besoin, de la nécessité d'un guide.

Pour limiter ces heurts et ces frottements, le clou de guidage fut entouré d'un manchon de tôle tournant autour de l'axe du clou et roulant sur les parois des limandes. L'archéologie a livré plusieurs clous de ce type dans des mines datées du XVI^e siècle et leur description est donnée dans le *Schwazerbergbuch* (16).

La caisse du chien de mine était bardée de bandes de fer pour mieux supporter la multitude des chocs subis tant lors du roulage que dans les manœuvres. Un cerclage de fer protégeait les roues de bois particulièrement fragiles; fixées à l'axe par des clavettes et des rondelles métalliques, il était aisé de les changer (17).

Trois voies de roulage à trois niveaux superposés, dont deux, semble-t-il, n'avaient d'autres débouchés que des puits, ainsi Heinrich Gross représente-t-il la mine Saint-Nicolas à la Croix (18). Une fois encore le dessinateur alsacien donne une image un peu schématique mais exacte de la réalité. Des voies ont été retrouvées à des niveaux très divers, dans des galeries d'exploitation comme dans de simples recherches. Lors du creusement du «voyage du Vernay», à Pampailly dans les années 1450, une voie de roulage fut installée pour évacuer les déblais avant que, le filon atteint, elle puisse servir à sortir le minerai (19), tout comme dans le *Wurzelmuerstollen*, sur le versant lorrain de Sainte-Marie-aux-Mines, où une galerie se développe sur 400 m dans la roche stérile (20).

Des chariots roulèrent sur des voies dans des passages dont l'étroitesse étonne ou dans des galeries sur pendage qui exigeaient

(9) Largeurs de la voie de roulage relevée dans des mines du XVI^e siècle dans le Val-de-Liepvre : Mines de plomb, 27 cm dans le «Complexe d'Oedipe» et 26 à 28 cm dans la «rue de Château-Lambert», P. FLUCK, *Les Mines de plomb*, op. cit., p. 78; Fontaine des Chouettes, 27 à 32 cm à proximité du carrefour des voies de roulage, J. et Y. GRANDMANGE, *Mines du Val-de-Liepvre*, 1983, rapport de fouilles dactylographié, p. 64.

(10) Des clous fixés à des limandes ont été découverts dans la mine de la Fontaine des Chouettes sur une voie du XVI^e siècle, J. et Y. GRANDMANGE, op. cit., p. 77.

(11) *Schwazerbergbuch*, op. cit., p. 142.

(12) Un tel ballast semble avoir été exceptionnel, les fouilles de la mine de Samson 2, à La Croix-aux-Mines ont mis en évidence une voie sur ballast. J. et Y. GRANDMANGE, *Rapport de prospection*, 1981, dactylographié.

(13) Une pièce de bois taillée de 1,4 m de long, taillée pour épouser la forme de la galerie et de la limande, cale la voie dans la mine de Champ-Brechté à Urbeis (Haut-Rhin); D. METZGER, *Fouille archéologique du Champ-Brechté-Urbeis*, 1982, Rapport de fouille dactylographié.

(14) Selon AGRICOLA, *De re metallica*, ed. Hoover, op. cit., p. 136, le chien de mine mesure quatre pieds de long sur environ un pied et demi de large et autant de hauteur, soit, selon les équivalences données par Hoover, 1,5 m de long pour 0,70 m de large et de haut, ce qui semble tout à fait excessif pour la largeur, compte tenu de la taille des galeries. Le *Schwazerbergbuch* donne au chariot 1,5 Elle de long, une Elle de haut et un tiers de Elle de large, soit, si la Elle vaut 0,777 m, une longueur de 1,16 m pour une hauteur de 0,77 m et une largeur de 0,26 m, ce qui semble trop étroit, mais moins éloigné de la réalité que la largeur donnée par Agricola; *Schwazerbergbuch*, op. cit., p. 136.

(15) Cette position des roues arrière décalées vers le centre du véhicule est particulièrement sensible dans le dessin du chien de mine du *De re metallica* (fig. 2) mais aussi dans les illustrations du *Schwazerbergbuch*.

(16) Le *Schwazerbergbuch* décrit ce clou sous le nom de *Leitnagel*, de nombreux fragments de ces clous ont été retrouvés en fouille depuis que J. GRANDMANGE les a identifiés et étudiés dans *Mines du Val-de-Liepvre, Sainte-Croix-aux-Mines; Sainte-Marie-aux-Mines*, Rapport de fouilles, Campagne 1984, dactylographié, p. 46-48.

(17) La gravure du *De re metallica* montre bien la manière dont les roues pouvaient être remplacées, des rondelles de fixation et des clavettes ont été retrouvées en grand nombre dans différentes mines; dans le seul travers-banc de la mine de Sapin-Vert, prospecté systématiquement, 32 rondelles ont été retrouvées, J. et Y. GRANDMANGE, *Mines du Val de Liepvre...*, op. cit., p. 41. Le cerclage des roues apparaît dans le manuscrit d'Heinrich GROSS grâce à la coloration en bleu que le dessinateur utilise pour représenter le métal, il en va de même pour le *Schwazerbergbuch*, op. cit., p. 136.

(18) Il s'agit des folios 26 et 27 du manuscrit d'Heinrich GROSS reproduit à de nombreuses reprises en particulier dans A. GIRODIE, *Les mines d'argent de la Croix-aux-Mines en Lorraine au XVI^e siècle*, Nancy, 1909, et dernièrement dans *Pierres et Terre*, op. cit., avec des commentaires dus à H. BARI.

(19) A. Th. RENDU, *Les travaux dans les mines de Jacques Cœur...*, op. cit.

(20) B. ANCEL, P. FLUCK et al., *Rapport de sauvetage archéologique : la mine de Wurzelmauer stollen et le secteur de Saint-Pierremont Ouest, Versant Lorrain, district de Sainte-Marie-aux-Mines, à paraître dans Pierres et Terre*.

(21) Le cas est particulièrement net dans une galerie sur pendage située dans les parties du réseau des «Mines de plomb» de Sainte-Marie-aux-Mines où le coureur de chien devait incliner son corps à près de 45 degrés, Pierre FLUCK, *Les mines de Plomb*, Rapport de fouilles, 1982, dactylographié, p. 51 et 77. A. Schwaz, il existait au XVIII^e siècle des voies de roulage sur des pentes fortes, les mineurs utilisaient pour les gravir et les descendre des poutres entaillées de marches disposées parallèlement à la voie. Une telle poutre portait le nom de *Kletterbaum*, arbre d'escalade. Ces ménagements ont été rencontrés à plusieurs reprises par B. BOHLY, P. FLUCK et B. ANCEL qui m'ont communiqué cette information.

(22) Les miniatures de la page consacrée aux mines dans le graduel de Saint-Dié sont reproduites en particulier dans H. BARI, *Le Graduel de Saint-Dié, description de la page des mines, Pierres et Terre, l'Art et les mines dans les Vosges*, op. cit., p. 58-60; la sortie du chariot et le boisage du couloir d'accès, p. 58. De tels couloirs ont été fouillés à Pampailly (P. BENOIT) et à Sainte-Croix-aux-Mines, mine de la Fontaine des Chouettes (J. GRANDEMANGE). Une gravure sur cuivre représentant Sainte-Marie-aux-Mines dans la seconde moitié du XVI^e siècle, représente une voie de roulage portée sur un échafaudage au sortir de la mine, ce qui permet de verser les déblais sur une halde en contrebas et suffisamment éloignée de l'entrée. R. SLOTTA, *Meisterwerke bergbaulicher Kunst und Kultur*, n° 15, *Der Anschnitt*, 34-1, 1982.

(23) Le manuscrit d'Heinrich GROSS montre que le roulage, s'il servait essentiellement au transport du minerai et des stériles, pouvait être utilisé avec profit pour l'équipement de la mine. Les folios 22 et 23 du manuscrit montre des petits chariots sans coffres, constitués d'un châssis de bois et de deux montants de fer, destinés à transporter le bois nécessaire à l'aménagement interne de l'exploitation. Quand on sait les difficultés qu'il y a à porter, dans l'espace restreint et sombre de la mine, des objets lourds et encombrants, on doit estimer que l'apport du roulage a été indispensable pour prolonger les voies, installer des machines d'exhaure, boiser des galeries et des puits, mettre en place des systèmes d'aérage dans les quartiers les plus reculés de la mine.

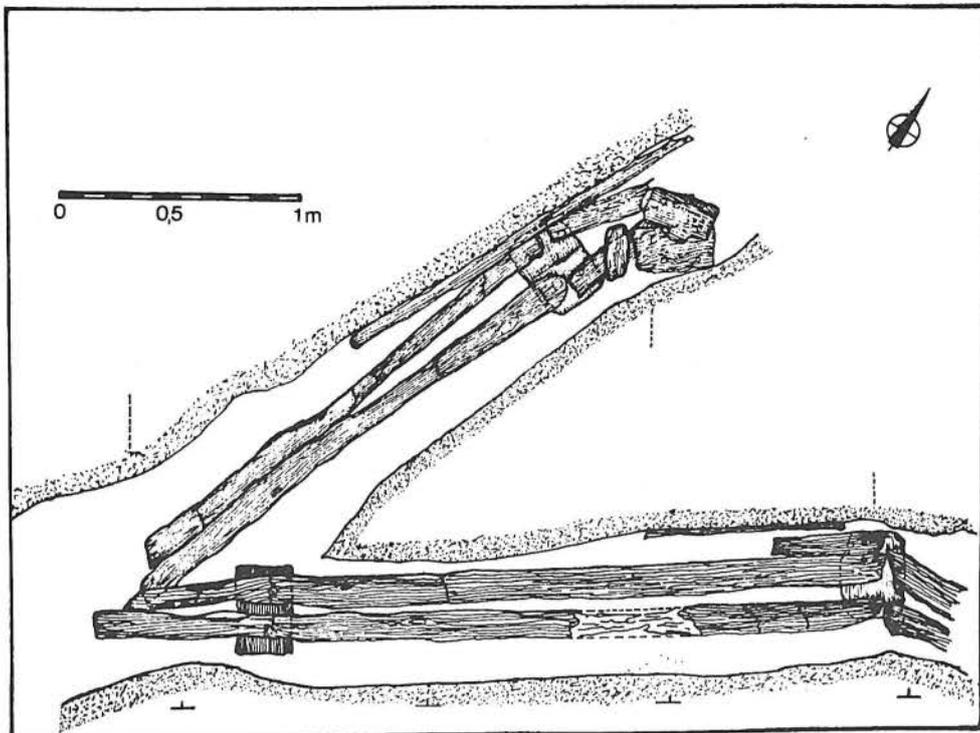
(24) A. Th. RENDU, *La main d'œuvre d'une grande exploitation minière...*, op. cit., p. 63.

(25) Renseignements communiqués par J. LAURENT.

(26) G. AGRICOLA, *De re metallica*, éd. Hoover, op. cit., p. 133.

(27) Les données concernant la Lorraine m'ont été fournies par J. LAURENT et proviennent des comptes du Contrôleur des mines du duc de Lorraine en 1513, conservés aux archives départementales de la Moselle. A Pampailly les comptes de Pierre Granier donnent pour deux douzaines d'ais, 12 s. 6 d., nous ne savons pas la longueur de ces pièces de bois. Si, comme ailleurs, elles sont d'environ 4 m, et puisque le salaire d'un coureur de chien est de 20 livres par an, le prix de l'équipement de 400 m de galerie correspondrait à environ 13 semaines du salaire de cet ouvrier. Le prix du chien de mine, *Bergtruhe*, était selon le *Schwazerbergbuch*, op. cit., p. 136, de 2 florins et 24 kreutzer, ce qui correspond à 3,2 journées d'un travailleur ou 4,36 journées d'un coureur de chien. Dans le Lyonnais, au milieu du XV^e siècle, les valeurs données par les textes au chien de mine sont très variables. A Pampailly, Hans Ysmant reçoit 30 s. pour avoir fabriqué un «garny de ferremen et autres choses à luy nécessaires» alors que dans l'estimation des biens meubles de Joux, un *charret de montaigne* est évalué à 5 s., A. Th. RENDU, *Les comptes d'exploitation...*, op. cit., a 1493 et a 1316. Les deux inventaires de Pampailly effectués par le procureur Dauvet, chargé de la saisie des biens, le 30 novembre 1454 et les 4 et 5 mars 1455, donnent comme valeur à «six charretz à charroyer la mine et les terriers hors de la dicte montaigne par le voiage», 40 livres tournois dans le premier cas, 2 livres dans le second. Erreur du copiste ou incapacité à évaluer un matériel peu courant ? La valeur du second inventaire, 6,66 s. par chien de mine usagé correspond à peu de choses près à l'estimation de Joux. M. MOLLAT, *Les affaires de Jacques Cœur. Journal du Procureur Dauvet*, Paris, 1952, p. 263 et 301.

(28) La situation à Pampailly au milieu du XV^e siècle est favorable : «Bien que leur travail ne réclame sans doute pas plus de formation que celui des manœuvres, les *coureurs de chien* ne sont pas tout à fait assimilés aux précédents. Rémunération d'un effort physique particulièrement dur ? Prestige lié à une fonction nouvelle, à l'emploi d'un matériel coûteux et spécialisé ? Les salaires assez élevés de ces deux mineurs — 20 l.t. par an — les situent à mi-chemin entre manœuvres et *ouvriers de martels*». A. Th. RENDU, *Comptes d'exploitation des mines de Pampailly et de Joux...*, op. cit., p. Cl. A Schwaz, en 1556 selon le *Schwazerbergbuch*, le statut du coureur de chien, *Truhenläufer*, apparaît plus médiocre. Son salaire, 32 *kreutzer* par semaine est inférieur à celui des manœuvres employés au treuil qui touchent 42 *kreutzer*. Seuls les jeunes décombres et les hommes qui actionnent les soufflets perçoivent un salaire inférieur, encore faut-il remarquer que le texte les présente comme des jeunes, des enfants, *Knaben*. *Schwazerbergbuch*, op. cit., p. 105-108.



Bifurcation de voie de roulage. Mine de la Fontaine des Chouettes (La Croix-aux-Mines). J. et Y. GRANDEMANGE, Mines du Val-de-Liepvre, 1983, p. 84.

que le coureur de chien se contorsionne pour effectuer son travail (21). Mais toutes ces voies aboutissaient directement ou par des carrefours ou encore par l'intermédiaire de treuils, à la galerie conduisant au porche. La voie continuait en plein air, souvent à travers un couloir boisé, comme le montre le graduel de Saint-Dié, afin d'atteindre un espace assez large pour que le chariot puisse être vidé et que les premières opérations de tri puissent avoir lieu (22).

La présence presque permanente des voies de roulage dans les galeries, même en des points éloignés de la surface s'explique. Le ransport horizontal à partir du front de taille vers les puits ou le porche a été totalement bouleversé (23). Désormais grâce au roulage des quantités importantes de minerai, mais aussi de stérile pourront être évacuées sans que le montant des salaires n'atteigne des sommes prohibitives.

Encore une fois l'exemple de Pampailly est significatif. Alors que l'extraction s'effectuait principalement dans une zone de puits débouchant à 600 m environ du Porche de Cosne, deux coureurs de chiens, sur un effectif d'environ cent mineurs, manœuvres et charpentiers suffisaient (24). Dans les mines lorraines du Val de Saint-Dié, au cours de la première moitié du XVI^e siècle, la proportion semble avoir été la même (25). Gain de productivité qui abaisse les coûts de production, technique qui permet l'exploitation de quartiers de la mine plus lointains par des galeries horizontales s'enfonçant au cœur de la montagne.

Permettant d'aller plus loin, le roulage permet d'aller plus profond à l'intérieur du filon, de le vider plus systématiquement. Le quadrillage de la mine par puits et galerie, schématisé par Heinrich Gross, et qui est un des fondements du système technique d'exploitation des mines de la Renaissance ne peut fonctionner sans le roulage qui permet la circulation des produits sur des distances de l'ordre de la centaine de mètres. Lié à la structure de la mine, le roulage l'est aussi aux autres éléments du système, ce sont les mêmes galeries inférieures qui servent souvent à l'exhaure et à la sortie du minerai comme elles jouent un rôle essentiel dans l'aérage.

Ces avantages multiples, peut-on actuellement les chiffrer, établir le coût de l'investissement et celui du fonctionnement d'une voie

de roulage ? La question est pour l'instant prématurée et, en tout état de cause il sera toujours très difficile d'établir la valeur de l'investissement puisque la dépense principale, le creusement de la galerie, n'est pas le fait du seul roulage. La mise en place d'une voie exigeait un soin particulier du nivellement. Selon Agricola, et ces données sont souvent confirmées par les données de l'archéologie, la pente d'une galerie devait être de 1% de l'intérieur vers l'extérieur (26), ainsi l'exhaure pouvait s'effectuer par gravité et le coureur de chien était aidé par la pente lorsque son chariot était plein et la remontée à vide n'était pas trop difficile.

Les autres dépenses tenaient d'abord à la pose de la voie, salaires de charpentiers et prix du bois. En Lorraine, dans la première moitié du XVI^e siècle, une *gestange* de deux toises vaut 2 gros, alors que le salaire d'un manœuvre montait à 16 gros par semaine. Le seul prix des limandes d'une voie de roulage de 400 m, sans tenir compte des chutes perdues lors de l'installation, du prix des traverses et du salaire des charpentiers, équivalait à vingt-cinq semaines de travail d'un manœuvre. S'ajoutait le prix du chien de mine, estimé à 2 florins 24 *kreutzer* dans le *Schwazerbergbuch*, soit entre trois et quatre journées et demi de manœuvres, le prix est plus difficile à calculer dans le cas de Pampailly mais il semble plus élevé (27). Tout cet investissement nécessitait un entretien qu'il est, pour l'instant, difficile de chiffrer. Le salaire des coureurs de chien a varié, au milieu du XV^e siècle, à Pampailly, ils touchaient 20 livres par an, soit nettement plus qu'un manœuvre, alors qu'à Schwaz, un siècle plus tard, ils se retrouvent au bas de l'échelle des salaires (28). Comme la baisse du prix du chien de mine, cet écart s'explique peut-être par une diffusion de l'innovation, au milieu du XVI^e, au Tyrol, le chien de mine est devenu banal et le coureur de chien un manœuvre comme un autre.

Quoiqu'il en soit la dépense pour l'installation peut paraître coûteuse mais elle reste minime par rapport au coût du creusement et le petit nombre des coureurs de chien devait

rendre très vite l'opération rentable. Il suffit d'imaginer le coût, en ces temps de hauts salaires, de transport par portage sur des centaines de mètres.

Il importe de connaître avec le plus de certitude possible la chronologie de l'innovation et de sa diffusion. La tâche n'est pas aisée, les repères rares mais, sachant la place déterminante tenu par le roulage dans l'exploitation, il est nécessaire de connaître son histoire pour comprendre celle de tout le système technique minier de la Renaissance. Textes, documents figurés et archéologie se complètent pour montrer que la technique était parfaitement au point et largement utilisée dans les mines polymétalliques d'Europe au milieu du XVI^e siècle et même avant puisque les dessins d'Heinrich Gross fournissent une idée assez complexe des possibilités d'utilisation du roulage dès 1530.

Le Graduel de Saint-Dié et le tableau représentant la Vierge et Sainte Anne conservé à Roznava, œuvres des années 1510-1515, tout aussi célèbres par leurs qualités documentaires que par leurs valeurs artistiques, ont longtemps fait penser qu'il fallait attribuer l'innovation au début du XVI^e siècle (29); l'absence de voies de roulage dans les remarquables miniatures représentant la mine en provenance de Kutna-Hora, qui passent pour donner une idée exacte de l'extraction de l'argent à la fin du XV^e siècle, confortait cette position (30). En fait les recherches iconographiques menées en Allemagne, en particulier autour de la revue *Der Anschnitt*, révèlent que des représentations du roulage apparaissent beaucoup plus tôt.

Dès 1478, dans l'église paroissiale d'Imst, non loin de Schwaz, au Tyrol, une fresque représente un mineur poussant un chariot à l'intérieur de la mine (31). Si la datation de R. Slotta est exacte, le grand collier des orfèvres de Gand est à peine postérieur aux fresques d'Imst, on y reconnaît aussi un chien de mine (32). Un ouvrage à large diffusion, la *Margarita philosophica* de Gregor Reisch, montre un chariot sortant d'un porche et poussé par un mineur (33).

Mais les archives et l'archéologie ont permis de remonter encore la chronologie. L'inventaire de la mine de Pampailly, établi en 1454 par le procureur Jean Dauvet, à la suite de la saisie des biens de Jacques Cœur, cite des «charretz» pour rouler dans la mine; les comptes d'exploitation sont plus précis encore, y apparaissent des *ais*, c'est-à-dire des planches pour faire rouler les charretz,

planches qui sont placées dans la galerie du Vernay.

Le maître mineur responsable du creusement, est chargé, en 1455 de construire un chariot, un chien de mine. Cet homme est un Allemand. On ne sait qui a introduit le roulage à Pampailly mais cette mine, alors la plus importante du royaume pour l'extraction de l'argent, a attiré très tôt des techniciens étrangers (34). Les fouilles menées sur le site ont dégagé en 1984, à la sortie du porche, à un niveau inférieur à celui des installations du XVIII^e siècle, une voie de roulage qui pourrait être celle du XV^e siècle (35). Très bien finie, les fragments restant assemblés uniquement par des chevilles de bois, elle est du même type que les voies postérieures, les charretz de l'inventaire de Dauvet et les *ais* des comptes seraient donc bien des chiens de mine et des limandes comme l'Europe de l'époque moderne en a connu.

Pampailly, alors la première mine d'argent du royaume de France a bénéficié de forts investissements et de l'intérêt porté par le roi, la mine a eu recours, très tôt sans doute à des techniciens germaniques. On peut donc penser que si cette mine connaissait une avance notable par rapport aux autres exploitations du royaume, il n'en allait pas de même avec le monde germanique.

L'hypothèse la plus plausible est que le roulage tel qu'il a été présenté, était connu en Allemagne dès la première moitié du XV^e siècle et que l'innovation s'est diffusée en Europe dans les années du grand essor minier, après 1450 à des dates qu'il faudrait essayer de retrouver dans les différents districts. Élément essentiel de l'exploitation des mines, le roulage aurait connu la même chronologie que l'ensemble du système technique.

Les voies de roulage découvertes en fouilles sont toutes sensiblement du même type et leur usage a duré jusqu'au début du XX^e siècle (36) mais l'iconographie montre des voies et des chariots sensiblement différents. La technique a-t-elle évolué ou s'agit-il simplement d'interprétations d'artistes? Les documents les plus anciens, la fresque d'Imst, le collier des orfèvres de Gand, le tableau de Roznava et le graduel de Saint-Dié représentent tous des chiens de mine dont les roues sont placées sur le côté de la caisse, ce qui implique un véhicule large circulant sur une voie de la même largeur, le tout dans des dimensions incompatibles avec ce que nous savons des galeries du XVI^e, voire du XV^e siècle.

Ce type de véhicule, qui se retrouve dans des gravures postérieures, a-t-il réellement existé? On peut en douter. La largeur, un peu plus importante, des galeries ouvertes avant le XVI^e siècle s'accorderait mal de la circulation de tels véhicules. Par contre le dessin de roues à l'extérieur est plus facile surtout pour un homme qui a sous les yeux des charrettes ou des chars. L'artiste peu au fait des techniques dessinant une réalité juste aperçue ou décrite par un autre, se laissait facilement tromper. Même Heinrich Gross, dont les qualités d'observation sont remarquables, commet l'erreur dans une des planches de son recueil alors que dans le reste de son œuvre la représentation est conforme à ce que nous connaissons à travers Agricola ou le Schwazerbergbuch (37).

L'iconographie pose une autre question: le roulage sur voie a-t-il été précédé par d'autres formes de roulage qui l'annonçaient et les mines ont-elles connu d'autres usages de la roue dans les transports intérieurs? Certains documents du début du XVI^e siècle montrent des chariots à quatre roues circulant directement sur le sol de la galerie, mais ces gravures ou ces tableaux ne proviennent pas, en règle générale, d'œuvres où la mine est représentée avec beaucoup de réalisme, il s'agit essentiellement d'évocations (38). On voit d'ailleurs mal comment un chariot à quatre roues, lourd, aurait pu circuler sur la surface inégale d'un sol minier. La mise en œuvre et l'entretien d'un «chemin de roulage» aurait nécessité des sommes trop considérables pour qu'une telle technique ait du succès. Beaucoup plus sérieuse apparaît l'hypothèse d'un transport par brouette.

Dès 1471, elles apparaissent dans un antiphonaire de Kutna-Hora (39) et se retrouvent dans des œuvres du XVI^e siècle et jusque dans l'Encyclopédie, quoique beaucoup moins présentes que les chiens de mine (40). La brouette a l'avantage d'une grande souplesse d'utilisation, sa maniabilité lui permet de contourner les obstacles, la taille de sa roue de les surmonter mais son utilisation dans l'obscurité ne devait pas être facile et surtout sa capacité est médiocre par rapport à celle d'un chien de mine et l'effort demandé à l'ouvrier est beaucoup plus important. Elle exige, en raison de la manière de la tenir et de la conduite des galeries plus larges.

Apparue au plus tard au XIII^e siècle, la brouette a pu être utilisée de bonne heure dans les mines, avant l'apparition du roulage sur voie et son emploi a pu continuer, pour des usages limités, parallèlement à celui du

(29) Sur le Graduel de Saint-Dié, en dernier lieu, A. RONSIN, *Le Graduel de Saint-Dié et ses enluminures sur les mines, Pierres et terre, L'Art et les mines dans les Vosges*, op. cit., p. 54-57; et H. BARI, *Le Graduel de Saint-Dié*, op. cit., Sainte-Anne, la Vierge et l'Enfant, peinture sur bois datée de 1513, conservée dans l'église de Roznava, reproduction dans V. HUSA, *Hommes et métiers du Moyen Age* Paris, 1967, N° 160 et 167, voir aussi P. BENOIT, *Histoire des techniques et iconographie*, op. cit.

(30) Les représentations des mines de Kutna-Hora sont reproduites dans V. HUSA, *Hommes et métiers*, op. cit., et dans K. FRITZSCH, *Der Bergmann in der kuttenberger Miniaturen des ausgehenden Mittelalters, der Anschnitt*, 19, 6, 1967, p. 2-39. A leur sujet P. BENOIT, op. cit.

(31) *Der Anschnitt*, 16-3, 1964, p. 8.

(32) R. SLOTTA, Die Zeremonialkette von Gent - ein Meisterwerk spätmittelalterlicher Goldschmiedekunst, *Der Anschnitt*, 1, 1970, p. 2-19.

(33) La *Margarita philosophica* de Gregor REISCH a été un grand succès de vulgarisation scientifique au début du XVI^e siècle, la reproduction du chien de mine se trouve dans: F. MOSSINGER, *Alte Bergbaubilder, Der Anschnitt*, 4, 6, 1952, p. 12.

(34) M. MOLLAT, *Les affaires de Jacques Cœur, Journal du Procureur Dauvet*, Paris, 1952, p. 263 et 301; A. Th. RENDU, *Les travaux dans les mines de Jacques Cœur*, op. cit., p. 272 et surtout A. Th. RENDU, *Comptes d'exploitation des mines de Pampailly et de Joux*, op. cit., en particulier p. CI.

(35) P. BENOIT et J. GRANDEMANGE, Archéologie minière à Pampailly, à paraître dans les *Actes du 108^e congrès national des Sociétés savantes, Grenoble*, 1983.

(36) Des voies de roulage du XX^e siècle et des photographies de leur utilisation sont visibles dans la mine de sel de Bex, en Suisse, à proximité de l'extrémité orientale du Léman.

(37) Il s'agit des folios 20 et 21 du manuscrit, qui représentent: «Les ouvriers menants les chariots de myne hors de la montaigne».

(38) En particulier un bois gravé de 1531 où une mine sert d'arrière-plan à une scène représentant un malade en train de prendre une potion et dans une scène minière dues au même artiste, H. WILDORF, Die Bergbaumotiv auf den Holzschnitten des Petrarca Meisters, *Der Anschnitt*, 1-19, 1967.

(39) V. HUSA, *Hommes et métiers du Moyen Age*, op. cit., n° 149, et K. FRITZSCH, *Der Bergmann in den kuttenberger Miniaturen*, op. cit., p. 5.

(40) En particulier la brouette est représentée, vers 1453, sur le pied du grand hanap des Ribeaupierre, R. SLOTTA, *Ammerkungen zum rappolsteiner Pokal, Der Anschnitt*, 5-6, 1981, p. 292-294, et H. BARI et G. MEYER, *Le grand hanap des sires de Ribeaupierre et ses motifs miniers, Pierres et terre, L'art et les mines dans les Vosges*, op. cit., p. 23-24, parmi les documents postérieurs, on la remarque sur un dessin conservé à la *Stadtsgalerie* de Stuttgart, datée de 1600, R. SLOTTA, *Meisterwerke bergbaulicher Kunst und Kultur*, n° 6, *Der Anschnitt*, 1-1980.

(41) Sur les origines de la brouette, B. GILLE, *Petites questions et grands problèmes: la brouette, La Recherche*, avril 1980, et *La Recherche en histoire des sciences et des techniques*, Paris, 1983, p. 79-88. Agricola consacre une ligne à l'usage de la brouette dans les mines mais il la décrit avec précision, G. AGRICOLA, éd. HOOVER, op. cit., p. 154-155.

(42) *Der Anschnitt*, 6-25, 1973, page de couverture et p. 2.

(43) Des traîneaux ont été employés à différentes époques dans les mines. Actuellement la technique des auges tirées sur des voies de planches est employée lors de désobstructions en archéologie minière en raison de sa facilité de mise en œuvre.

Les ouvriers menant les chariots hors de la montagne



Les ouvriers menant les chariots de myne hors de la montagne, extrait de «la rouge myne de Saint Nicolas de la Croix (Vosges)» d'Heinrich Gross (photothèque de la SESAM).

chien de mine, Agricola signale son emploi dans les galeries (41). Cependant jamais la productivité du transport à la brouette n'aurait permis le développement des vastes exploitations horizontales qui caractérisent les mines de la Renaissance.

Enfin, document unique, la prédelle de l'autel de la chapelle Sainte Barbe de Gossensass, au sud du Brenner, représente une caisse de bois renforcée de fer, sans roues, et qui repose non pas sur deux, mais trois limandes (42). L'œuvre date des environs de 1480. S'agirait-il d'une «voie de glissement»? Faire glisser une caisse sur des planches nécessite un effort très supérieur à celui du roulement mais la technique est beaucoup plus simple à mettre en œuvre (43).

Il est impossible de conclure sur un seul exemple iconographique mais des hypothèses nouvelles peuvent surgir.

Au terme de cette première esquisse d'une histoire des débuts du roulement dans les mines quelques conclusions peuvent être retenues

même s'il reste beaucoup d'hypothèses et d'incertitudes.

1. Le roulement d'un chariot poussé par un homme sur une voie en bois, technique qui l'a emporté dans l'exploitation minière jusqu'au XVIII^e siècle et apparition du rail en fer et de la berline, qui a duré jusqu'au XX^e siècle en raison de sa facilité de mise en œuvre, son coût réduit et son efficacité tant que l'extraction restait limitée, cette forme de roulement est née au XV^e siècle, probablement en Allemagne. Elle s'est répandue en Europe à partir de 1450 semble-t-il.

2. Le roulement est intimement lié à l'histoire de l'expansion minière du siècle qui s'étend de 1450 à 1550, il est un élément essentiel du système technique, sans lui le développement horizontal des mines n'aurait pas été possible ni sur le plan purement technique ni sur le plan économique.

Ces remarques faites, bien des questions restent posées qui concernent d'une part la chronologie de l'innovation, une étude détail-

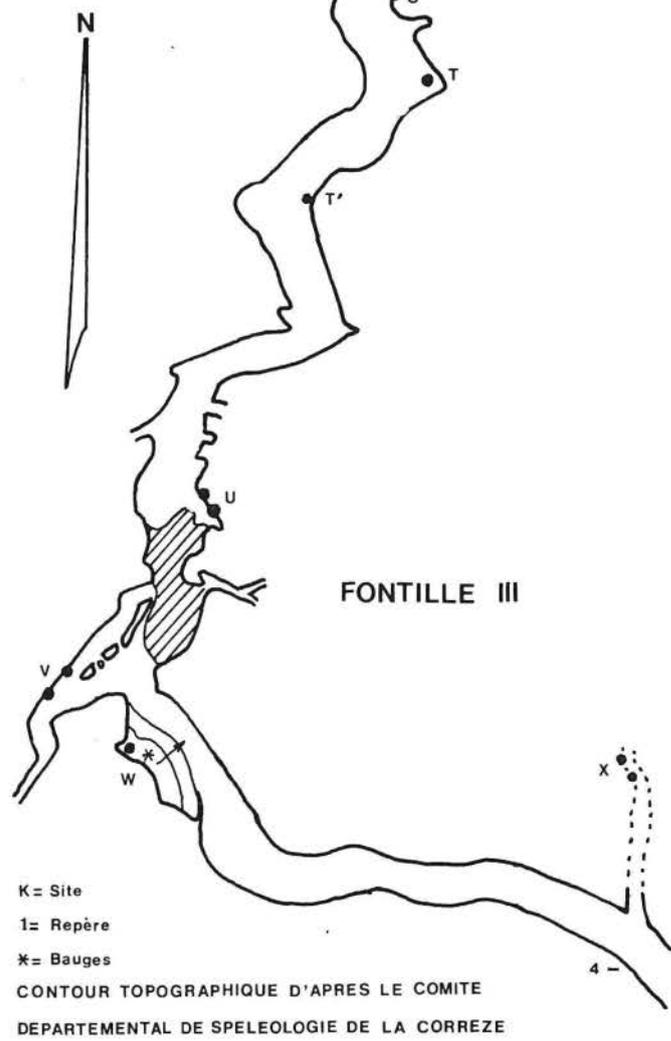
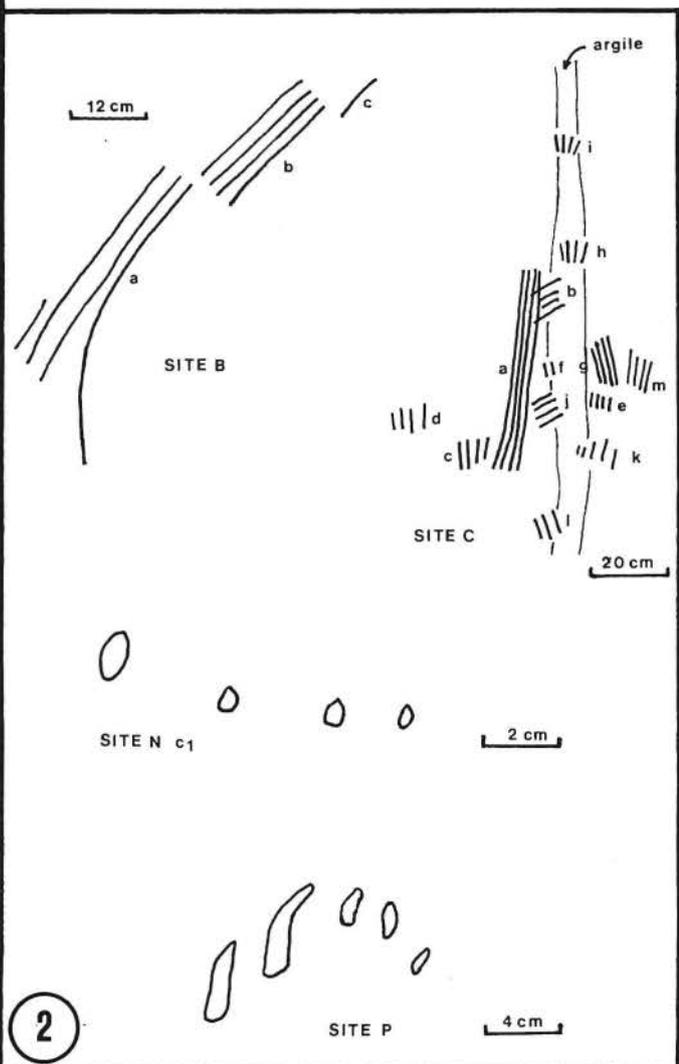
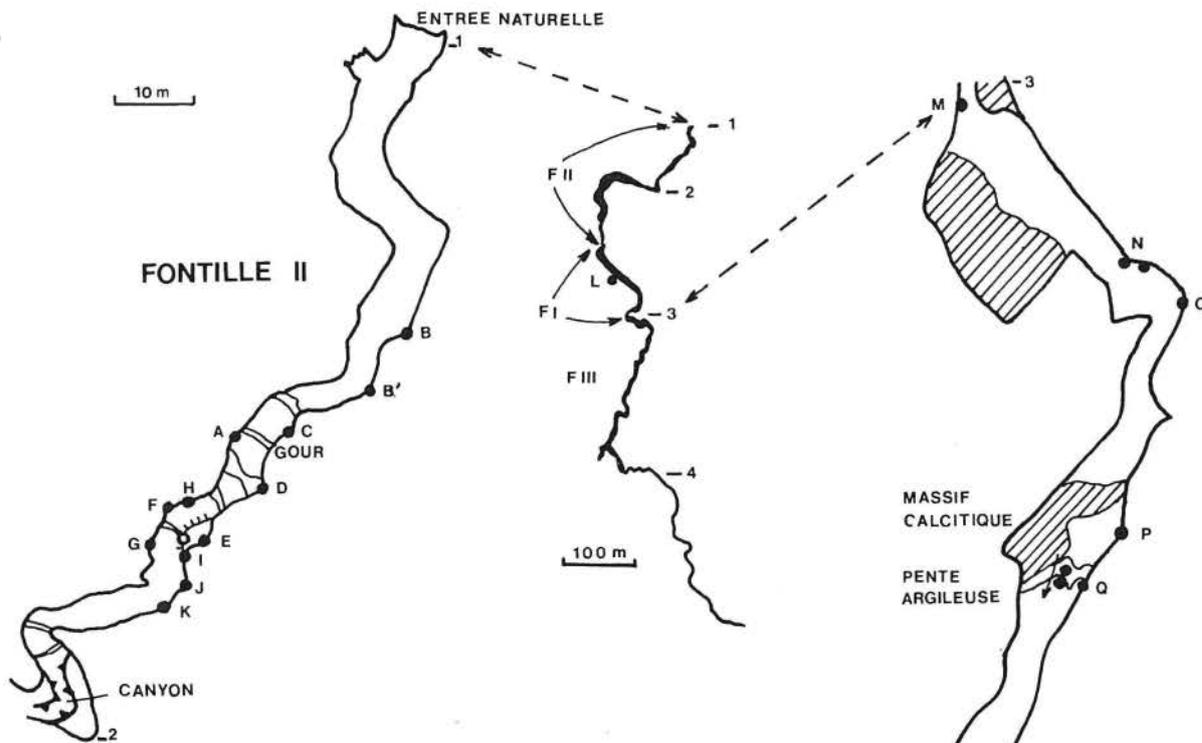
lée des archives, en particulier des comptes d'exploitation, pourrait, peut-être, permettre de suivre dans le temps et dans l'espace la diffusion de la nouvelle technique. Ces mêmes sources pourront mieux faire comprendre l'intérêt qu'avaient les exploitants à doter leurs mines de voies de roulement, on peut espérer arriver, en certains cas, à calculer l'investissement et le coût d'exploitation. Si l'iconographie et l'archéologie ont fourni déjà d'abondants renseignements sur la technique elle-même, il devrait être possible d'affiner les données en étudiant les types de chiens de mine, la nature du bois des voies et surtout en relevant systématiquement les lieux où, à l'intérieur d'un réseau minier, le roulement a été employé.

Ainsi pourrait-on mieux se rendre compte de l'importance de cette innovation dans le remarquable essor des mines métalliques à la fin du Moyen Âge et à la Renaissance.

Paul BENOIT

GROTTE DE FONTILLE - CORREZE - LOCALISATION DES GRIFFADES ET QUATRE EXEMPLES

1



K = Site
 1 = Repère
 * = Bauges
 CONTOUR TOPOGRAPHIQUE D'APRES LE COMITE
 DEPARTEMENTAL DE SPELEOLOGIE DE LA CORREZE

2

LES GRIFFADES D'URSIDES DE LA GROTTTE DE FONTILLE CHASTEАUX, CORREZE

Claude MOURET
La Tamanie 87380 MAGNAC-BOURG
avec la collaboration de

Thierry LESUR* et de Christian ESCOUSSAT*

1. INTRODUCTION

La grotte de Fontille est un drain fossile du causse de Martel, creusé dans les calcaires lithographiques du Bathonien. Son entrée naturelle, aujourd'hui colmatée, a permis auparavant le passage d'animaux divers, parmi lesquels les Ursidés ont laissé les traces les plus nombreuses : des griffades, des bauges, ou encore des traces de pelage sur les parois, mais apparemment pas de polis.

L'attribution de la plupart des griffades à *Ursus spelaeus* est faite par comparaison avec les cas déjà connus.

Dans un but de sauvegarde de l'information, la localisation de ces griffades a été pointée sur un plan de la grotte (fig. 1). Les mesures réalisées, longueur et largeur des griffades, hauteur par rapport au sol, taille et espacement des griffes, ont servi à établir des diagrammes statistiques, à partir desquels on peut rechercher les caractères de taille des animaux concernés.

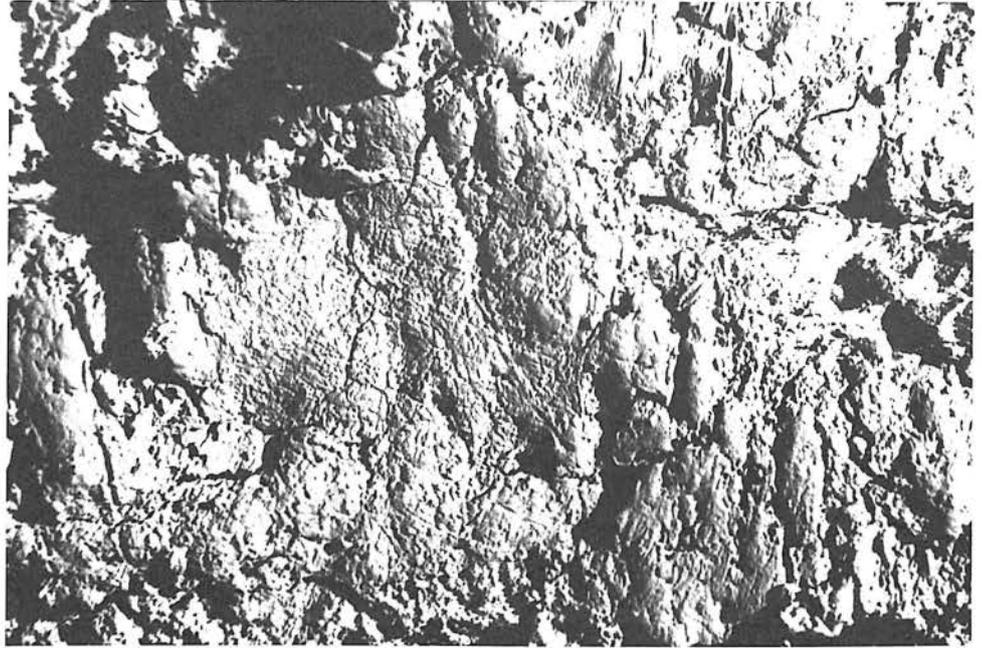
2. LA GROTTTE DE FONTILLE

Un premier tronçon (Fontille I), recoupé par des travaux de génie civil en 1881 ou 1882, a été visité par LALANDE, BARRÉ et des ingénieurs dès la découverte (LALANDE, 1884). En 1970 et 1971, G. JUBERTIE et C. MOURET tentent en vain de franchir l'étranglement ouest, mais une suite est entrevue. Celle-ci est vaincue le 19 mai 1979 par C. MOURET et P. MUET : Fontille II est ainsi découverte, ainsi que des griffades.

Le 7 et le 8 juillet 1979, Fontille III, à l'autre extrémité de Fontille I, est découverte par G. BUGEL, E. DUMONT, C. MOURET, G. NEUPONT et C. PIGNON, ainsi que d'autres griffades (MUET, NEUPONT, 1979).

La grotte se compose donc de trois parties actuelles, séparées par des concrétions calcitiques massives (dômes, stalactites, stalagmites et piliers. Fontille II, galerie de grande taille, contient à son extrémité aval, à l'opposé de Fontille I, l'entrée naturelle de la grotte, colmatée à une époque encore indéterminée, peut-être la fin du Würm ou le postglaciaire. Les griffades observées se trouvent uniquement entre cette entrée naturelle et le «Canyon», passage rétréci de 80 cm de large environ. Toutefois, plus en amont, le concrétionnement intense et les éboulements peuvent masquer les griffades antérieures ou les avoir détruites.

Entre les sites E et K, la hauteur et la disposition des griffades de la paroi Est montrent que les masses calcitiques présentes au sol existaient déjà en grande partie à cet endroit, lors du passage des animaux.



Site C : Traces d'appui de pelage sur la paroi (photo de l'auteur).

Fontille I est comprise entre deux bouchons de calcite et contient deux griffades visibles. Il y a une probabilité voisine de 100% pour que les ours n'aient pu passer que par ces zones naturellement bouchées par la calcite depuis. Un seul passage différent serait peut-être possible au niveau de l'angle principal de la galerie, mais sa hauteur au-dessus du sol est trop grande pour que cette hypothèse puisse être retenue. De plus, hormis son concrétionnement, l'ensemble de la grotte n'a pratiquement pas changé depuis le passage des ours et se trouve fossilisé par les griffades.

Fontille III, aussi galerie de grande taille, actuellement entrecoupée par des dômes calcitiques, est plus complexe. Certaines de ses galeries latérales ont pu permettre à certaines époques le passage de petits animaux. Il se pourrait, entre autres, que les griffades du site M soient liées à des animaux passés par des entrées latérales étroites et bloqués là par le dôme de calcite contigu. Dans ce cas, ces griffades ne seraient pas contemporaines de celles des ours. On ne peut exclure aussi que ces petits animaux soient venus après les ours, mais avant la fermeture complète de la galerie par la calcite, en supposant qu'elle soit antérieure à celle de l'entrée naturelle de la grotte, ce qui n'est pas probable. Il est intéressant de noter la présence de griffades dans la galerie menant au «Puits de l'Ours» (site X, fig. 1), qui est de petit calibre, très accidentée et parfois partiellement sans fond.

De telles conditions doivent aussi être prises en considération.

Les griffades les plus éloignées de l'entrée naturelle en sont à 800 m environ, ce qui est une distance couramment observée dans d'autres grottes. Ce sont celles du site X, déjà cité. D'autres griffades plus lointaines, si elles ont existé, ont pu être masquées depuis par le concrétionnement.

3. DESCRIPTION DES SITES

Elle sera effectuée par tronçon de grotte, de l'entrée naturelle vers le fond. Chaque site peut correspondre à un ou deux groupes de griffades.

3.1. Fontille II

Site A : Une griffade à 0,70 m du sol, sur argile calcifiée, assez mal visible, en paroi ouest, ainsi qu'une double griffade à 3 m du sol environ, représentant probablement les deux pattes d'un même animal, séparées par 70 cm environ.

Site B : Une coulée de calcite pentée de 65° environ descend le long de la paroi, au niveau d'un élargissement de la galerie le long d'une diaclase transversale. 3 griffades se trouvent à sa gauche (paroi nord). Etant alignées et possédant les mêmes caractéristiques, elles constituent probablement le résultat d'une seule glissade (fig. 2).

* pour les levés et contrôles sur place

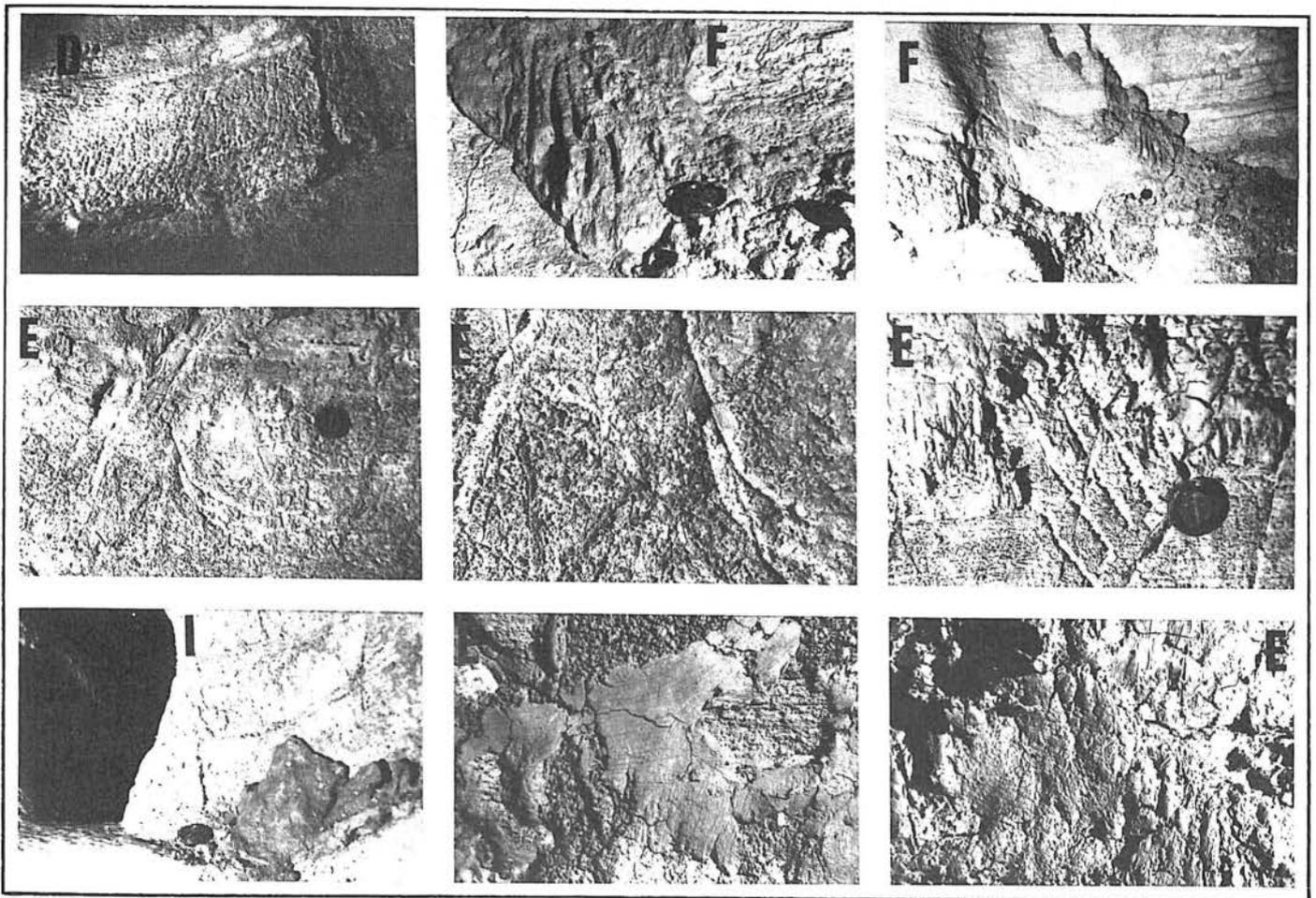


Planche 1 : (les lettres renvoient aux sites concernés). Fontille II : griffades, traces de pelage et de frottements de pelages. Photos de l'auteur. Largeur du capuchon d'objectif : 5 cm.

Site B' : Griffades sur la paroi, à 2 m du sol.

Site C : Un dièdre penté en renforcement de la paroi, axé le long d'une diaclase transversale de la galerie (fig. 2), à sa partie centrale couverte d'argile. Les griffades, très nombreuses, se situent à la fois sur l'argile et de part et d'autre sur la paroi calcaire, qui est calcifiée. Elles sont subverticales, sauf deux sub-horizontales. L'ensemble des griffades se trouve entre 2,30 et 3 m du sol, avec une nette dominance vers 2,3-2,5 m.

Site D : Il s'agit d'un renforcement de la paroi, penté de 40° environ, couvert d'argile jusqu'à 1,70 m au-dessus du niveau moyen du sol. De nombreuses griffades obliques se trouvent au-dessus de l'argile; 2 sont dans l'argile; plusieurs sont éparses. Une série de très grosses griffades se trouve sur le calcaire vers 2,5 m du sol, à droite de l'argile. La plus grande concentration se trouve à l'aplomb de l'argile.

Site E : C'est le plus varié; il correspond à une niche plus ou moins parallélépipédique large de 1,80 m et profonde (horizontalement) de 1,50 m environ, située à 2 m environ au-dessus du sol de la galerie, dont elle est séparée par une pente redressée. Le plancher de cette niche est une coulée de calcite. A droite, un gros pilier stalagmitique éloigné de la paroi de 50 cm environ en constitue, si l'on peut dire, une extrémité. La paroi de gauche supporte une griffade dans l'argile au niveau du sol et une sur le calcaire à 1,50 m de haut.

Dans l'angle avec la paroi du fond se trouvent quelques griffades partielles isolées, à 0,80 m du sol, dans l'argile (Ed). La paroi du fond comporte une griffade à 40

cm du sol (Ea), une autre à 1,40 m (Eb). 0,30 m à droite de celle-ci se trouvent des traits sur la paroi, dont un oblique associé à d'autres, courbes. Dans le détail, on peut voir sur la paroi calcaire altérée et plastique, les traces du pelage d'un animal, vers 1,20 m de haut, très probablement un ours, pour des raisons de contexte général et de hauteur, avec traces de poils très nettes. On peut voir aussi des traces de glissade du pelage contre la paroi, près du gros pilier stalagmitique. Elles s'élèvent en courbe en s'approchant de l'étranglement entre pilier et paroi. Il semble que l'animal ait tenté, en vain, de franchir cet obstacle. Outre les traces principales courbes, d'autres plus pentées montrent qu'il y a eu insistance, à moins qu'il ne s'agisse de mouvements liés à la marche arrière.

Dans l'étranglement, à 1 m de haut, se trouve sur le calcaire la griffade Ec, très nette, de grande taille.

Site F : Sur la paroi ouest; il s'agit d'un renforcement avec placage d'argile, le long d'une diaclase transversale. Il y a des griffades de grande taille, associées à d'autres, plus moyennes et plus nombreuses. Elles se trouvent aussi bien sur l'argile que sur la paroi, à 2 m de haut.

Site G : Il s'agit encore d'un dièdre argileux, avec des griffades dans l'argile calcifiée; l'une d'elles est profonde. Elles sont nombreuses entre 1,0 et 1,40 m au-dessus du sol.

Site H : Il s'agit d'un renforcement étroit avec des placages argileux. Les griffades sont dans l'argile, entre 1,0 et 1,5 m du sol. Elles sont semblables à celles du site F et s'arrêtent sous un surplomb rocheux.

Site I : Il est juste à la fin de l'étranglement du site E, au sud du pilier calcitique. La griffade unique se situe sur la paroi calcaire, à 1,80 m du sol. Elle est longue de 39 cm.

Site J : Ce site est un léger renforcement de la paroi est, avec des placages argileux, supportant une griffade à 1,40 m du sol. D'autres se trouvent dans le dièdre contigu, 5 m plus au sud.

Site K : Sur la paroi est; griffade isolée, à 1,4 m du sol.

3.2. Fontille I

Site L : Dans cette partie de la grotte anciennement connue, peu d'endroits sont propices à l'observation, car le concrétionnement est abondant et les parties argileuses relativement rares. En outre, la plupart de ces dernières, situées sur le passage, ont été piétinées depuis un siècle. Nous avons néanmoins pu découvrir sur une banquette d'argile en pente, à 70 cm du sol, entre la moitié et les deux-tiers de sa hauteur, deux griffades incontestables, à une et deux griffes. La première est recouverte d'une pellicule de calcite de 0,5 à 1 mm d'épaisseur.

3.3. Fontille III

Site M : Immédiatement à la sortie de la chaudière d'accès, sur la paroi calcaire ouest, verticale, se trouvent plusieurs petites griffades entre 55 et 65 cm de haut. Ce site peut correspondre à un passage de petits animaux, peu avant le bouchage définitif de la galerie par la calcite. Près des griffades, beaucoup plus petites que la moyenne de la grotte et morphologiquement différentes, le bouchon de calcite était composé de lames de calcite empilées, horizontales et régulières, intercalées avec de l'argile, en proportions équivalentes. Ceci indique une ancienne laisse d'eau, avec dépôt de calcite flottante. Les petits animaux ont pu venir, aussi, après le bouchage

total de la galerie, par de petites galeries latérales de Fontille III, aujourd'hui colmatées.

De toutes façons, ces petites griffades correspondent très probablement à des âges plus jeunes que celles des Ursidés, si l'on considère que leur présence à cet endroit n'est pas le fruit du hasard, ce qui semble plutôt être le cas (à cause soit du fort rétrécissement soit à cause du colmatage ultérieur).

Planche 2 : (les lettres renvoient aux sites concernés). Fontille III : Noter les griffades effilées du site M et les griffades « carrées » du site S. En W, en bas à gauche : bauge principale de 1,10 m de long et au premier plan (ombré) la seconde bauge. Noter aussi les griffades recouvertes de calcite et celles recoupant des fentes de dessiccation. Photos de l'auteur. Diamètre du capuchon d'objectif : 5 cm.

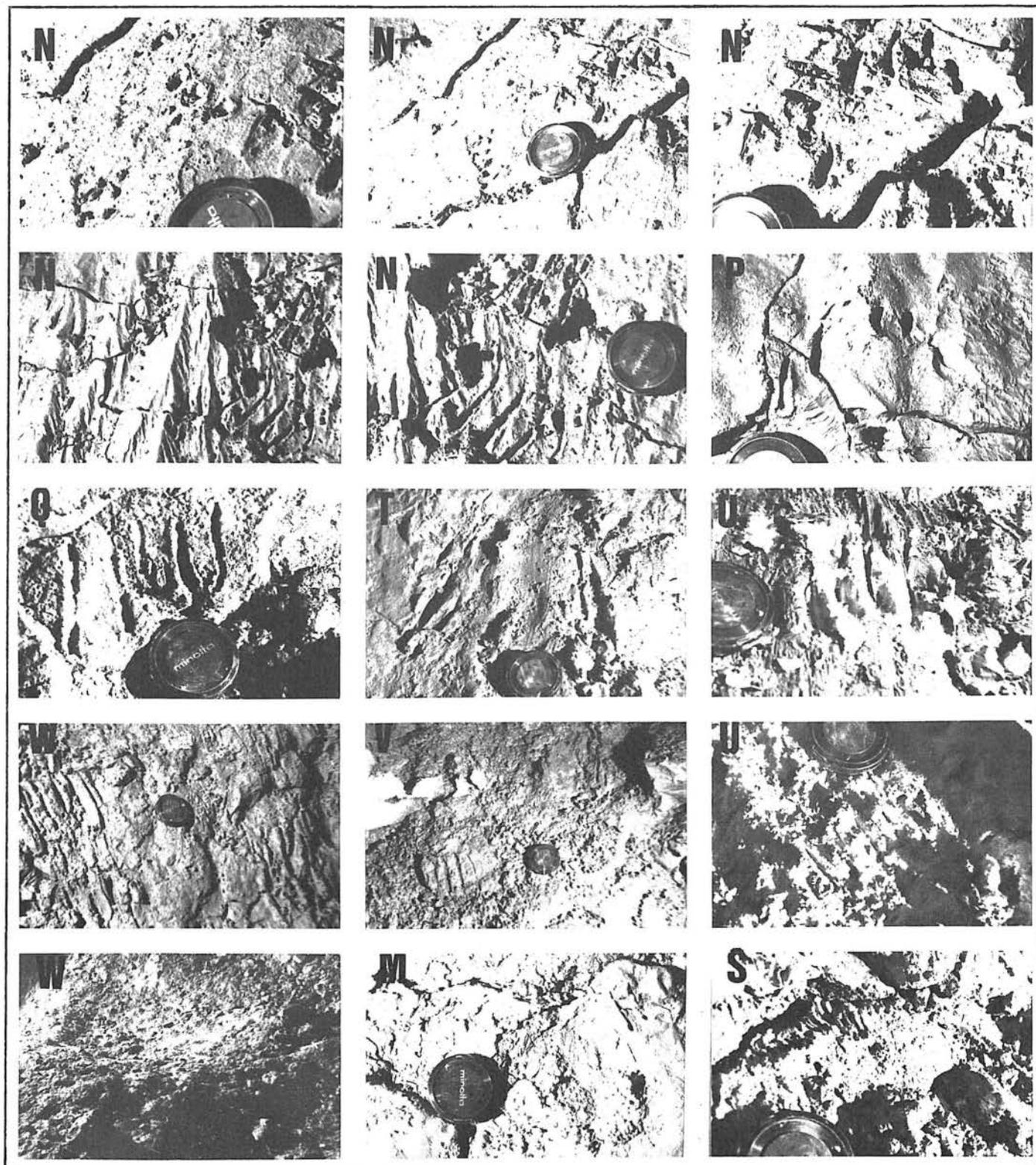
Site N : Il se trouve en paroi est d'une grande salle, près d'un angle en saillie, sur un large talus argileux incliné à 45° environ. Deux groupes géographiques de griffades (Na à Nb5) sont à 2 m au-dessus du sol, en moyenne. Les griffades fossilisent les fentes de dessiccation de l'argile et même la chute de certaines parties du talus, ainsi que la sculpture antérieure de l'argile par l'eau suintant de la paroi, qui est recoupée par les fentes.

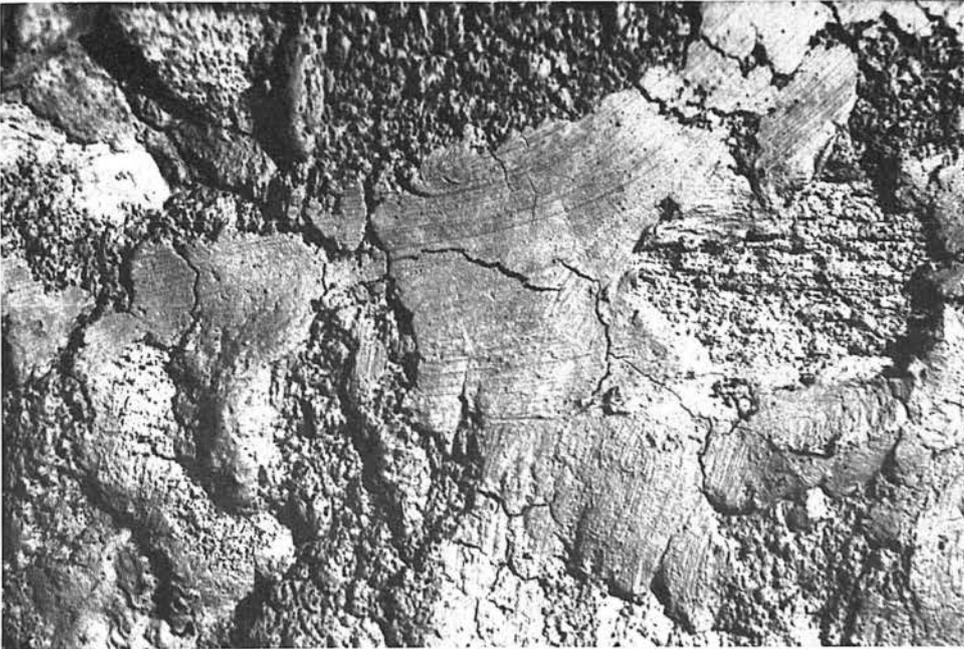
Site O : Les griffades se trouvent sur un talus argileux, penté à 45° environ, dans un virage de la galerie et en paroi est.

Site P : Cette griffade est un simple impact de patte à 5 griffes dans l'argile, bien net, à 1 m de haut, sur la paroi verticale est (fig. 2). Les deux griffes du milieu sont fossilisées par de la calcite gris bleutée.

Site Q : Ce site double correspond à un ressaut argileux dont la pente est de l'ordre de 60°. Un dièdre étroit (1 m) en pente (45°) longe la paroi est. Il est jouté par un éperon argileux, lui-même jouté par de fortes pentes. Les griffades du haut de l'éperon, situées sur le sol, sont maintenant estompées. Leur taille était du même ordre de grandeur que celles du bas de la pente. L'une de ces dernières est située sur la paroi nord du dièdre, l'autre est abritée au pied de l'éperon. Elle est recouverte d'une mince pellicule de calcite transparente. Aucune trace de glissement d'animal n'a pu être observée à cet endroit.

Site R : Les griffades se trouvent à 1,40 m de haut sur un placage argileux, sur une largeur de 1,10 m. Une griffade inaccessible se trouve à 2 m de haut sur la paroi.





Site C : Traces de frottement de pelage sur la paroi (photo de l'auteur).

Site S : Ensemble de griffades à 2 m de haut sur un talus argileux. Certains sont de type Ursidé. Il y a néanmoins des petites «griffades carrées» (photo 5), beaucoup plus petites, différentes et aussi des petites griffades étroites (3 cm) à 3 griffes, épaisses de 0,3 cm.

Site T : Les griffades se trouvent sur une faible pente d'argile imprégnée de calcite, juste en retrait d'un angle et certaines sont associées à des traces de glissade sur pelage, saillant de la paroi est. Presque toutes sont du type ours. Ce site borde le long éboulis qui occupe la galerie à ce niveau.

Site T' : Les griffades se trouvent à 1,50 m de haut sur cet éperon penté de 60° (40 derrière) qui rétrécit la galerie.

Site U : Il est situé sur la paroi est, qui a une pente entre 40 et 60°, recouverte d'argile; les griffades sont recouvertes d'une mince pellicule de calcite blanche. Elles sont situées à 1,30 m au-dessus d'un gour, près d'un dôme de calcite encore en formation.

Site V : Ce site est celui de la «galerie de l'ours», qui se termine actuellement sur des remplissages argilo-sableux. Les griffades sont sur la paroi ouest, vers 1,20 m de haut. Cette galerie a deux accès, l'un bas au niveau du sol (1,2 m environ), l'autre plus ou moins vertical, mais qui n'existait peut-être pas lors du passage des ours, probablement antérieur à une grande partie au moins de la coulée qui l'obture.

Site W : Il s'agit d'une pente argileuse de 40° environ, en retrait et surélevée par rapport au reste de la galerie. L'argile couvre plusieurs m² et supporte de nombreuses griffades, mais on ne peut les relever sans risquer de les détruire. Nous disposons donc seulement de valeurs indicatives; l'ordre de grandeur est partout le même. On y observe notamment de longues griffades (2 m environ) des deux pattes, l'animal s'étant laissé glisser sur la pente.

Il y a aussi deux bauge contiguës, à mi-pente, près de la paroi ouest et à la même hauteur (1,10 m × 1,20 m × 0,25 m et 0,80 × 0,60 × 0,15 m), (croix du site W, fig. 1). A l'origine, deux mottes d'argile irrégulières, de taille décimétrique, se trouvaient dans la bauge la plus grande. Nous n'avons pu les observer lors de nos relevés.

Site X : Deux griffades à 4 griffes, de 7 à 8 cm de large se trouvaient sur la paroi nord de cette galerie étroite (1 × 1 m environ), dont le plancher souvent sans fond mène au sommet du puits dit «de l'Ours».

4. DIFFERENCIATION DES GRIFFADES PAR LEURS MENSURATIONS

Les différentes mensurations des griffades peuvent constituer des critères de différenciation : largeur de la griffade et espacement des griffes, largeur de ces dernières et hauteur des griffades sur les parois. Des histogrammes et des graphes bi ou tridimensionnels montrent les affinités possibles entre les valeurs disponibles.

4.1. Largeur de la griffade et espacement des griffes

Ces deux grandeurs sont complémentaires, puisque l'espacement moyen permet de comparer des griffades avec un nombre différent de griffes, alors que les largeurs des griffades ne peuvent l'être que pour un nombre de griffes similaire. Les mesures ont été faites sur les espacements ou les largeurs les plus significatifs, puisque chacun des espacements varie sur sa longueur, et que deux espacements consécutifs n'ont en général pas la même valeur. Faute de pouvoir déterminer à quelles griffes ou même à quelle patte on a affaire, on ne peut comparer des inter-griffes donnés et on est contraint de raisonner sur des valeurs moyennes, ce qui constitue une perte d'information non négligeable.

La répartition des largeurs de griffades est illustrée par la figure 3. La population la mieux représentée pour $n = 4$ griffes, montre de nombreuses valeurs entre 8 et 10 cm et l'existence de griffades de grande largeur : 16 et 17 cm.

Les espaces intergriffaux moyens, visualisés sur l'histogramme de la figure 7, montrent des valeurs modales de 1,25 cm à 2,25 et éventuellement à 3,25 et 3,75. La valeur médiane, 2,25 cm, correspond à la valeur modale principale. Cet histogramme comporte un nombre de valeurs plus grand (50) que celui de la figure 3 (22 valeurs à $n = 4$), mais elles sont moyennées; il reste toutefois plus précis.

4.2. Largeur des griffes

La largeur des griffes constitue la deuxième dimension utilisable. Là encore, on

est contraint de moyenniser les valeurs, faute de pouvoir identifier quelles sont les griffes et les pattes observées. Ceci reste toutefois une imprécision mineure, puisque la largeur apparente de la griffe dépend beaucoup de la pression exercée par l'animal : plus la pression est grande, moins la paroi va résister et plus la partie de griffe concernée va être épaisse, celle-ci étant quelque peu effilée. En supposant l'animal redressé, la pression maximale correspondrait à une patte avant perpendiculaire au corps ou proche de son centre de gravité. Les pattes arrière laissent probablement peu de griffades, pour des raisons évidentes de posture; elles peuvent éventuellement en donner sur les plans inclinés, si l'animal a glissé.

Une restriction supplémentaire vient du fait que des animaux différents pourraient avoir des largeurs de griffes identiques. Il faut donc mettre à part les griffades provenant clairement d'animaux différents.

L'histogramme de la figure 6 (48 valeurs) a des valeurs modales de 0,4 cm à 0,65, qui est à la fois la valeur médiane et la plus grande des valeurs modales, et à 0,95. Là encore, on trouve une valeur exceptionnelle, de plus de 1,5 cm. Beaucoup de griffades peu marquées sont situées entre 1 et 2 m de haut. Ainsi R_{C1} , qui a 17 cm de large, et en apparence 4 griffes de 0,4 cm, est située à 1,4 m de haut. Il y a donc nécessairement des cas où l'animal écartait ses phalanges à faible hauteur pour griffer la paroi, en exerçant une pression faible.

4.3. Comparaison largeur des griffades-espacement des griffes et largeur des griffes.

D'histogramme à histogramme, c'est celui des espacements moyens (fig. 7) qui ressemble le plus à celui des largeurs de griffes (fig. 6), ce qui est d'ailleurs normal, étant donné sa représentativité plus grande que celui de la figure 3. Une comparaison plus détaillée des largeurs de griffades avec celles des griffes (fig. 4) montre pour la population à 4 griffes, la mieux représentée, que les griffes les plus grosses se trouvent correspondre aux griffades de 8 cm environ. Pour les griffades plus larges, la largeur des griffes peut être plus faible, ce qui peut être dû soit à des impacts plus faibles, une pression plus faible étant exercée sur la paroi lorsque toutes les griffes sont marquées, soit inversement à des impacts plus marqués pour 8 cm qu'ils ne devraient l'être, avec une pression maximale de l'animal sur la paroi. Le graphique largeur de griffes = f (espacement moyen) montre une corrélation assez lâche, liée aux causes de dispersion des valeurs énoncées plus haut.

4.4. Hauteur des griffades sur les parois

Grandeur très utile, car elle peut donner une idée de la taille de l'animal en fonction des hypothèses de posture, sa définition reste entachée d'imprécision. En effet, le niveau du sol n'est pas toujours aisé à définir avec précision : le sol actuel est-il celui de l'époque des griffades? S'il y a eu un gour, comment se définit le niveau du sol? La pente de la paroi doit aussi être assez redressée, pour que l'animal n'ait pas pu grimper, sinon on ne peut avoir de valeur significative.

Pour cette grandeur, les parties de la grotte Fontille II et Fontille I + III ont été considérées séparément. Les diagrammes 8a et 8b montrent des différences non négligeables, puisque la médiane pour F II et de 2,25 m (32 valeurs), et que celles pour F I + III est de 1,25 seulement (21 valeurs), mais les talus argileux à pente modérée y sont plus nombreux et les hauteurs plus difficiles à définir.

Fig. 3. Histogramme des largeurs de griffades en fonction du nombre de griffes visibles (ordonnées en nombre de cas observés); lignes obliques : espacement moyen des griffes, en cm.

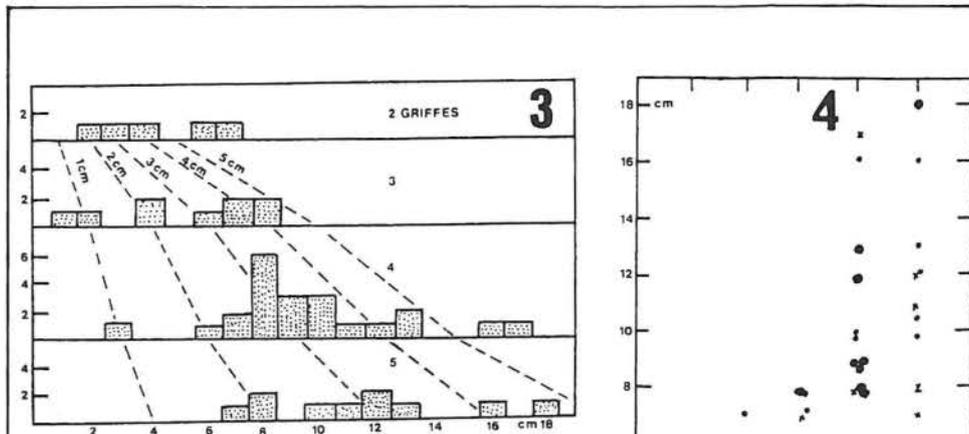


Fig. 4. Largeur de la griffade en fonction du nombre de griffes. Gros point : largeur de griffe supérieure ou égale à 1 cm; petit point : 0,6 à 0,9 cm; croix : 0,4 à 0,5 cm; tiret : 0,35 ou inférieur à 0,35 cm.



Fig. 5. Largeur des griffes en fonction de l'espacement moyen des griffes. Points : Fontille II; croix : Fontille I et III; ligne brisée : limite supérieure des points de Fontille I + III.

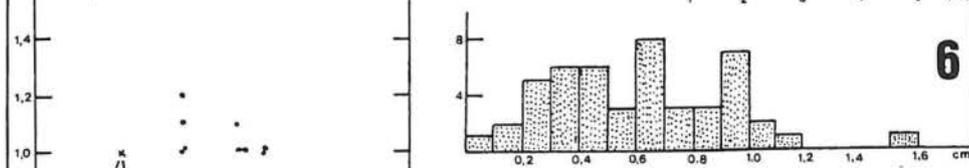


Fig. 6. Histogrammes des largeurs de griffes (en nombre de cas observés).



Fig. 7. Histogrammes des espacements moyens des griffes (en nombre de cas observés).

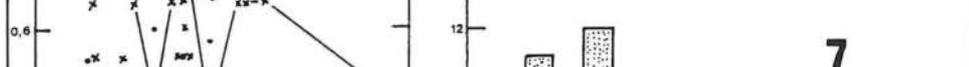


Fig. 8. Histogrammes des hauteurs de griffades au-dessus du sol de la cavité (en nombre de cas observés); 8a : Fontille II; 8b : Fontille I et III.

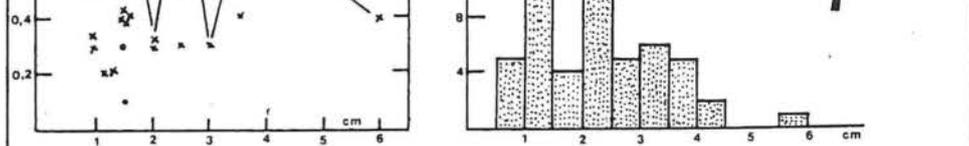
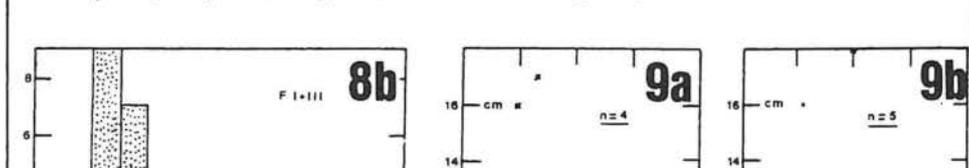


Fig. 9. Largeur des griffades en fonction de leur hauteur au-dessus du sol (n = nombre de griffes; points : F II; croix : F I + III).



Les valeurs extrêmes atteignent 3,1 m dans F II, mais ne dépassent guère 2 m dans F III, encore qu'on y observe des cas douteux plus hauts. D'après la figure 9, les griffades à 5 griffes visibles se trouvent être plus près du sol, sans qu'il y ait d'explication satisfaisante à cela. Les populations statistiques sont trop faibles pour qu'une telle différence soit de toute façon significative.

4.5. Répartition des griffades dans la grotte

De même que les griffades apparaissent être situées plus haut sur les parois auprès de l'entrée naturelle de la grotte (Fontille II), avec les réserves déjà formulées, les espacements et les largeurs des griffes y sont aussi plus grands.

Les griffades moyennes à griffes épaisses, larges de 8 cm (valeur modale), avec $n = 4$ (fig. 4) viennent aussi de Fontille II, où elles se trouvent aux alentours de 2,30 m de haut (valeur médiane). Elles y sont relativement groupées géographiquement toutefois.

4.6. Les griffades particulières

Deux cas sont possibles, avec un particularisme, soit dans les dimensions, soit dans la morphologie.

4.6.1.

Les griffades observées les plus grandes sont Ec et Fa dans Fontille II et Rc et Vc dans Fontille III. Elles sont larges de 16, 18, 17 et 16 cm pour 4 griffes et la largeur moyenne des griffes est de 0,8; 1,0; 0,4 et 0,7 cm respectivement.

Or, selon KURTEN (1976), les griffades connues pour *U. spelaeus* atteignent 14 cm de large seulement. Si cette valeur est précise, certains des ours de Fontille étaient de taille exceptionnelle.

La grande majorité des autres griffades sont rapportables à des *U. spelaeus* normaux, mais celles faisant exception dans les petites dimensions se distinguent aussi par leur morphologie.

4.6.2. Griffades à morphologie particulière

Deux types sont bien distincts : d'une part il y a les «griffades carrées» de type Sc, à griffes jointives (épaisseur : 0,2 cm), mais l'animal correspondant n'est pas identifié; d'autre part, il y a des griffades rapportables à de petits Féliidés ou à des rongeurs. Ainsi Ma correspond à des griffes longues et effilées, espacées de 1,1 cm et épaisses de 0,2 cm.

L'étude de ces dernières serait à détailler, mais il peut s'agir de traces de petits animaux

entrés par des diverticules étroits de la galerie principale, après que les bouchons de calcite aient obturé la galerie. Ce pourrait être le cas en M, où les griffades se trouvent très près et après le bouchon de calcite.

5. Taille et paléooéthologie des ours de Fontille

En utilisant les médianes présentées plus haut, on peut reconstituer un ours standard théorique. Avec un espacement moyen de griffes probable de 2,25 cm (soit une griffade

à 5 griffes de 9 cm), avec des griffes épaisses de 0,65 cm en apparence et laissant des traces plutôt vers 2,25 m de haut ou en dessous.

Avec les valeurs maximales, on trouverait des géants théoriques laissant des griffades à 5 griffes de 23 cm et possédant des griffes épaisses de 1,6 cm ! Les griffades à 3,1 m de haut pourraient lui être dues. Un tel individu risque d'être caricatural, car les griffes les plus larges ne correspondent pas nécessairement toujours aux griffades les plus larges, et car les griffades les plus larges ne sont pas les plus hautes. Un animal de très grande taille reste néanmoins nécessaire pour expliquer les mensurations extrêmes, encore qu'il convienne de rester prudent.

Des données issues de la littérature permettent de préciser quelques faits. L'ours brun actuel (*Ursus arctos*) est souvent comparé avec l'*Ursus spelaeus*, souvent pour ses mensurations, parfois pour ses mœurs, avec des raisonnements nécessairement indirects. KOBY (1961) pense qu'*U. spelaeus* est plus lourd et plus massif qu'*U. arctos* et insiste sur son dimorphisme sexuel. KURTEN (1976) pense que le poids d'*U. spelaeus* serait de 400 à 500 kg, par comparaison des fémurs avec ceux d'*arctos*. Celui de ce dernier à l'état adulte est de l'ordre de 200 kg : 90 à 250 (BURTON, 1976); 80 à 300 (mâle) et 65 à 250 (femelle) (ROUZAUD, 1980); 160 (KURTEN, 1976).

Notons que les dimensions des griffes d'un ours actuel du Caucase sont les suivantes : 0,8; 1,0; 1,1; 1,1; 1,0 (mâle); 0,8; 0,9; 0,9; 0,9; 0,8 (femelle), d'après COUTURIER (1954), ce qui reste très proche des largeurs de griffes observées à Fontille, correspondant malgré tout à des pointes de griffes plutôt qu'à leur partie la plus large.

Les chiffres publiés pour la longueur d'*U. spelaeus* — distance museau-queue — varient de 2,20 m selon KOBY (1961) à 2,40 m, voire 3,50 m suivant différentes compilations d'auteurs. La longueur de la tête est de l'ordre de 50 cm chez l'adulte. Selon les chiffres de KOBY (1961), la longueur des membres varie de 0,62 m (femelle) à 0,94 (mâle) pour ceux avant et de 0,65 m (femelle) à 0,81 (mâle) pour les autres.

En utilisant les chiffres de KOBY, on calcule une hauteur maximale de l'animal entre 3,0 m (femelle) et 3,50 m (mâle), tous membres étendus, ce qui est évidemment à partir de ces chiffres un maximum. La hauteur de l'animal au garrot est par ailleurs de 1,40 m, selon KOBY, qui considère ses chiffres comme déjà exceptionnels (et celui de 2,20 m déjà énoncé, aussi) mais cet ordre de grandeur correspond assez bien avec les traces de pelage observées vers 1,20 m de haut.

Par ailleurs, il convient de tenir compte de la posture des ours, sur lesquelles différentes

sources donnent des indications. Selon A. ROUZAUD (1980), l'ours brun actuel «n'adopte la position verticale qu'exceptionnellement, pour jouer, combattre ou lorsqu'il est surpris».

M. STRUDWICKE (1982, comm. pers.) précise qu'au Canada les ours griffent les arbres aussi haut que possible, pour montrer leur taille et marquer leur territoire. Les ours sont réputés avoir mauvaise vue et bon odorat (in litteris).

Cette notion de territoire, si elle est transposable à *U. spelaeus*, est certes une explication suffisante des griffades. Ce n'est peut-être pas la seule, mais elle s'applique bien aux griffades élevées, sérieuses ou non. La notion «d'affûtage de griffes» contre les parois reste modérément satisfaisante car elle implique de nombreuses griffades, ce qui n'est pas vraiment le cas.

Les griffades les plus élevées (3,1 m) correspondraient bien à des êtres déjà grands mais on connaît des ours actuels exceptionnels atteignant ces hauteurs, voire plus (COUTURIER, 1954).

On peut se demander pourquoi les grandes griffades semblent se trouver plutôt près de l'entrée naturelle. La notion de territoire marqué dès son accès pourrait convenir. Le «Canyon», en tous cas, ne serait pas une gêne a priori pour la pénétration des individus les plus grands plus en avant dans la grotte, car COUTURIER annonce une largeur de l'ours brun de 50 cm et car l'*U. spelaeus* ne peut pas être tellement plus large. Des distances de 40 à 70 cm environ ont été observées dans la grotte pour deux séries de deux griffades associées gauche et droite.

CONCLUSIONS

La présente étude montre que la population d'Ursidés qui ont vécu dans la grotte de Fontille, outre un certain nombre de sujets de taille moyenne, comprenaient probablement aussi des individus de très grande taille. Ces derniers auraient laissé les griffades les plus larges et aussi les plus éloignées du sol. Certes l'ours pourrait avoir partiellement grimpé sur une pente redressée près du sol, mais on ne retrouve pas dans ces cas de traces imputables à des pattes arrière.

Lorsque les ours ont habité la grotte, (Würm II ou III, période d'abondance maximale de l'espèce), elle n'était pas encore obturée par les bouchons de calcite qui la sectionnent de loin en loin, mais déjà fossile et les griffades oblitérent toutes les autres formes de la grotte, sauf quelques pellicules de calcite. La taille de la galerie, large de plusieurs mètres, a probablement facilité l'habitat. Plus tard, possiblement vers la fin du Würm ou au début du Postglaciaire, l'entrée naturelle a dû se

colmater progressivement, à cause des collutions. Le développement des points de concrétionnement rapide — dômes de calcite — perdure encore. Les griffades ont donc aussi un intérêt de marqueur chronologique, en plus de leur intérêt paléontologique.

REMERCIEMENTS

Il nous est agréable de remercier les topographes du Comité Départemental de Spéléologie de la Corrèze, du travail desquels provient le fond topographique simplifié de la figure 1. L'amitié des co-inventeurs de la grotte fut aussi bien agréable et concourut grandement aux découvertes.

Claude MOURET

BIBLIOGRAPHIE

BANG (P.), DAHLSTRÖM (P.) - 1985 - Guide des traces d'animaux. Delachaux et Niestlé éd., Paris, «Les guides de naturaliste», 240 p.

BARTHE (J.-M.) - 1984 - L'ours des cavernes. *Spelunca Bull.*, n° 16, pp. 25-28.

BURTON (M.) - 1976 - Tous les mammifères d'Europe. Paris-Bruxelles, Elsevier Sequoia éd., 256 p.

COUTURIER (M.) - 1954 - L'ours brun. Grenoble, auteur éd., 904 p., 82 pl., 49 fig.

KOBY (F.-E.) - 1961 - Ce qu'on sait actuellement de l'ours des cavernes, à propos d'une reconstitution plastique en grandeur nature. Porrentruy impr., *Actes Soc. Jurassienne d'Emulation*, 1960, 2^e série, vol. 64, pp. 199-?

KURTEN (B.) - 1955 - Sex dimorphism and size trends in the cave bear, *Ursus spelaeus*, ROSENMÜLLER and HEIMOTH. *Acta zool. fennica*, t. 90, pp. 1-48.

KURTEN (B.) - 1958 - Life and death of the Pleistocene cave bear. A study in paleoecology. *Acta zool. fennica*, t. 95, pp. 1-59, 17 tabl., 8 fig.

KURTEN (B.) - 1976 - The cave bear story. New-York, Columbia, Univ. press.

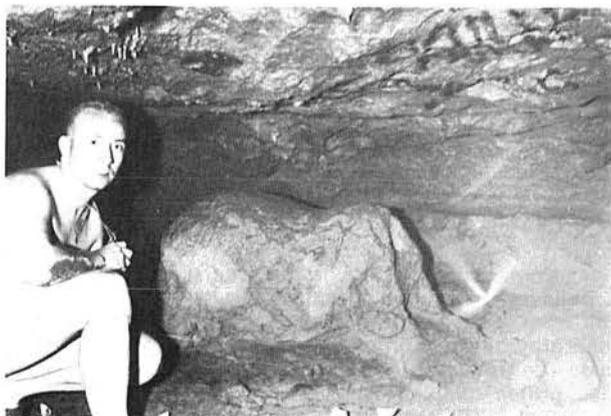
LUMLEY (H. de), CREGUT (E.), GUERIN (C.), CHALINE (J.), MOURER-CHAUVIRÉ (C.), CHEYLAN (M.) - 1979 - La faune, in «L'Homme de Tautavel». Dijon, *Dossiers de l'Archéologie*, n° 36, pp. 28-51.

MUET (P.), NEUPONT (G.) - 1979 - Fontille II-III. Brive, *GSC Infos*, n° 4, pp. 28-33.

PLANTAIN (P.-H.) - 1981 - L'ours et l'homme aux temps préhistoriques. Dijon, *Init. Archéo. Préhist.*, n° 37, pp. 7-10 et p. 48.

PRAT (F.) Les carnivores : Ursidés. CNRS éd., *La Préhist. franç.*, t. 1, pp. 376-383.

ROUZAUD (A.) - 1980 - L'ours dans la préhistoire. Dijon, *Init. Archéo. Préhist.*, n° 16, pp. 23-35.



Ours acéphale de Montespan (Haute-Garonne). (Photo B. Bordier).

PLAIDOYER POUR UN ART DÉGÉNÉRÉ

Lucien GRATTE
26, rue de l'Oustalet. GAGNAC 31150 FENOUILLET

UN ART EN QUETE DE SON IDENTITE

Dès son ouverture au public, le fac-simile de Lascaux a connu un succès dépassant toutes les espérances, succès qui ne se démentit pas au fil des saisons touristiques. Car l'art pariétal paléolithique est désormais une « valeur sûre » du fonds culturel de nos civilisations occidentales. Il n'en a pourtant pas été toujours ainsi, et l'on se rappelle la vague de scepticisme, voire l'hostilité qui accueillirent les premières découvertes au siècle dernier.

De fait, cet art dérangeait l'idée que l'on se faisait de ces civilisations considérées alors comme primitives, à peine dégagées de l'animalité.

Mais la multiplication des découvertes aidant, il fallut bien se rendre à l'évidence : les chasseurs du Paléolithique supérieur avaient bien, non seulement orné les parois de leurs cavernes, mais aussi fait montre de très hautes qualités artistiques. Parallèlement à cela, disparaissait un degré de spiritualité élevé et une organisation très élaborée de la société d'alors, notions qui allaient bouleverser la perception de ces cultures.

Petit à petit se mettait en place la vision désormais classique d'un âge d'or de la caverne, culminant au Paléolithique supérieur avec les manifestations admirables de Lascaux, Altamira, Niaux, Pech-Merle... Et comme toute « histoire » doit comporter une fin, en accord avec la théorie de « grandeur et décadence... », on avait admis, succédant à un Paléolithique « royal », une survie précaire d'un art pariétal qualifié, pour la circonstance, de « dégénéré ».

Car les chercheurs n'avaient pas été sans remarquer que les manifestations pariétales paléolithiques étaient loin d'être uniques. Mais ces « autres » manifestations déroutaient. A l'extraordinaire qualité artistique des figurations animalières, elles opposaient une exécution sommaire, un aspect fruste, renforcé par l'extrême schématisation. Inconsciemment marqués par leur formation originale — ces chercheurs étaient exclusivement des paléolithiciens — ils avaient à peu près adopté le schéma suivant : « c'est ancien ; ce n'est manifestement pas paléolithique ; donc, c'est protohistorique... », à l'exception des dessins, patronymes, dates, facilement identifiables, qualifiés d'« historiques ». D'où l'idée d'une « dégradation » du message, liée à une « dégradation » de son expression graphique.

En réalité, ces chercheurs oubliaient un peu vite que l'art pariétal paléolithique est loin d'être exempt de manifestations schématiques, bien au contraire. Ils oubliaient également que la fréquentation de la caverne par l'Homme n'avait jamais cessé, même si elle n'était plus le refuge privilégié des hommes des temps glaciaires.

Restait la notion de « dégénérescence ». Cette notion ne reposait en fait fait que sur

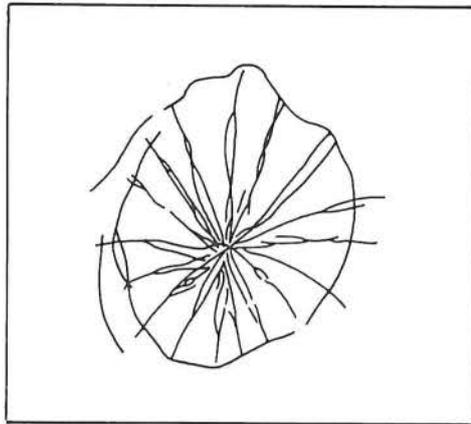


Fig. 1. Rouelle solaire de la grotte de Peyort, Cazavet, Ariège.

des caractères subjectifs liés à des considérations esthétiques.

Il faut bien comprendre que la qualité du message graphique est indépendante des caractères esthétiques, liés à l'habileté de l'opérateur et fluctuant selon la mode du temps. Nous prendrons deux exemples choisis volontairement aux limites du propos :

— le peintre Vlainck a souvent représenté des paysages de l'été. Sous un ciel noir d'orage, des blés dorés se couchent sous le vent. La palette exceptionnellement dense et le trait puissant donnent une intensité dramatique extraordinaire au tableau. Sans déployer une technique picturale sophistiquée — le style de Vlainck serait plutôt à l'emporte-pièce — l'artiste nous fait ressentir intensément ce moment fugace. Pourtant, le « message » véhiculé par le tableau est nul, ou presque : il va pleuvoir ;

— à l'opposé, l'expression graphique réduite à sa plus simple expression : une croix tracée de deux traits furtifs sur une porte, un pilier d'église, le crépi d'un vieux mur, un rocher. Qualité esthétique : nulle. Et pourtant ! Quelle intensité dans le message. Celui qui a tracé cette croix affirme par là sa foi en une somme de valeurs complexes qui organisent les relations matérielles, temporelles et spirituelles d'une collectivité.

Par ces deux extrêmes, on voit que l'évolution vers le schématisme est loin de s'accompagner d'une régression de la qualité du message véhiculé. Au contraire, le schématisme, par sa simplicité, sa rapidité de mise en œuvre, est un progrès. Il sous-tend des capacités d'abstraction de plus en plus élaborées et préfigure ce que sera l'évolution du concept graphique qui, de la héraldique médiévale au moderne « logo » de la publicité du XX^e siècle finissant, acquerra valeur d'expression universelle.

Ce n'est donc pas de « dégénérescence » et de disparition de l'art pariétal des cavernes qu'il faut parler, mais bien de « survivance » d'une tradition qui, sous des expressions différentes, perpétue le rapport homme/caverne à travers les âges.

Fort heureusement, l'attitude des premiers chercheurs vis-à-vis de l'art pariétal post-glaciaire ne fut pas monolithique. Quelques publications en firent mention çà et là. Toutefois, le premier qui tenta une synthèse de ces phénomènes maintenus dans la marginalité à cause des problèmes nombreux qu'ils soulèvent fut l'abbé Glory, synthèse qui se concrétisa par quelques publications, dont le tome X de la revue *Préhistoire*, consacré aux « Peintures de l'âge du métal en France méridionale », paru en 1948.

Malheureusement, cette œuvre de pionnier est entachée des inévitables défauts liés au passage obligé de toute recherche à travers deux « filtres » : la culture personnelle du chercheur, avec ses convictions, ses « codes » moraux, et le « miroir déformant » dans lequel se mire la recherche à un moment donné.

Les travaux de Glory portèrent essentiellement sur les Pyrénées ariégeoises et les départements méditerranéens. A partir des années 1950, Paul Bellin se consacra à l'art pariétal post-glaciaire et rupestre du sillon rhodanien et des Préalpes. De même que Glory à la fin de sa carrière, Bellin pressentit qu'une partie de cet art, généralement considéré comme protohistorique, pouvait être d'essence médiévale.

LA PROBLEMATIQUE LIEE A L'ART PARIETAL POST-GLACIAIRE

Afin de donner un aperçu des nombreux problèmes soulevés par l'art pariétal (ou des parois de grotte, par opposition à l'art rupestre, ou des rochers de plein air), nous évoquons brièvement trois sites.

1. La grotte de Peyort à Cazavet, Ariège

Elle s'ouvre au pied du massif karstique de Lestelas/Balaguères, en rive droite d'un petit ruisseau dont elle représente un ancien bras souterrain aujourd'hui abandonné par les eaux.

Dans la salle d'entrée existent des gravures découvertes en 1933 par Norbert Casteret et étudiées par l'abbé Glory.

Nous distinguerons arbitrairement trois ensembles :

— la « scène de chasse » (appellation Glory). Elle comprend une rouelle solaire (fig. 1) d'environ 0,60 m de diamètre, une arbalète, 4 quadrupèdes à la limite de la lisibilité du fait de leur mauvais état de conservation et un poisson. Cette scène se développe à partir d'un massif stalagmitique évoquant curieusement la forme d'un plantigrade ;

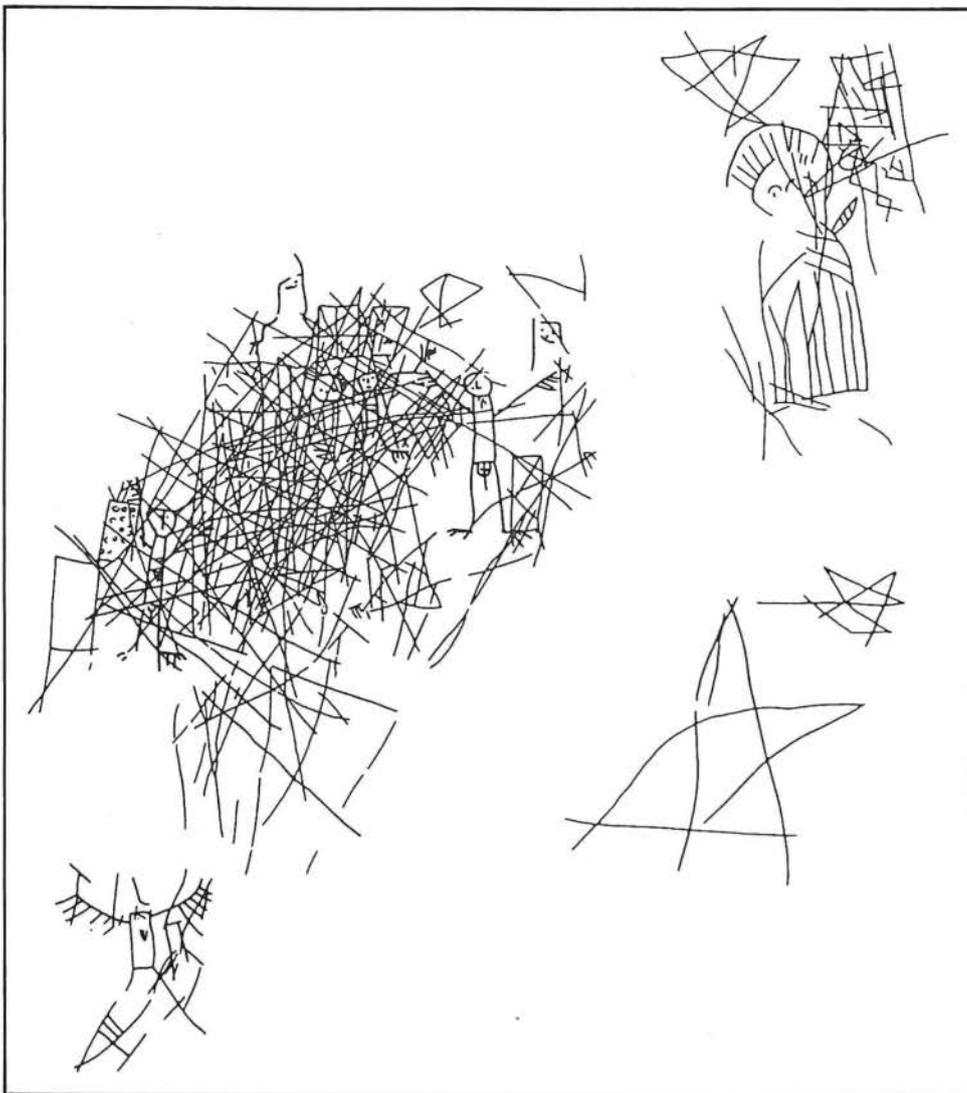


Fig. 2. Panneau gravé de la grotte de Santo-Eulasio, Ornolac Ussat-les-Bains, Ariège.

— le «cartouche», symbole schématique entouré de figurations géométriques plus ou moins complexes, dont deux étoiles à cinq branches et une arbalète;

— deux panneaux «complexes», formés d'entrelacs, réalisés sans logique apparente. Glory attribue la scène de chasse à l'âge du Bronze et le reste des figurations à l'âge du Fer, au prix d'une argumentation peu convaincante à notre avis, les éléments directement interprétables (la rouelle, les étoiles et les arbalètes) appartenant au répertoire iconographique de cultures largement dispersées dans le temps.

Le contexte archéologique proche est très flou : Glory parle de «modelages magdaléniens» dans la caverne, sans en donner une représentation; également il parle d'une hache en calcaire poli trouvée dans un champ voisin. Plus près de nous, une lamelle de silex a été trouvée dans la galerie principale de la grotte.

2. La grotte de Santo-Eulasio, à Ornolac-Ussat-les-Bains, Ariège.

Il s'agit d'un vaste porche ouvert en rive gauche de l'Ariège, un peu en aval des spoulgas fortifiées de Bouan. Dans une circonvolution de la paroi formant un petit balcon suspendu sur le vide existe un panneau finement gravé, caractérisé par une superposition assez importante de traits (fig. 2). On peut distinguer, très sommairement :

- des figurations anthropomorphes, au nombre de 7;
- des «grilles», des «marelles», en surimpression;

— des formes géométriques, dont des étoiles à 5 branches.

Ces gravures ont également été étudiées par l'abbé Glory, qui les attribue à la Tène. Il voit une représentation de la Déesse-mère, coiffée d'un diadème, le vêtement plissé fermé par une fibule, et l'interprète comme un symbole de fécondité veillant sur les anthropomorphes, dont un guerrier grimaçant élevant à bout de bras la tête coupée d'un ennemi (pratique, dit-il, fréquente chez les Gaulois et rapportée par César).

Or, la «Déesse-mère» de Glory possède, dans la partie inférieure du visage, des traits qui évoquent irrésistiblement une moustache. Ceci est à peine perceptible à l'œil nu, et nos premiers relevés n'en font pas état, ainsi qu'on peut le voir sur la fig. 2; cependant, la «moustache» apparaît incontestablement sur les macrophotographies. Par ailleurs, sous réserve d'un dépouillement plus élaboré des relevés en cours, la «tête coupée» brandie à bout de bras présente, sous l'enchevêtrement des «grilles» qui oblitèrent le dessin, un corps et des membres. Il s'agirait donc, en fait, d'un anthropomorphe à part entière.

Tous ces personnages ont en commun la même attitude dite «en position d'orant», les bras levés vers le ciel, le corps nu à l'exception d'une ceinture ou d'un baudrier. Leur facture les rapproche des personnages de la Peyra Escrita, gravés en altitude sur des rochers du Capcir.

Là encore, l'attribution à la Tène par l'abbé Glory semble dénuée de fondements sérieux. Si les «grilles» et les «marelles» se rencontrent dans l'iconographie protohistorique,

elles ont également eu les faveurs populaires du Moyen Age, comme le prouvent les gravures de certains monuments de cette époque. Encore convient-il de remarquer qu'il n'y a pas obligatoirement contemporanéité entre les divers constituants des panneaux, qu'ils soient ou non en superposition.

Le contexte archéologique proche est très riche, puisqu'il va du Magdalénien, avec les grottes de Fontanet, etc... au Moyen Age, avec les porches fortifiés de Bouan.

3. Le traouc del Calel, à Sorèze, Tarn.

C'est une vaste caverne possédant aujourd'hui un développement supérieur à 6 km. La galerie principale possède un ensemble de gravures schématiques réparties tout au long de la progression, dont une rouelle solaire à plus de 100 m de profondeur sous la surface (fig. 3).

Dans un réseau annexe découvert il y a une dizaine d'années, existent des dessins représentant des anthropomorphes, dont un personnage portant une hotte et brandissant un pic, qui pourrait s'interpréter comme la représentation d'un mineur (fig. 4).

Là encore, le contexte archéologique proche est très riche, puisque des cavités voisines du causse de Sorèze dans lequel s'ouvre la grotte ont livré du Chalcolithique, des tessons de l'âge du Fer et du Moyen Age. Cette dernière époque se retrouve en abondance dans la grotte, sous forme de tessons et de poteries entières. Par ailleurs, les investigations des spéléologues ont mis en évidence les restes d'installations destinées à faciliter l'extraction d'argile qui abonde dans la grotte.

Des analyses récentes ont prouvé que cette argile avait la même composition minéralogique que celle des poteries médiévales trouvées dans la cavité et sur des sites de surface. On est donc incontestablement en présence d'une activité minière qui peut se situer dans une fourchette allant du XII^e au XV^e siècles. Reste à savoir si les peintures et les gravures peuvent être mises en relation avec cette exploitation ?

LES PARALLELES AVEC L'ART RUPESTRE ET L'ART DES MONUMENTS

Contrairement à l'art pariétal paléolithique dont les correspondants de plein air — si tant est qu'ils aient existé — ont tous été détruits, l'art des cavernes post-glaciaires peut être éclairé à la lueur de l'art rupestre (ou des rochers) et des graffiti de monuments anciens.

On s'aperçoit de la sorte que certains symboles présents dans les grottes appartiennent en fait à un répertoire beaucoup plus vaste. Outre la rouelle solaire, l'étoile à 5 branches, la grille, la marelle déjà évoqués, on rencontre également les diverses croix variant par la forme et la disposition de leurs branches, et l'arbalète.

Tous ces symboles sont entachés du même «vice rédhibitoire», à savoir que leur usage est attesté sur de grandes périodes de temps, dans des cultures très différentes. On est donc loin des «fossiles directeurs» dont rêve tout archéologue, et ceci ne peut qu'inciter à la plus extrême prudence en matière de datation et d'interprétation.

Si l'art des rochers ne peut guère aider à bâtir une chronologie, hors le cas très spécial d'éléments expressément datés, l'art des monuments, lui, présente l'avantage d'offrir une «borne basse» qui est celle de l'érection du monument. De la sorte, on s'aperçoit que la rouelle, la croix à branches égales, la cupule, généralement considérées comme protohistoriques, peuvent être beaucoup plus tardives.

A la limite de l'art pariétal et de l'art rupestre, nous ne saurions passer sous silence l'art

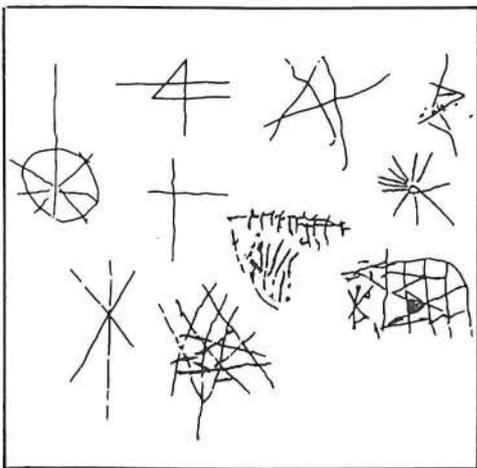


Fig. 3. Signes gravés de la galerie principale du traouc del Calel, Sorèze, Tarn.

des grès stampiens du massif de Fontainebleau. Bien circonscrit dans l'espace, cet art, de par l'abondance des manifestations, se prête bien à une approche basée sur des méthodes statistiques. Il fait toutefois l'objet d'études très détaillées; pour cette raison, nous l'avons exclu du cadre strict de notre recherche.

POUR UNE ETUDE DE L'ART PARIÉTAL POST-GLACIAIRE

Ces figurations, qui peuvent être des peintures ou des gravures, ont une caractéristique commune: elles sont gravement menacées par l'accroissement de la fréquentation «sauvage» des grottes et par les pollutions d'origine industrielle. Le site de Peyort, déjà évoqué, a été gravement endommagé en quelques années; celui du Calel a également subi d'importantes dégradations. Il est donc urgent de jeter les bases d'une étude intégrant, outre le relevé des graphismes, un certain nombre de données connexes.

Nous n'avons pas la place de reprendre ici l'exposé des méthodes que nous développons dans notre ouvrage «Survivance de l'art pariétal». Nous nous contenterons donc d'en indiquer les grandes lignes. Toute recherche doit être conduite en prenant compte l'intégralité du site. Outre le contexte graphique, qui concerne le relevé des peintures ou des gravures et leur analyse, il faut considérer le contexte physique, autrement dit les relations possibles entre les figurations pariétales et la topographie de la caverne, ainsi que le contexte archéologique immédiat et proche, l'idéal à atteindre étant un traitement statistique des données en vue de dégager des lignes directrices.

Dans l'immédiat, il faut être bien conscient que le faible nombre de sites recensés (environ 120 pour le territoire français) et la grande diversité des manifestations confèrent à cette approche statistique un intérêt très limité. Mais compte tenu des menaces énoncées plus haut, il importe sans plus attendre de procéder à une collecte des données la plus exhaustive possible, aucun élément ne devant être, a priori, négligé ou écarté.

En définitive, l'objet de la recherche se résume à trois questions:

— quand ces figurations ont-elles été exécutées ?

Fig. 5. Deux dessins remarquables du réseau Vidal-Jullia du Traouc del Calel, Sorèze, Tarn.

— par qui ?
— pour quoi ?

Mais il ne faut pas perdre de vue que la recherche n'est pas une fin en soi. Derrière la technicité que nous devons mettre en œuvre, nous ne devons pas oublier que c'est à une «quête» de l'homme que nous sommes conviés, un homme si semblable à nous qui a, par delà les siècles et les siècles, confié à la paroi de la caverne ses interrogations, ses peurs, mais aussi ses certitudes, sa foi.

Lucien GRATTE

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

BELLIN (P.) - 1973 - Réflexions sur l'art schématique. *Bull. Et. Préhist. Alpine*, V, 1973 (en collaboration avec C. Fanguin et A. Chabrier).

BELLIN (P.) - 1974 - Notes de lecture. De la dispersion de quelques signes dans le temps et dans l'espace et de l'unité du schématisme méditerranéen. *Bull. Et. Préhist. Alpine*, VI, 1974.

BELLIN (P.) - 1978 - Origines orientales du schématisme méditerranéen. *Bull. G.S. Ursus Spelaeus*, n° 3.

BLAQUIÈRE (C.) - 1974 - Le Calel au Moyen Age. *Travaux et Recherches*; *bull. Féd. Tarnaise Spél. Archéol.*, n° 15.

CALVET (J.-P.) - 1978 - Nouvelle découverte de signes et d'un blason sur paroi dans la grotte du Calel, commune de Sorèze, Tarn. *Travaux et Recherches*; *bull. Féd. Tarnaise de Spél. Archéol.*, n° 15.

COMBIER (J.) - 1972 - L'art rupestre schématique dans le Midi de la France et les Alpes occidentales. *Etudes Préhistoriques*, *bull. Soc. Préhist. Ardèche*, n° 3, décembre 1972, p. 35-46.

DELLUC (B. et G.) - 1975 - Graphismes rupestres non paléolithiques du Périgord, in *Cluzeaux et souterrains du Périgord*, de S. Avrilleau, tome I.

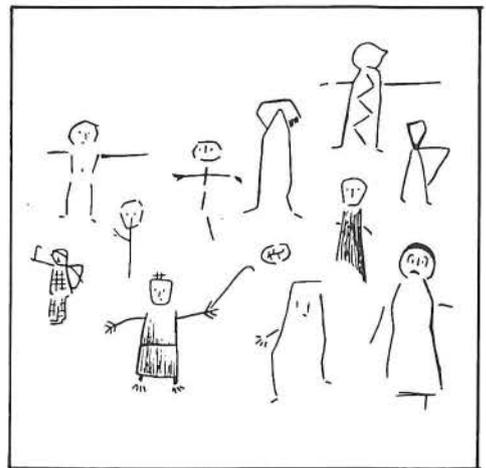


Fig. 4. Dessins du réseau «Vidal-Jullia» du traouc del Calel, Sorèze, Tarn.

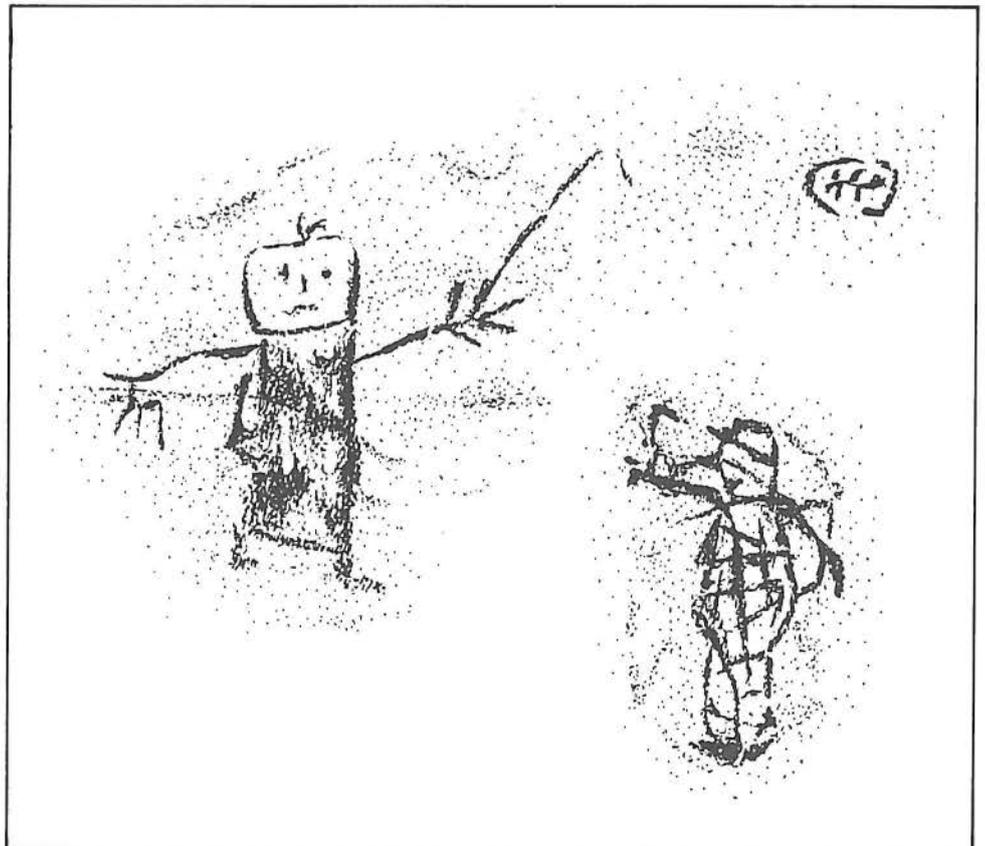
GLORY (A.) - 1947 - Gravures rupestres dans l'Ariège. *Gallia*, tome V, fasc. 1.

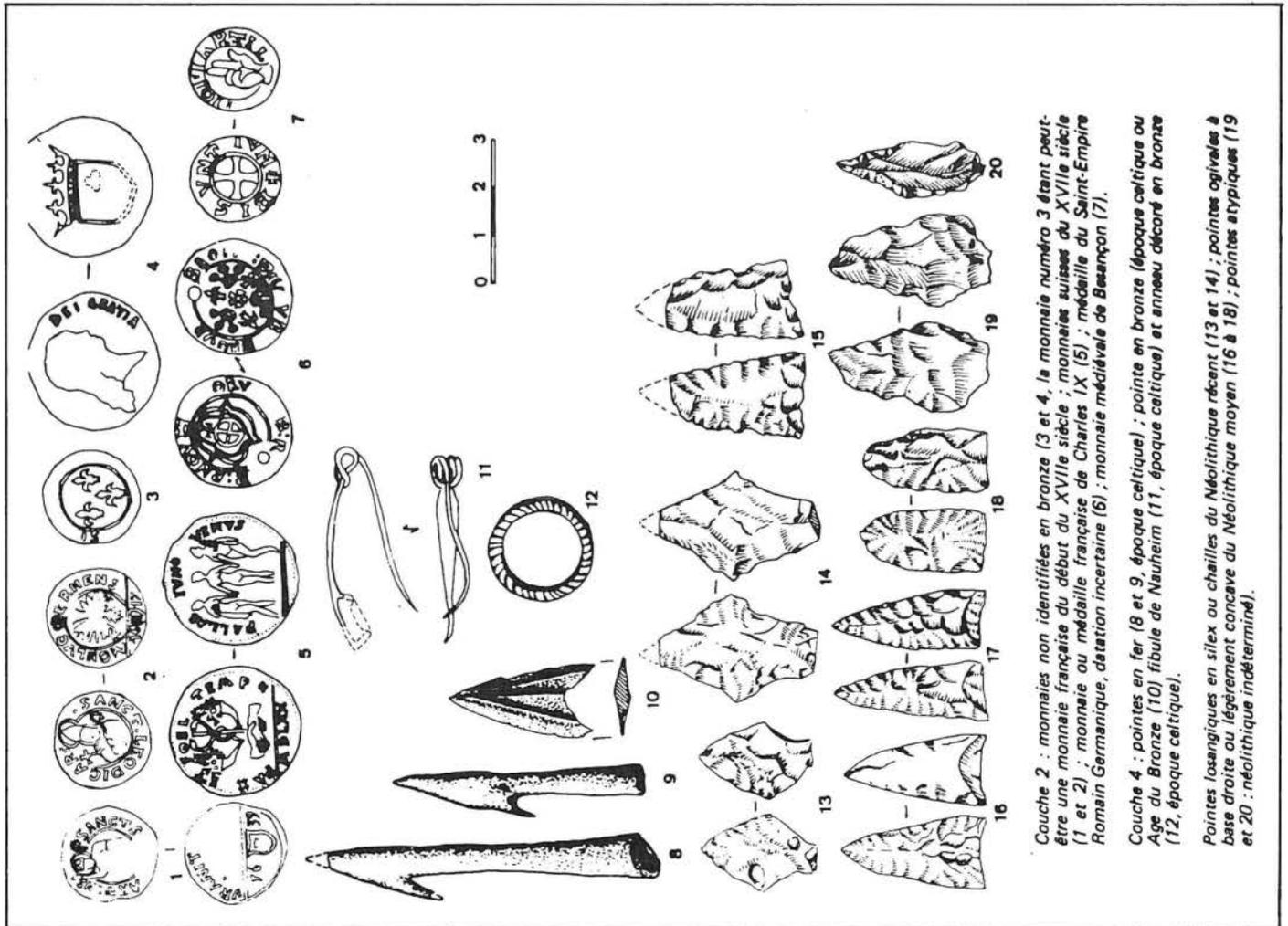
GLORY (A.), SANS MARTINEZ (J.), GEORGEOT (P.), NEUKIRCH (H.) - 1948 - Les peintures de l'âge du métal en France méridionale. *Préhistoire*, tome X. P.U.F.

GRATTÉ (L.) - 1985 - *Survivance de l'art pariétal*. Maury Imprimeur, Millau, 120 p.

QUINET (B.) - 1982, 83 - Quelques sites à gravures en France. *Art Rupestre*, *bull. du G.E.R.S.A.R.*, n° 19, septembre 1982 et n° 20, mars 1983.

TASSE (G.) - 1982 - Les pétroglyphes du Bassin Parisien. XVI^e supplément à *Gallia*. C.N.R.S. Paris.



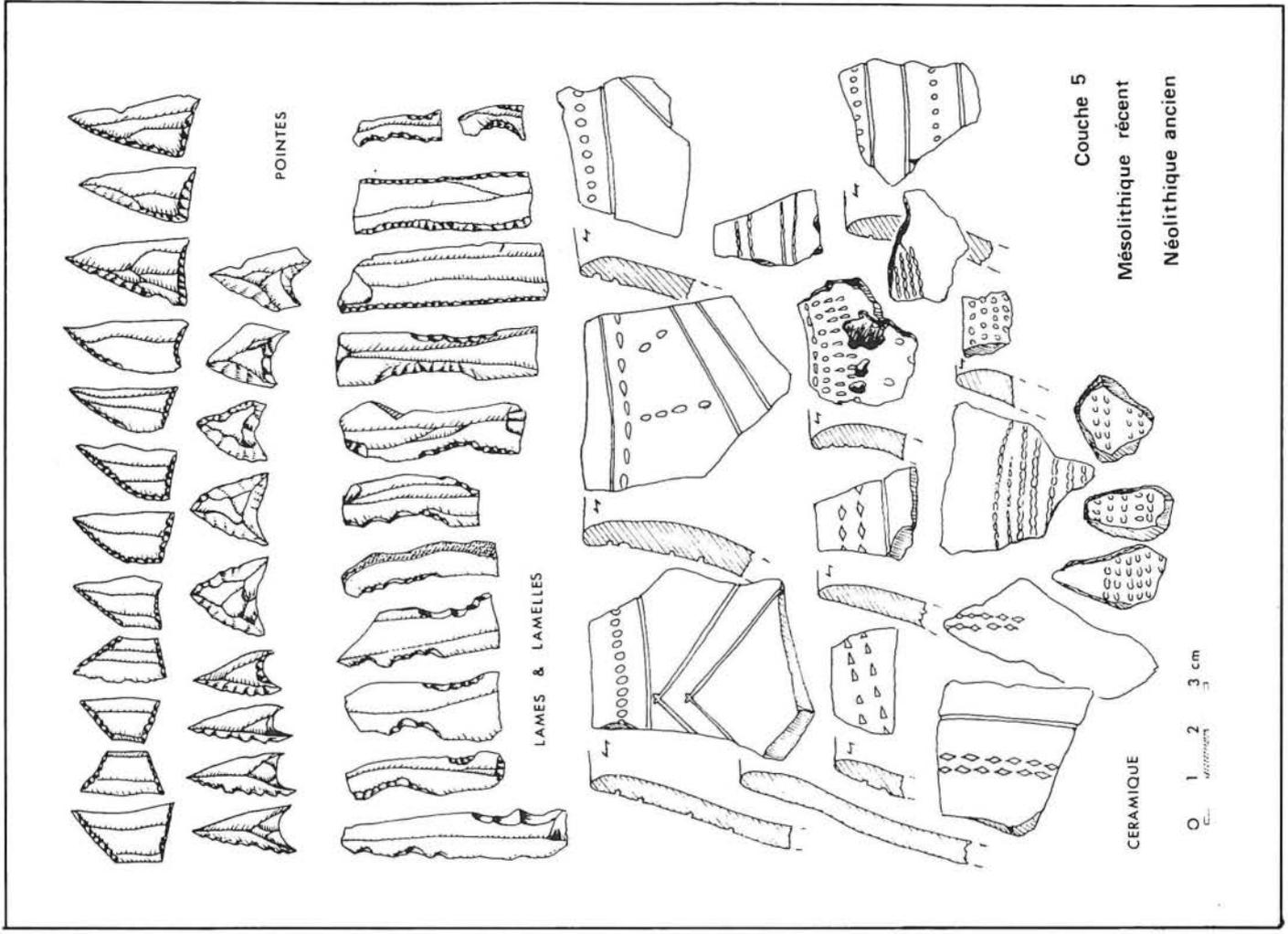


Couche 2 : monnaies non identifiées en bronze (3 et 4, la monnaie numéro 3 étant peut-être une monnaie française du début du XVII^e siècle ; monnaies suisses du XVII^e siècle (1 et 2) ; monnaie ou médaille française de Charles IX (5) ; médaille du Saint-Empire Romain Germanique, datation incertaine (6) ; monnaie médiévale de Besançon (7).

Couche 4 : pointes en fer (8 et 9, époque celtique) ; pointe en bronze (époque celtique ou Age du Bronze (10) fibule de Nauheim (11, époque celtique) et anneau décoré en bronze (12, époque celtique).

Pointes losangiques en silex ou chailles du Néolithique récent (13 et 14) ; pointes ogivales à base droite ou légèrement concave du Néolithique moyen (15 à 18) ; pointes atypiques (19 et 20 : néolithique indéterminé).

Fig. 4 : Matériel des couches 2 à 4



Couche 5
Mésolithique récent
Néolithique ancien

Fig. 5. Couche 5. Mésolithique récent. Néolithique ancien.

LES ABRIS SOUS ROCHE DE BAVANS (DOUBS): UNE CHRONOSTRATIGRAPHIE DE PLUS DE DOUZE MILLENAIRES

Gérard AIME
1, rue de l'Epitaphe. 25000 BESANCON

Entrepris en 1977, le sauvetage des abris sous roche de Bavans (Doubs) a permis la mise au jour d'une succession considérable de couches archéologiques allant du Paléolithique supérieur à aujourd'hui.

Situé à 13 km au sud de Montbéliard, à 285 m de la rive droite du Doubs, le site se compose de cinq abris voisins dont trois sont en cours de fouille. Ouverts dans une falaise haute de dix mètres, en calcaire du Callovien inférieur à stratification entrecroisée («dalles nacrées»), ils ont révélé des stratigraphies parfois incomplètes (fouilles anciennes) mais complémentaires.

LA STRATIGRAPHIE

L'abri sud-sud ouest (qui est en fait un rentrant de la paroi de quatre mètres de profondeur sur vingt sept mètres de long), vierge de toute fouille antérieure, a produit, sur un peu plus de trois mètres d'épaisseur, la stratigraphie suivante:

- couche 1, niveau superficiel de caillasse daté de l'époque contemporaine;
- couche 2, humus sombre: il s'agit d'un sol d'habitat de la fin du XVI^e et du début du XVII^e siècles, avec foyers et matériel archéologique; on y a même découvert une monnaie médiévale;
- couche 3, stérile, constituée de limons jaunes apparemment rapportés; à la base apparaissent des vestiges du Gallo-Romain (VI^e et II^e siècles) surmontant un sol soigneusement empierré (habitat-refuge);
- couche 4, composée d'argiles brunes avec, au sommet, un mobilier de la fin de la Tène III, puis quelques rares vestiges du Bronze final III, enfin témoins du Néolithique récent et du Néolithique moyen;
- couche 5, de limons ocre jaune, formée au cours du climat atlantique, et montrant une industrie très caractéristique du Mésolithique récent accompagné de céramique, notamment au sommet une céramique typique du Néolithique rubané récent d'Alsace;
- couche 6, formée d'une terre grise, fine et cendreuse, mais qui peut localement prendre un aspect gras et argileux; datée du Boréal, elle renferme une abondante industrie du Mésolithique moyen et de nombreuses structures;
- couche 7, composés de limons brun rouge contenant de nombreux petits galets et une industrie du Mésolithique moyen dans sa partie supérieure, du Mésolithique ancien dans sa partie inférieure;
- couche 8, montrant plusieurs alternances de limons jaunes très gras, de grosses pierres de délitage des voûtes et parois, enfin de sables et graviers parmi lesquels on remarque du granit, du grès. Au sommet, une industrie comparable à celle de la couche 7; ensuite, les remplissages deviennent stériles. Le subs-

trat rocheux a été atteint à 3,20 m dans le sondage exploratoire.

L'abri central était remanié sur une superficie importante par les fouilles anciennes, les seules couches non atteintes par celles-ci étant les niveaux 6 à 8. Toutefois, une extension récente des superficies fouillées nous a permis de découvrir un secteur non perturbé: il a livré une stratigraphie intégralement rigoureusement identique à celle que nous venons de décrire pour l'abri sud-sud ouest.

La grotte nord, elle aussi, a été l'objet de fouilles anciennes jusqu'à la couche 7 comprise, comme le matériel archéologique découvert dans les zones bouleversées nous a permis de le constater. En dessous, une couche ocre rouge d'argiles sablonneuses, baptisée couche 8, et qui a produit une industrie de l'Epipaléolithique ancien (climat d'Alleröd) ainsi que quelques structures de feux. Sous ce niveau, une couche 9, d'argile marron jaune encombrée de gros éléments de voûte, renfermant une industrie du Paléolithique supérieur.

L'énumération des séquences présentes montre des hiatus sédimentologiques et archéologiques. Le Dryas II, l'Alleröd seraient présents, mais on cherche le Dryas III et le Préboréal. Quant aux vestiges archéologiques, même abondants, ils ne sont pas toujours circonscrits aux limites des couches sédimentaires. Il s'agit donc d'un ensemble complexe où l'on constate des arrêts de sédimentation (ou des lessivages de ces sédiments) et où les civilisations matérielles font



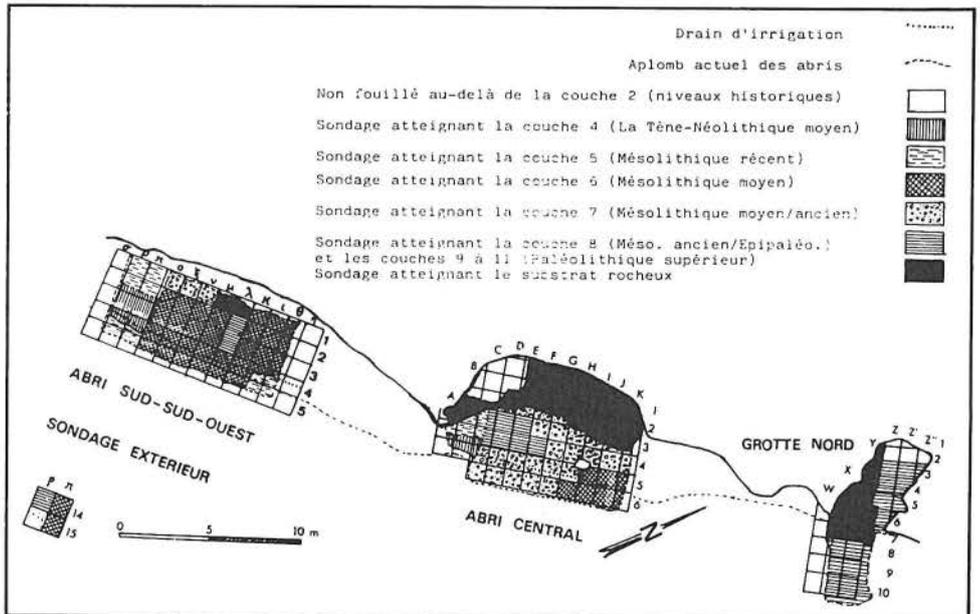
Fig. 1: Plan de situation de Bavans

parfois fi des dépôts géologiques pourtant nettement différenciés, comme si une culture avait, sans évolution typologique discernable, traversé un ou plusieurs épisodes climatiques échelonnés dans le temps.

LES DONNEES ARCHEOLOGIQUES

Pour les périodes historiques (couches 1 à 3), les câlages chronologiques ont été fournis

Fig. 2. Plan général des fouilles 1985.



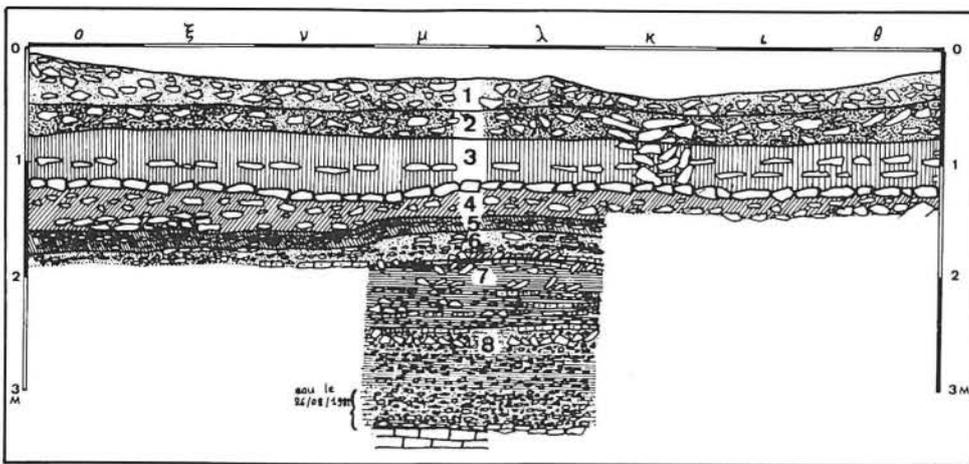


Fig. 3. Stratigraphie dans le sondage exploratoire de l'abri sud-sud-ouest. Couches 1 à 8.

par le mobilier archéologique recueilli: céramique vernissée, en général bicolore, typique de la Renaissance et du XVII^e siècle; outils en fer, et surtout monnaies et médailles comtoises, suisses, françaises, alsaciennes de la même période. Tout, en particulier des foyers, suggère des habitats-refuges de courte durée pendant les périodes troublées de la guerre de Trente Ans en particulier. Une monnaie dite «à la main bénissante» frappée par l'archevêché de Besançon pourrait être médiévale (couche 2).

Le Gallo-Romain se signale par des structures (mur de section 1 x 1 m devant la grotte nord et se prolongeant jusque sous l'abri central; pavement soigné de pierres plates sous les abris sud-sud ouest et central) et aussi par un mobilier caractéristique: petite monnaie du IV^e siècle; céramique du II^e siècle décorée (d'origine locale) et monnaies d'Antonin-le-Pieux, Faustine jeune et Marc-Aurèle (base de la couche 3, sommet de la couche 4).

La Tène est représentée par une fibule de Nauheim, une petite monnaie inidentifiable, des pointes à douille en fer, une lame de couteau en fer et de très nombreux tessons de poterie. A signaler aussi des fragments de bracelets en verre.

L'Age du Bronze n'existe qu'à l'état de traces: quelques tessons, une pointe de flèche en bronze, quelques fragments de bracelets.

Le Néolithique récent et le Néolithique moyen ne se distinguent guère que par l'outillage lithique. En effet, la céramique est peu abondante et trop fragmentée pour être exploitée.

On distingue, pour la période récente, quelques pointes de flèches et une armature de lance; pour la période moyenne, une série de pointes de flèches et quelques grattoirs.

Deux datations ont été faites par le 14C sur des échantillons d'os. Le premier, provenant du milieu de la couche a donné le résultat suivant:

—n°GIF-5164: 4580 ± 110 B.P., soit 2630 ± 110 B.C., ce qui traduit en dates calibrées donne un espace de temps réel compris entre 3645 et 3025 ans av. J.-C.

Le second, prélevé à la base de la couche et à son contact avec la couche 5 sous-jacente a abouti à la datation suivante:

—n°GIF-5165: 5320 ± 120 B.P., soit 3370 ± 120 B.C., donc en dates calibrées un intervalle de temps réel compris entre 4414 et 3875 ans av. J.-C.

Pour l'ensemble de ces périodes, les abris ne semblent pas avoir accueilli un habitat durable, malgré des traces de feux et des trous de poteaux qui témoignent de structures, mais plutôt des relais de chasse.

La couche 5 est plus complexe sur le plan du mobilier. Les vestiges sont plus denses, révélant une occupation plus fréquente

qu'aux périodes postérieures. Les foyers y sont nombreux, soigneusement aménagés et fréquemment réutilisés. Le matériel lithique paraît devoir être rattaché au Mésolithique récent dans sa quasi totalité: lames et lamelles à coches, petits grattoirs, armatures en trapèzes; cette industrie est associée à des fléchettes asymétriques et retouches semi envahissantes copiées (?) sur les pointes des Danubiens alsaciens; d'autres pointes triangulaires effilées, à retouche unilatérale denticulée et base concave très marquée paraissent plus originales: nous les appelons «pointes de Bavans», même si des types approchant existent sur d'autres sites.

Le point capital est que cette industrie lithique, largement représentée, s'accompagne de tessons de céramique de la base au sommet de la couche: au sommet, la céramique s'apparente sans conteste à celle du Rubané récent d'Alsace; en dessous, en revanche, on trouve une céramique différente, apparentée cette fois à celle du groupe de la Hogue. Alors que le premier type semble importé, le second paraît bien être de fabrication locale et être antérieur à la contagion danubienne. On assiste donc là à un phénomène de néolithisation au processus complexe.

Deux tentatives de datation au 14C ont été effectuées:

—n°GIF-6058: 4310 ± 90 B.P., soit 2360 ± 90 B.C., soit en date calibrée une fourchette en temps réel comprise entre 3355 et 2665 ans

av. J.-C., ce qui constitue un résultat aberrant, très anormalement rajeuni. L'explication d'un tel écart peut résider dans une mauvaise sélection des échantillons osseux.

Une nouvelle tentative a porté sur un échantillon d'os prélevé à la base de la couche (= à son contact avec la couche 6 sous-jacente): —n°Lv-1415: 7130 ± 70 B.P., soit 5180 ± 70 B.C., soit en date calibrée un intervalle de temps réel compris entre 6420 et 5525 ans av. J.-C.; cette dernière datation nous paraît plus conforme pour fixer la phase ancienne de ce niveau qui se situe dans l'Atlantique avec l'irruption progressive de la chénaie mixte.

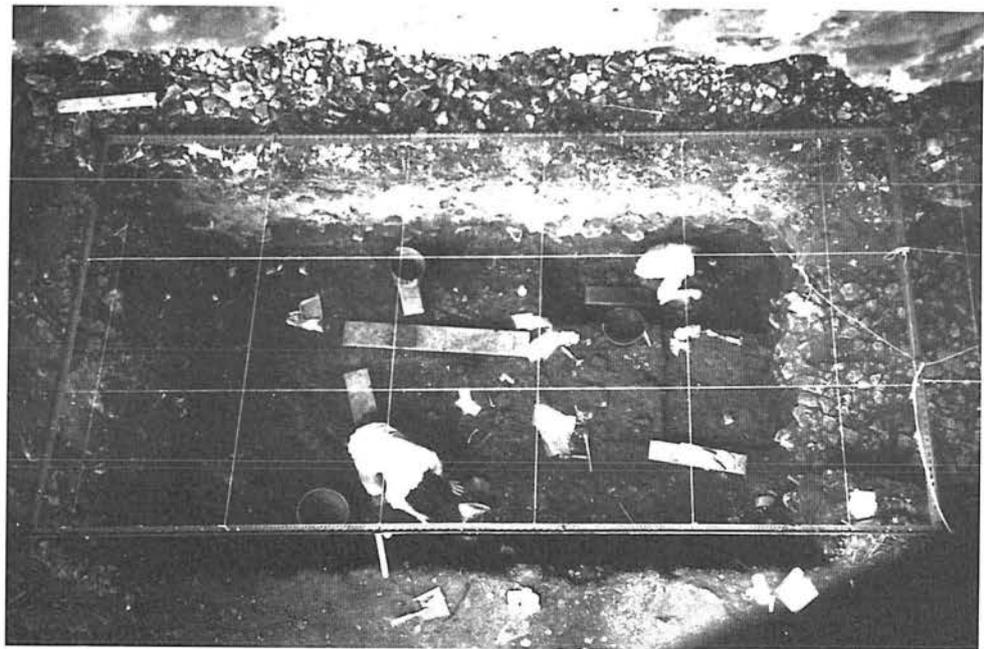
La couche 6, située sans conteste dans le Boréal (6750 à 5550 B.C.) est la plus «anthropisée» de tout le gisement, c'est à dire celle qui a été la plus marquée, modifiée, imprégnée par les activités humaines. Les foyers, structurés ou non, s'enchevêtrent les uns dans les autres. Les reliefs de repas (ossements) ou d'industrie de l'os et des bois de cervidés pulvulent. La faune voit une large domination du cerf, mais le sanglier est bien représenté; dans une moindre mesure, on trouve aussi l'ours, le loup, les mustélidés, de gros rongeurs, tous animaux à fourrure. En dépit de l'absence de tout outillage de pêche parvenu jusqu'à nous, le poisson est représenté (écailles, arêtes, vertèbres...). On peut donc supposer que pendant plusieurs siècles, ces abris ont été largement utilisés, tant que les données climatiques le permettaient, comme une sorte de camp de base à partir duquel les chasseurs et pêcheurs traquaient les proies des environs.

En dehors de cette débauche d'ossements d'animaux, on constate une grande quantité de produits de débitage du silex (nucléi, déchets de taille, éclats de toutes tailles, lames et lamelles) mais aussi d'outils divers: lames et lamelles à bord abattu, petits grattoirs et pointes. Celles-ci, parfois très effilées et perçantes, se signalent par des tailles souvent très microlithiques: en ce cas, nous pensons qu'il ne saurait être question de les interpréter comme pointes de flèches mais plutôt comme des composants d'outils composites tels que scies, râpes, etc.

Les tentatives de datation au 14C ont donné les résultats suivants:

—n°GIF-6059: 6400 ± 300 B.P., soit 4450 ± 300 B.C. ou, en date calibrée, un espace de temps compris entre 5800 et 4755 ans av. J.-C.; cette date est manifestement beaucoup trop jeune

Vue générale aérienne (photo F. Bonnefoi).





Le site (Photo G.Aimé)

encore, dans le Boréal, nous obtenons des marges d'incertitude trop grandes (à cause de la pauvreté en collagène de l'échantillon) et une date trop jeune si l'on considère que ce dernier a été prélevé dans la partie la plus ancienne de la couche.

La couche 8 de la grotte nord a livré les traces de quatre aires de combustion, toutes situées à l'aplomb du porche actuel, ou au-devant de celui-ci et un certain nombre de vestiges où dominent les pointes aziliennes, pointes longues et étroites, à bord abattu épais, assez arqué, et en général monopointes. On trouve aussi des grattoirs sur grandes lames, des grattoirs sur éclats, enfin des lames tronquées. Les lames simples ou retouchées sont également bien représentées. Les restes faunistiques, peu abondants, voient dominer le cerf. Nous interprétons l'ensemble de ces objets comme les restes de haltes de chasseurs, haltes de courte durée et pour des groupes restreints.

Une datation a été effectuée, toujours sur un échantillon d'os qui a donné pour résultat :

Fig. 6. Couche 6. Mésolithique moyen. Couche 7. Mésolithique ancien/moyen.

pour un gisement que son industrie place clairement dans le Boréal;

—n°Lv-1417: 8180 ± 80 B.P., soit 6230 ± 80 B.C. (abri central);

—n°Lv-1455: 8210 ± 80 B.P., soit 6260 ± 80 B.C. (abri S-SW)

Ces deux dernières dates, outre qu'elles constituent un remarquable tir groupé, situent bien cette couche dans le Mésolithique moyen et à la fin de la première moitié du Boréal. Il reste donc à élucider aujourd'hui la question de savoir pourquoi, alors que la contemporanéité des couches 6 des abris S-SW et Central est démontrée, les mobiliers diffèrent d'un abri à l'autre (utilisation spécifique en fonction d'une hiérarchie sociale ou d'une simple spécialisation des tâches?)

La couche 7, également très marquée par les phases d'occupation humaine, montre une stratigraphie interne moins homogène que la couche 6 : nous voulons signifier par là que l'on peut y reconnaître des stratigraphies intermédiaires nettement individualisées et chronologiquement distinctes : au sommet, occupations denses avec foyers et industries proches de la couche 6 sus-jacente; vestiges plus diffus en dessous, mais avec des trous de poteaux soulignant des structures et une industrie d'aspect plus archaïque. Dans ces niveaux, la faune, moins abondante que dans la couche 6, montre une très large domination du cerf. A l'extrême base de cette couche et au sommet de la couche 8, on voit apparaître des techniques de débitage qui paraissent être une réminiscence de l'Epipaléolithique final (Dryas III final, début du Préboréal?)

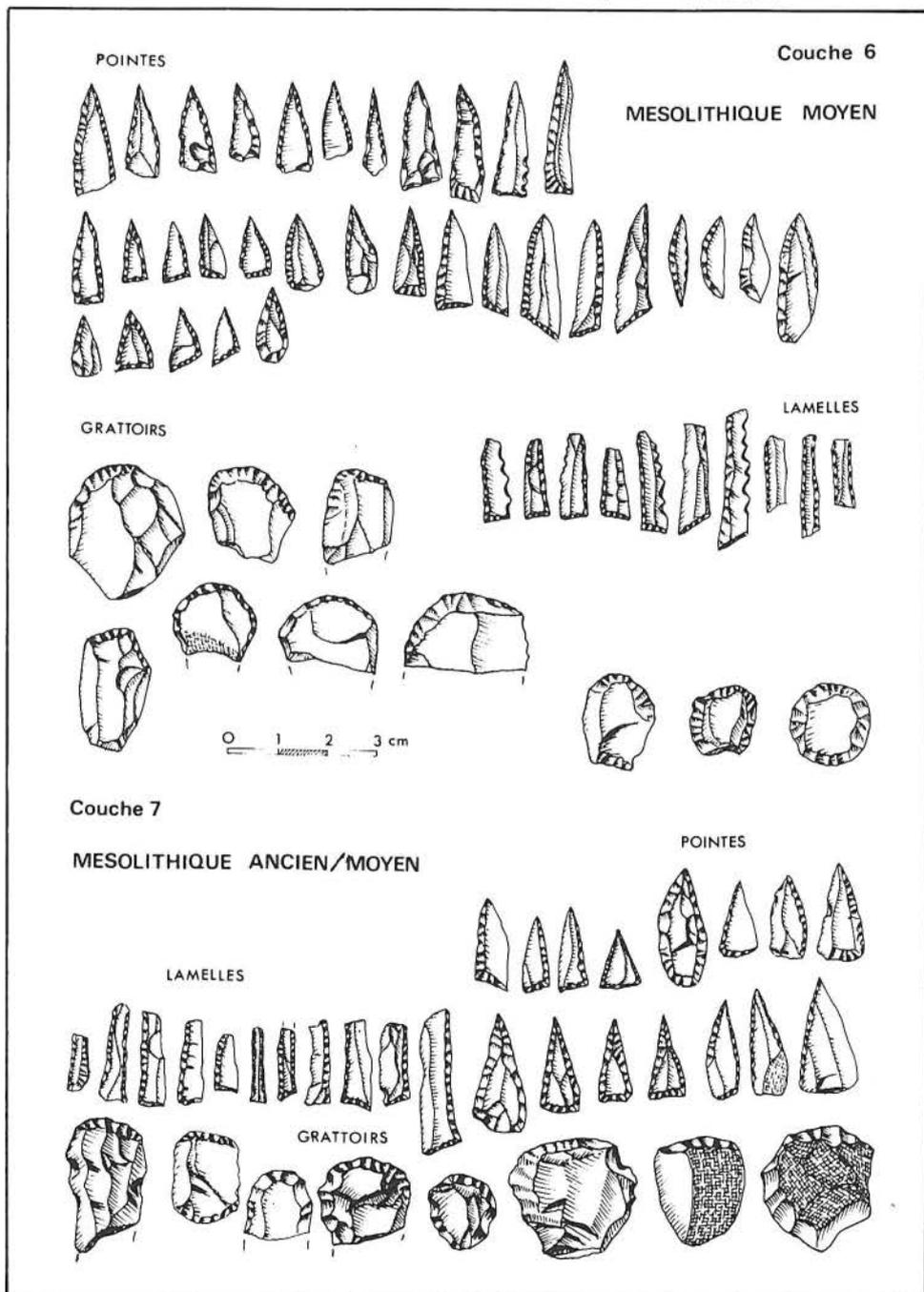
L'industrie se signale, avec une raréfaction rapide des témoins de l'industrie du silex, par des produits de débitage, quelques lamelles étroites à bord abattu, de petits grattoirs, et toute une gamme de pointes dont certaines sont en tout point identiques à celles de la couche 6, mais dont d'autres sont spécifiques, notamment celles qui dérivent des petits segments de cercles.

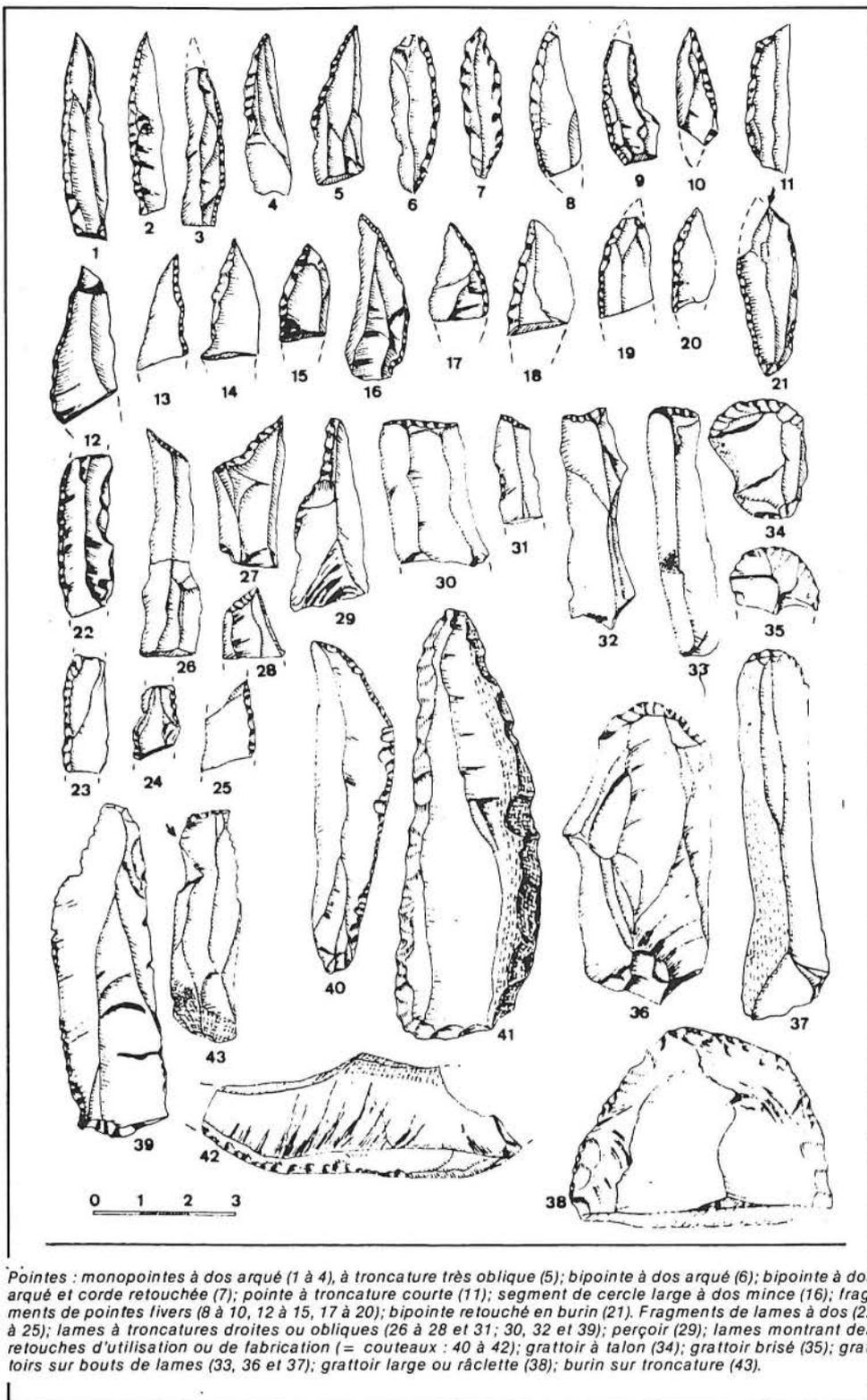
Les datations au 14C ont donné les résultats suivants :

—n°GIF-6060: 7570 ± 400 B.P., soit 5620 ± 400 B.C., ce qui constitue une date beaucoup trop jeune;

—n°Lv-1456: 8560 ± 100 B.P., soit 6610 B.C. (abri central), ce qui est conforme à ce que nous pensions: nous nous trouvons aux débuts du Boréal;

—n°Lv-1457: 8190 ± 390 B.P. (abri sud-sud ouest): si nous nous retrouvons bien, là





Pointes : monopointes à dos arqué (1 à 4), à troncature très oblique (5); bipointe à dos arqué (6); bipointe à dos arqué et corde retouchée (7); pointe à troncature courte (11); segment de cercle large à dos mince (16); fragments de pointes livers (8 à 10, 12 à 15, 17 à 20); bipointe retouché en burin (21). Fragments de lames à dos (22 à 25); lames à troncatures droites ou obliques (26 à 28 et 31; 30, 32 et 39); perceur (29); lames montrant des retouches d'utilisation ou de fabrication (= couteaux : 40 à 42); grattoir à talon (34); grattoir brisé (35); grattoirs sur bouts de lames (33, 36 et 37); grattoir large ou râclette (38); burin sur troncature (43).

Fig. 7 : Matériel lithique des couches 8 et 9

— n° GIF-6062 : 10200 ± 140 B.P., soit 8250 ± 140 B.C.

Cette date nous placerait dans le Dryas III et la fin de l'Épipaléolithique alors que l'industrie apparaît assez ancienne si on la compare à celle des sites voisins qui a été datée de 9200 à 9100 B.C. et qui se situe donc dans l'Alleröd. L'analyse des pollens, après un premier échec, pourrait permettre de penser que nous nous trouvons effectivement dans l'Alleröd.

La couche 9 de cette même grotte nord n'a révélé aucune structure discernable. Les charbons de bois comme les vestiges osseux et les silex sont peu abondants et très dispersés et ne semblent pas dépasser les blocs effondrés de la voûte à cette époque. Le matériel comprend des pointes aziliennes, plus larges et plus minces que celles de l'Épipaléolithique, des grandes lames et des couteaux, des lames tronquées, des grattoirs sur lames et un râcloir. Peu de produits de débitage (éclats) et une quasi absence de burins, pourraient apparaître comme une anomalie. La faune comprend du cheval et du renne.

Une datation a pu être réalisée sur un échantillon réduit d'os. Le résultat : — n° GIF-6061 : 12200 ± 170 B.P., soit 10250 ± 170 B.C.

Cette date est exactement conforme à ce que nous pensions au vu de l'outillage et place les occupations du site dans le Dryas II. Comme pour l'Épipaléolithique, il faut y voir de courtes haltes de chasseurs magdaléniens.

Comme on peut le constater, les abris sous roche de Bavans offrent un ensemble de repères chronostratigraphiques très étendu. Certes, il existe des lacunes tant en ce qui concerne les dépôts sédimentaires eux-mêmes (absence de Dryas III et de Préboréal, par exemple) que pour ce qui est des occupations humaines; de même, des imprécisions subsistent (datation au radiocarbone, pollens, sédimentologie). Mais en dépit de ces lacunes et de ces incertitudes, il s'agit néanmoins d'un site majeur et qui sert de référence.

Gérard AIME

LA GROTTTE, PRINCIPALE SOURCE DE DONNEES CHRONO-STRATIGRAPHIQUES EN PREHISTOIRE: L'EXEMPLE DU TARDIGLACIAIRE ET DU DEBUT DU POSTGLACIAIRE EN FRANCE

André THEVENIN

Faculté des lettres et sciences humaines
30, rue Mégevand, 25030 BESANÇON Cédex

Les structures d'habitat en grotte ou en abri ouvert sont en principe, et cela est reconnu par l'ensemble des chercheurs, plus difficile à mettre en évidence que celles de plein air. L'exiguïté de la surface occupée oblige en effet à occuper pratiquement les mêmes secteurs et très souvent l'occupant suivant détruit les traces de ses prédécesseurs. Dans quelques cas cependant, fort rares il est vrai, il est arrivé que des structures se soient conservées par piégeage dans des formations se déposant rapidement. Elles sont généralement observées partiellement, car profondeur et surface ne sont pas conciliables, et les stratigraphies en prenant des dimensions respectables, ne permettent pas toujours d'étendre les surfaces fouillées.

Cependant, si les abris ouverts et les grottes donnent peu de renseignements sur les structures d'habitat, ils apportent des informations de tout premier ordre sur la chronologie et la succession des paléoenvironnements. En effet, la Préhistoire, science de l'homme par excellence, est également science de la Chronologie. Si les faits préhistoriques sont correctement insérés dans le déroulement général du temps et bien datés les uns par rapport aux autres, les comparaisons de tous ordres, et des habitats en particulier, n'en sont que plus valables et l'évolution des industries reconstituée assez fidèlement.

On pourrait penser que la recherche est plus aisée pour les périodes récentes, et en particulier pour la fin du Tardiglaciaire et le début du Postglaciaire, grâce à des échelles de datation beaucoup plus rigoureuses, les unes fondées sur l'évolution des systèmes vivants étrangers à l'homme (faune, microfaune, flore, etc.), les autres fondées uniquement sur l'évolution des industries humaines. La valeur scientifique des uns comme des autres est liée directement à leurs supports, les stratigraphies, qui doivent présenter une certaine puissance et être si possible sans lacune. Dans le cas des échelles de datation fondées sur les sciences auxiliaires (paléontologie, palynologie, etc.), les repérages de niveaux, les comparaisons de tous ordres s'obtiendront par l'exploitation des synchronismes «géologiques»; dans le deuxième type d'échelle de datation, par celle des synchronismes «typologiques».

Si les stratigraphies restent jusqu'à présent la base essentielle de la chronologie préhistorique, en Préhistoire par opposition à la Géologie et surtout lorsque l'on veut affiner les résultats, il faut se rappeler que :

— une séquence stratigraphique n'est que le pâle reflet de la réalité : dilatation anormale des couches, contraction par érosion ou par tronçage par l'homme, dénaturent le plus souvent ces chronomètres que devraient être les stratigraphies. Le facteur temps y est difficilement saisissable, et en employant une formule à l'emporte-pièce, «le Temps déforme le Temps»;

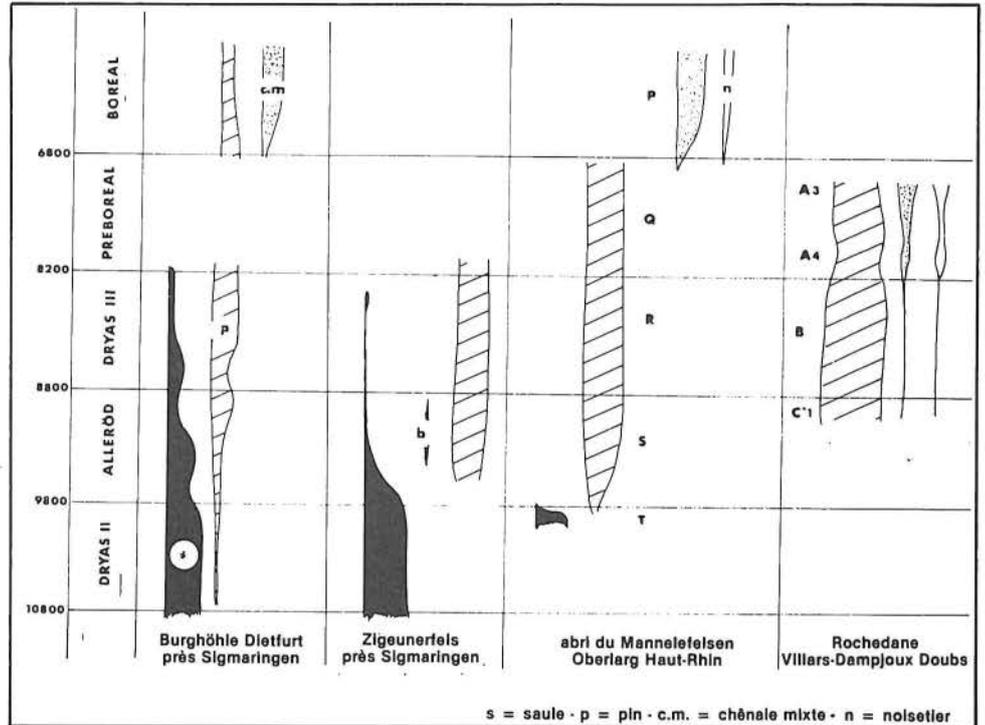


Fig. 1. L'apport des charbons de bois dans l'approche de la chronologie préhistorique pour la fin du Tardiglaciaire et le début du Postglaciaire.

— dans une séquence stratigraphique, la durée de non-occupation par l'homme est très supérieure dans la plupart des cas à celle de son occupation.

Malgré ces difficultés, les stratigraphies, «chronomètres à mouvement capricieux», n'en sont pas moins indispensables pour établir les chronologies.

Dans la présente étude, notre but est de montrer, pour la fin du Tardiglaciaire et le début du Postglaciaire, l'importance fondamentale des données des sciences pour l'établissement des chronologies régionales et la recherche des corrélations de niveaux ou d'industries à courte ou longue distance.

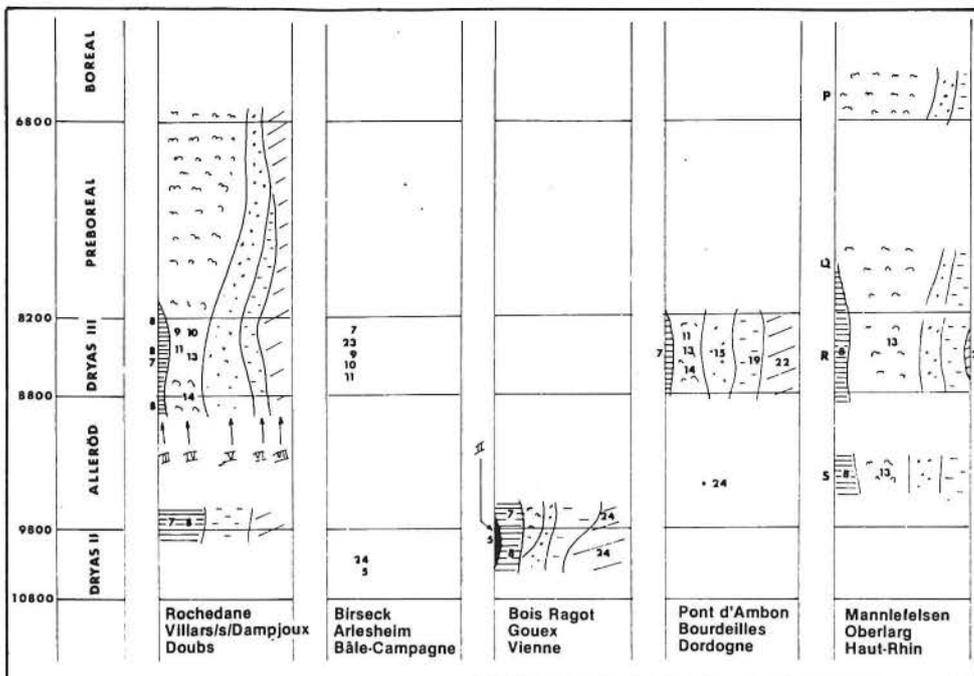
L'APPORT DES RESTES PALEOBOTANIQUES ET PRINCIPALEMENT DES CHARBONS DE BOIS

Pour la période qui nous intéresse, le meilleur fil conducteur pour retrouver chronologie et paléoenvironnement, reste et restera encore longtemps le règne végétal. Mais si les analyses palynologiques apportent à l'heure actuelle la majeure partie des informations, celles des charbons de bois, quand elles sont possibles, les complètent parfaitement. Nous n'insisterons pas sur les nombreuses analy-

ses palynologiques réalisées sur des gisements du Nord du Jura et de la Vallée supérieure du Danube; nous nous bornerons à bien mettre en évidence les apports fondamentaux de l'anthracologie pour ces mêmes régions.

Cinq exemples sont présentés (fig. 1) et commentés : tout d'abord trois stratigraphies de la haute vallée du Danube, la Burghöhle Dietfurt, commune de Sigmaringen, la Zigeunerfels, sur le territoire de la ville de Sigmaringen et la Jägerhaus-Höhle, commune de Fridingen, près de Beuron.

La Burghöhle Dietfurt présente une stratigraphie de trois mètres de puissance environ avec industries de la fin du Paléolithique supérieur à l'époque romaine (BRUNNACKER et al., 1980). A la Zigeunerfels, les industries ne concernent que la fin du Paléolithique supérieur et l'Épipaléolithique ou Spätpaläolithikum (TAUTE, 1972; KOENIGSWALD von, 1972). Quant à la Jägerhaus-Höhle (TAUTE, 1972), elle est célèbre par ses industries mésolithiques, à partir desquelles ont été définis les termes de Beuronien A, B, C. Pour le diagramme des charbons de bois de la Burghöhle Dietfurt et de la Zigeunerfels, les correspondances palynologiques proposées (BRUNNACKER et al., 1980) ont été obtenues en tenant compte de l'ensemble des données des sciences naturelles et des industries mais sans datation 14 C. Il existe une légère



NIN *et al.*, 1979; THEVENIN, 1981), on trouve une stratigraphie bien datée par l'analyse pollinique (travaux de J. HEIM) et par neuf datations 14 C. Les fouilles de cet abri, situé à 550 m, à une altitude légèrement moins élevée que les deux précédents gisements, ont fourni une quantité impressionnante de charbons de bois (SCHWEINGRUBER, 1976, 1979). Le saule est présent au sommet du niveau T remplacé au Dryas II, puis le pin est prépondérant de S à Q, c'est-à-dire de l'Alleröd au Préboréal. A partir du Préboréal, une coupure nette se remarque, due peut-être à un tronçonnage des couches par l'homme, car il est difficile d'admettre une aussi brutale modification du couvert végétal. Dans la suite, au cours du Boréal, nous retrouvons la chênaie mixte.

Le diagramme de l'abri de Rochedane, à Villars-sous-Dampjoux, Doubs, situé encore plus à l'ouest, à l'altitude de 350 m environ, en extrême bordure du massif jurassien, est aussi très significatif. Sans entrer dans le détail des attributions chronologiques (THEVENIN *et al.*, 1979; THEVENIN, 1981), on constate que le pin est dominant à l'extrême fin de l'Alleröd et au Dryas III; à partir du Préboréal, le pin est toujours représenté, mais vu l'altitude, la position en bordure de massif et l'exposition plein sud, les espèces de la chênaie mixte (chêne, frêne, orme, noisetier) sont mieux représentées que dans les gisements précédents.

En conclusion, (mais ceci ne doit pas être une règle générale, car les exemples sont encore trop peu nombreux) :

— le saule est présent et seul combustible au Dryas II dans les exemples présentés; il est utilisé jusqu'au Dryas III dans les régions élevées du Jura souabe;

Abri de Rochedane - stratigraphie (cliché auteur)

ESPECES FORESTIERES BOREALES

- 1 *Sicista betulina*
- 2 *Lemmus schisticolor*
- 3 *Clethrionomys rutilus*
- 4 *Clethrionomys rufocanus*

ESPECES DES STEPPES FROIDES ARCTIQUES

- 5 *Dicrostonyx torquatus*
- 6 *Lemmus lemmus*

ESPECES D'ESPACES DECOUVERTS MARECAGEUX BOREALES

- 7 *Microtus oeconomicus*
- 8 *Microtus malei*

ESPECES FORESTIERES TEMPEREES

- 9 *Sciurus vulgaris*
- 10 *Glis glis*
- 11 *Ellomys quercinus*
- 12 *Muscardinus avellanarius*
- 13 *Clethrionomys glareolus*
- 14 *Apodemus sylvaticus*

ESPECES D'ESPACES DECOUVERTS OU FORESTIERS

- 15 *Microtus agrestis*
- 16 *Pitymys subterraneus*

ESPECES DE BORDURE D'EAU

- 17 *Castor fiber*
- 18 *Arvicola sapidus*
- 19 *Arvicola terrestris*

ESPECES RUPICOLES HELIOPHILES

- 20 *Microtus nivalis*
- 21 *Marmota marmota*

ESPECES DES STEPPES CONTINENTALES

- 22 *Microtus arvalis*
- 23 *Cricetus cricetus*
- 24 *Citellus superciliosus*
- 25 *Sicista subtilis*
- 26 *Lagurus lagurus*
- 27 *Alactaga*
- 28 *Spalax*
- 29 *Allocrietus bursae*
- 30 *Microtus gregalis*

ESPECES MEDITERRANEENNES

- 31 *Apodemus mystacinus*
- 32 *Microtus Brecciensis*
- 33 *Pitymys duodecimcostatus*
- 34 *Pitymys savii*
- 35 *Dolomys bogdanovi*
- 36 *Hystrix cristata*

ESPECES A BIOLOGIE INDETERMINEE

- 37 *Pliomys lenki*
- 38 *Pliomys episcopalis*
- 39 *Pliomys challei*

ESPECES COMMENSALES DE L'HOMME

- 40 *Mus musculus*
- 41 *Epimys*

Fig. 2. L'apport des micromammifères dans l'approche de la chronologie préhistorique pour la fin du Tardiglaciaire et le début du Postglaciaire.

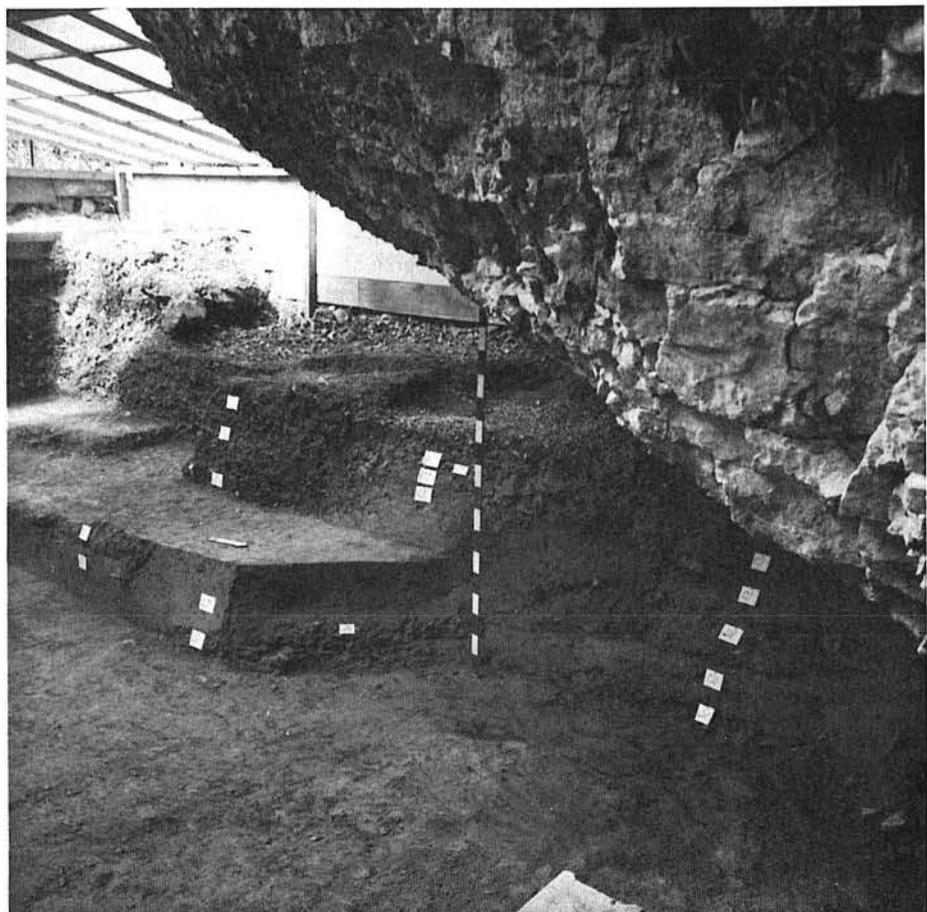
inférieures des deux diagrammes.

Pour la partie supérieure des diagrammes de la Burghöhle Dietfurt et de la Jägerhaus-Höhle, il existe une parfaite concordance, avec disparition progressive du pin et apparition de la chênaie mixte. A la Zigeunerfels, le chêne est largement prépondérant, alors qu'à la Jägerhaus-Höhle, il est concurrencé très nettement par le frêne, l'orme et le noisetier.

Si l'on se déplace légèrement plus à l'ouest, dans le nord du Jura français, à l'abri du Manniefelsen I, Oberlurg, Haut-Rhin (THEVE-

discordance dans les datations : pour les uns, le Préboréal est présent; pour les autres, il n'existerait pas et les couches correspondantes feraient encore partie du Dryas II. Pour le diagramme de la Jägerhaus-Höhle, treize datations 14 C permettent une approche fine de la chronologie du Mésolithique (OESCHGER et TAUTE, 1980) avec une analyse pollinique intéressant la période de 8000 à 5000 B.C. (FILZER, 1980).

Pour les deux premiers gisements, le saule est l'arbre dominant dans les restes de charbons de bois pendant tout le Dryas II et les débuts de l'Alleröd, puis il diminue d'importance jusqu'au Dryas III. Le pin n'est dominant qu'à partir de l'Alleröd et de façon plus nette à la Zigeunerfels, mais il existe à notre avis un certain parallélisme entre les parties



— dans le nord du Jura, le pin est le seul combustible utilisé, alors que le saule l'est encore dans le Jura souabe;
 — au Préboréal, avec le Mésolithique ancien du Jura, le pin est seul présent. A Rochedane, les espèces de la chênaie mixte font timidement leur apparition pendant la même période;
 — au Boréal, la chênaie mixte est implantée partout.

L'APPORT DES RESTES DE MICROMAMMIFÈRES

Pour une bonne approche des problèmes chronologiques et afin de réaliser des correspondances à longue distance, l'étude des associations de micromammifères paraît être indispensable, quand les restes osseux, et surtout les dents n'ont pas été détruits. En effet, si au départ, un long travail de tamisage et de triage est obligatoire, peu conciliable avec une fouille rapide, les résultats obtenus par l'étude des diagrammes de micromammifères sont toujours riches d'enseignement et de données sur les paléoenvironnements successifs. Malheureusement, pour la fin du Tardiglaciaire et le début du Postglaciaire, on ne dispose que de quelques diagrammes (CHALINE, 1977, 1979; MARQUET in THÉVENIN et al., 1979; MARQUET in CHOLLET et al., 1979).

Cinq exemples sont proposés dans cette étude (fig. 2) : l'abri de Rochedane, à Villars-sous-Dampjoux, Doubs (THÉVENIN et al., 1979; THÉVENIN, 1981); l'abri de Birseck, Arlesheim, canton de Bâle-Campagne (SARASIN, 1973); Bois Ragot à Goux, Vienne (CHOLLET et al., 1979); Pont d'Ambon à Bourdeilles, Dordogne (CELERIER, 1971) et enfin l'abri du Mannlefelsen I à Oberlarg, Haut-Rhin (THÉVENIN et al., 1979).

Les données chronologiques de l'abri de Rochedane sont tirées des dates 14 C et des autres données des sciences (THÉVENIN et al., 1979; THÉVENIN, 1981). Le fait marquant

est la présence au Dryas III, dernière période froide et steppique, du dernier représentant de la faune froide, *Microtus ratticeps* ou *oeconomus*, le campagnol nordique (n° 7 de la liste de J. Chaline) et de *Cricetus cricetus*, le hamster (n° 23).

A l'abri de Birseck, fouillé au début du siècle, deux niveaux sont superposés, l'un magdalénien avec renne, et avec *Spermophilus cf rufescens*, *Discretoryx torquatus*, etc.; le second azilien, avec galets peints et les micromammifères suivants : *Microtus ratticeps*, *Cricetus cricetus*, le loir, le lérot, l'écureuil, etc. Pour ce dernier niveau, on constate d'une part une identité dans les industries (silex, galets peints) mais également dans les associations de micromammifères. On peut, sans commettre une trop grande erreur, replacer le niveau azilien de Birseck au Dryas III.

Le diagramme de l'abri du Mannlefelsen I à Oberlarg est présenté également; malheureusement, dans ce gisement, les trouvailles de micromammifères sont peu nombreuses, malgré un tamisage intensif. Il est assez comparable à celui de Rochedane, si ce n'est la présence de *Citellus rodentulus* (n° 24) au Dryas III.

La position des niveaux 2 à 4 de Pont d'Ambon, à Bourdeilles a été sérieusement discutée et des propositions de datation ont été présentées (DELPECH, 1975; CELERIER, 1979; PAQUEREAU, 1979). Si l'on prend la première liste des espèces publiées (DELPECH, 1975), on constate à Pont d'Ambon une association de micromammifères pratiquement identiques à celles de Rochedane, à l'exception du hamster. Une étude récente portant sur un matériel plus important (MARQUET, inédit) n'apporte pas d'argument pour vieillir les niveaux 2 à 4, que l'on peut rapporter soit au Dryas III, soit à la fin de l'Alleröd et au Dryas III. L'absence de renne est à cet égard

très significative. Tous les auteurs allemands sont d'accord pour dater le départ du renne vers le nord au début de l'Alleröd. Compte tenu du caractère montagneux de certains secteurs au sud-ouest, des rennes ont pu gagner quelque temps des zones plus élevées et ne disparaître qu'au milieu de l'Alleröd.

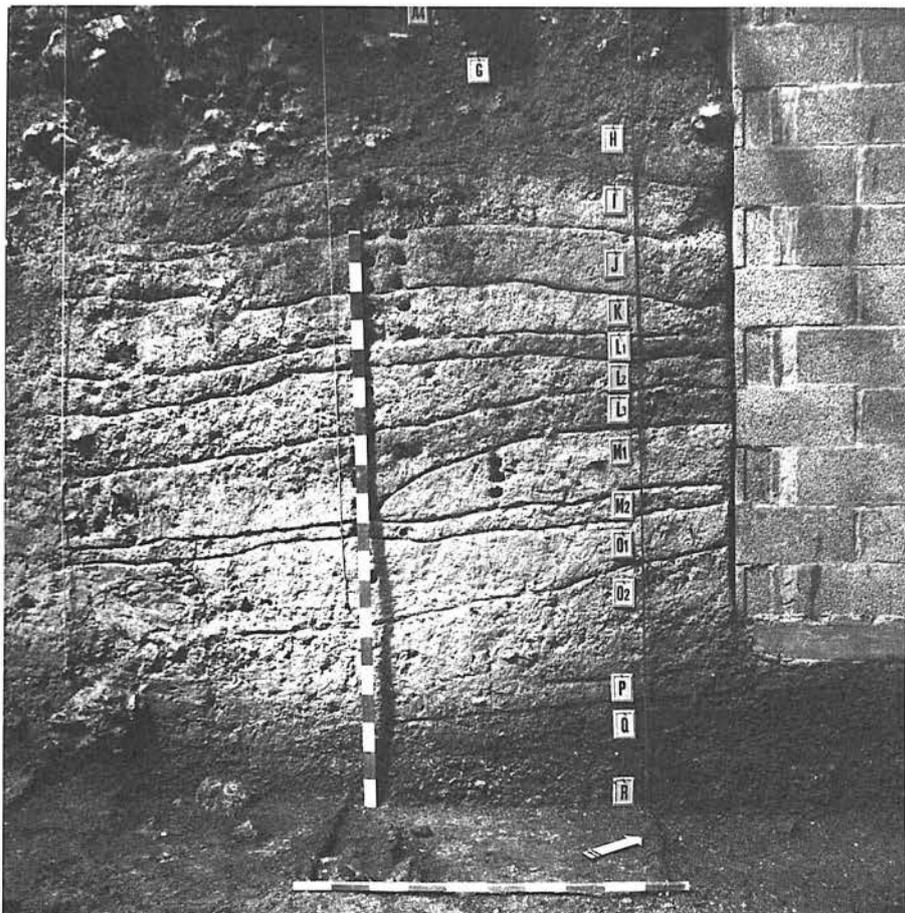
Nous rappellerons qu'il existe à proximité immédiate de Pont d'Ambon, l'abri de Rochereil, qui a fourni une faune avec renne, et une microfaune froide et même très froide; malheureusement les niveaux n'ont pas été bien séparés. En comparant faune, microfaune et industries de Rochereil et de Bois-Ragot à Goux, Vienne (CHOLLET et al., 1979; THÉVENIN, 1981), on peut replacer les niveaux de Rochereil dans le Dryas II et le début de l'Alleröd : de ce fait, les niveaux 2 à 4 de Pont d'Ambon sans renne ne peuvent être que postérieurs.

La comparaison des industries, des faunes et de la microfaune des trois gisements, Bois Ragot, Rochereil et Pont d'Ambon est fort instructive et nous pensons qu'au vu des diagrammes de Bois Ragot et de Pont d'Ambon, la réponse est sans appel. On aura ainsi les successions suivantes, en tenant compte d'une date conventionnelle du départ des rennes :

DRYAS III	2		
	3a		
Alleröd	4	III	3
			4
Dryas II		II supérieur	5
		II inférieur	6

Pont d'Ambon Rochereil Bois Ragot

Abri de Manniefelsen I (Ht-Rhin) : stratigraphie:
 G à Q = niveaux mésolithiques,
 R = niveau épipaléolithique (cliché auteur)



Microtus ratticeps ou *oeconomus* le campagnol nordique, nous paraît, pour la fin du Tardiglaciaire et le début du Postglaciaire, être un remarquable indicateur climatique avec des implications chronologiques. «Après être apparu au cours de la période rissienne, il disparaît ensuite pour revenir au début du Würm ancien. Il se maintient au début du Würm récent, ne se manifeste plus, puis réapparaît en abondance à la fin du Würm récent. Les extensions successives de *Microtus ratticeps* ont une signification climatique : c'est l'un des campagnols les plus fréquents et les plus caractéristiques du refroidissement würmien (CHALINE, 1972, p. 157).

Au Dryas moyen, soit entre 11500 et 12500 B.C., *Microtus ratticeps* pénètre certainement en profondeur en Espagne, puisqu'on le retrouve dans les niveaux du Magdalénien supérieur cantabrique (= Magdalénien V français) de la grotte de Tito Bustillo dans les Asturies.

On l'a signalé dans un certain nombre de gisements :

- à Rhodes II, Arignac (Ariège), avec le renne, au niveau du foyer I, daté de la fin du Bölling;
- à Duruthy, Sorde-l'Abbaye (Landes), à l'Alleröd;
- à la gare de Couz, Lalinde (Dordogne), dans la couche D;
- à la grotte du Rond du Barry, Polignac (Haute-Loire), jusqu'à l'Alleröd;
- à Saint-Thibaud-de-Couz (Savoie), seul présent pendant les périodes froides, il disparaît après l'Alleröd;
- à Pont d'Ambon, Bourdeilles (Dordogne), il est présent du niveau 4 jusqu'au niveau 2, où le renne est totalement absent; par comparaison avec d'autres sites, on peut placer ces niveaux dans une fourchette allant de la fin de l'Alleröd au début du Préboréal;
- à la grotte de Bois Ragot, Goux (Vienne), il

n'existe que dans le niveau BR₃ avec cerf, qui pourrait être daté de la deuxième partie de l'Alleröd ou de la fourchette extrême fin de l'Alleröd-début du Dryas III;
— à Rochedane, cette espèce disparaît seulement au Dryas III ou au début du Préboréal;
— à Gonvillars, Haute-Saône, il n'a été trouvé que dans le niveau XIII qualifié de Paléolithique supérieur mais malheureusement très pauvre, avec un riche cortège d'espèces forestières tempérées; ce niveau paraît proche de B de Rochedane, donc Dryas III;
— à l'abri de Neumühle, Roggenburg, canton de Berne, *M. ratticeps* est associé au hamster (*Critecus critecus*), avec une industrie datée de la fin de l'Alleröd.

L'occupation actuelle de ce micromammifère est réduite à l'Europe du Nord, Norvège, Finlande, Pologne, Allemagne de l'Est, mais s'étend à l'Est jusqu'aux côtes du Pacifique et vers l'Alaska. Des îlots de population relique subsistent en Hollande, Autriche, Tchécoslovaquie et Hongrie. Il semble que l'on peut suivre les phases de retrait de *M. Ratticeps*.

Après une pénétration aux Dryas ancien et moyen, il disparaît des Pyrénées en début d'Alleröd; il ne colonise plus la Dordogne fin Alleröd, ainsi que le sud du Massif Central et le massif alpin. Les influences tempérées se font sentir davantage en profondeur dans le Languedoc et en Provence. Il persiste au Dryas III et peut-être au Préboréal dans le nord de la Dordogne, dans les Charentes et l'est de la France. Après avoir disparu par la suite d'une grande partie du territoire français, il persiste en Allemagne jusqu'à l'Atlantique, pour ensuite se tenir à ses limites actuelles.

Les associations de *M. ratticeps* avec d'autres micromammifères peuvent être également très instructives; malheureusement, nous ne disposons que de peu de données. On constate cependant les faits suivants :

— *M. ratticeps* coexiste en petit nombre avec quelques lemmings à collier (*Dicrotonyx torquatus*), avec de très nombreux campagnols des champs (*M. arvalis*) et un pourcentage assez grands de campagnol des steppes asiatiques (*M. gregalis*); il s'agit alors d'une faune «interstadienne» (interstade de Lascaux) au sein d'une phase froide à caractère arctique (CHALINE, 1979, p. 99);

— il est présent avec le renne, mais sans les espèces froides arctiques (cas des gisements de la Dordogne) en début d'Alleröd;
— il persiste après le départ des rennes, par exemple à Pont d'Ambon, Rochereil (Dordogne), à la grotte de Bois Ragot, Gouex (Vienne), à Rochedane (Doubs), à Gonvillars (Haute-Saône), où il est associé à une faune forestière tempérée.

Ces différentes associations repérées chronologiquement et en des endroits différents, parfois fort éloignés les uns des autres, doivent se retrouver à peu de chose près, réparties à un moment précis par zones géographiques, bien définies. Cette zonation peut, à notre avis, être déjà esquissée mais avec beaucoup de prudence.

CONCLUSIONS

Ces quelques exemples montrent que grottes et abris, par leur stratigraphie, sont essentiels et indispensables pour une bonne approche de la Chronologie préhistorique et que cette chronologie peut être tirée, entre autres, de l'étude des pollens, des charbons de bois et des restes (mollaires) de micromammifères.

André THEVENIN

BIBLIOGRAPHIE

ALBRECHT et al., = ALBRECHT (G.), HAHN (J.), KOENIGSWALD von (W.), MÜLLER-BECK (H.), TAUTE (W.) et WILLE (W.) - 1976 - Die klimatische Veränderung des terrestrischen Lebensraumes und ihre Rückwirkung auf den Menschen. *Zbl. geol. Paläont.*, 2^e partie, cahier 5/6, p. 449-479, 11 fig.

BOSINSKI (G.) - 1983 - Eiszeitjäger im Neuwieder Becken. *Archäologie des Eiszeitalters am Mittelrhein. Archäologie an Mittelrhein und Mosel* 1, 112 p., 74 fig.

BRUNNACKER et al., = BRUNNACKER (K.), KOENIGSWALD von (W.), RAHLE (W.), SCHAEINGRUBER (F.H.), TAUTE (W.), WILLE (W.) - 1980 - Der Übergang vom Pleistocän zum Holozän in der Burghöhle von Dietfurt bei Sigmaringen. *Das Mesolithikum in Süddeutschland. Teil 2; Naturwissenschaftliche Untersuchungen. Archaeologica Venatoria*, p. 21-32, tabl.

CHOLLET et al., = CHOLLET (A.), BOUTIN (P.), DEBENATH (A.), DELPECH (F.), MARQUET (J.-C.) - 1979 - La grotte du Bois-Ragot à Gouex (Vienne). Industrie, géologie, paléontologie. *La fin des temps glaciaires en Europe* 1, p. 365-378, 8 fig., 4 tabl.

CELIERIER (G.) - 1976 - Les civilisations de l'Épipaléolithique en Périgord. *La Préhistoire française*, 1, 2, p. 1427-1432, 3 fig.

CHALINE (J.) - 1977 - Les Rongeurs et l'évolution des paysages et des climats au Pléistocène supérieur en France. *Approche écologique de l'homme fossile, supplément A.F.E.O.*, p. 75-81.

CHALINE (J.) - 1979 - Les modifications des paysages et des climats de la fin des temps glaciaires en France (domaine boréal) révélées par les migrations des rongeurs. *La fin des temps glaciaires en Europe*, 1, 1, p. 97-104, 6 fig.

CORDY (J.-M.) - 1974 - Etude préliminaire de deux faunes à rongeurs du Tardiglaciaire belge. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, t. 97, fasc. 1, p. 5-9, 1 fig.

DELPECH (M.) - 1975 - Les faunes du Paléolithique supérieur dans le Sud-Ouest de la France. *Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux I*, t. 1, texte, 374 p.; t. 2, 159 tableaux; t. =, 98 pl.

FILZER (P.) - 1980 - Pollenanalytische Untersuchungen in den mesolithischen Kulturschichten der Jägerhaus-Höhle an der oberen Donau. *Das Mesolithikum in Süddeutschland. Teil 2; Naturwissenschaftliche Untersuchungen. Archaeologica Venatoria*, p. 21-32, tabl.

KOENIGSWALD von (W.) - 1972 - Der Faunenwandel an der Pleistozän-Holozän granze in der steinzeitlichen vom Zigeunerfels bei Sigmaringen (Vorbericht). *Arch. Inform.* 1, p. 41-44, 1 fig.

KOENIGSWALD von (W.) et TAUTE (W.) - 1974 - Mensch und Fauna unter dem Einfluss des Klimawandels an der Grenze vom Pleistozän zum Holozän. *Nachrichten der deutschen geologischen Gesellschaft*, 9, p. 145-150.

OESCHGER (W.) et TAUTE (W.) - 1980 - Radiokarbon. Alterbestimmungen zum süddeutschen Mesolithikum und deren Vergleich mit der vegetationsgeschichtlichen Datierung (Jägerhaus-Höhle, Falkensteinhöhle, Felsdach in Zickofen, Fohlenhaus, Bettküche). *Das Mesolithikum in Süddeutschland. Teil 2; Naturwissenschaftliche Untersuchung. Archaeologica Venatoria*, p. 15-19, tabl.

PAQUEREAU (M.-M.) - 1979 - Quelques types de flores tardi-glaciaires dans le Sud-Ouest de la France. *La fin des temps glaciaires en Europe*, 1, 1, p. 151-158, 5 fig.

SARASIN (F.) - 1913 - Die steinzeitlichen Stationen des Birstales zwischen Basel und Delsberg. *Nouveaux mémoires de la Société helvétique des Sciences Naturelles*, vol. 54, Mémoire 2, p. 77-290, 19 fig., 32 pl.

SCHWEINGRUBER (F.H.) - 1976 - Prähistorisches Holz. Die Bedeutung von Holzfindungen aus Mitteleuropa für die Lösung archäologischer und vegetationskundlicher Probleme. *Academica Helvetica* 2, 106 p., tabl., 29 fig., h.t.

SCHWEINGRUBER (F.H.) - 1979 - Résultats des analyses des charbons de bois de l'abri du Mannlefelden I à Oberlurg (Haut-Rhin). *Livret-guide de l'excursion AFEQ «Quatenaire d'Alsace», Université Louis Pasteur, Institut de Géographie, Strasbourg*, 2 p., 1 fig.

SCHWEINGRUBER (F.H.) - 1980 - Vegetationsgeschichtlich archäologische Auswertung der Holzkohlenfunde mesolithischer Höhlensedimente Süddeutschlands. *Das Mesolithikum in Süddeutschland. Teil 2; Naturwissenschaftliche Untersuchungen. Archaeologica Venatoria*, p. 33-46, 4 tableaux.

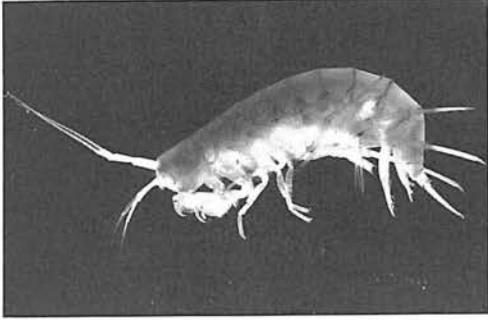
TAUTE (W.) - 1972 - Die Spätpaläolithisch-frühmesolithische Schichtenfolge in Zigeunerfeld bei Sigmaringen (Vorbericht). *Archäologische Information*, 1, p. 29-40, 5 fig.

TAUTE (W.) - 1972 - Funde aus der Steinzeit in der Jägerhaushöhle bei bronnen. In: *Fridingen-Stadt an der oberen Donau, Sigmaringen*, p. 21-26, 3 fig.

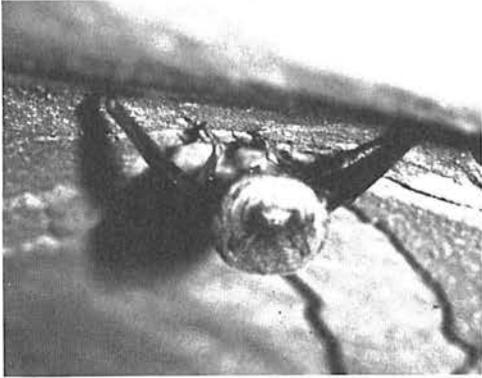
TAUTE (W.) - 1973 - Neue Forschungen zur Chronologie von Spätpaläolithikum und Mesolithikum in Süddeutschland. *Neue paläolithische und mesolithische Ausgrabungen in der Bundesrepublik Deutschland*, zum IX INQUA Congress, p. 59-66, 4 fig.

THÉVENIN et al., = THÉVENIN (A.), CAMPY (M.), GEISSERT (F.), HEIM (J.), HOFFERT (M.), MARQUET (J.-C.), MOURER-CHAUVIRÉ (C.), POULAIN-JOSIEN (Th.), SAINTY (J.), SCHAFF (O.), SCHWEINGRUBER (F.H.), CELASQUEZ (C.), VOGT (H.) - 1979 - Fondements chronostratigraphiques des niveaux à industrie épipaléolithique de l'abri de Rochedane à Villarsous-Dampjoux (Doubs) et de l'abri du Mannlefelden I à Oberlurg (Haut-Rhin). *La fin des temps glaciaires en Europe*, 1, p. 215-230, 9 fig.

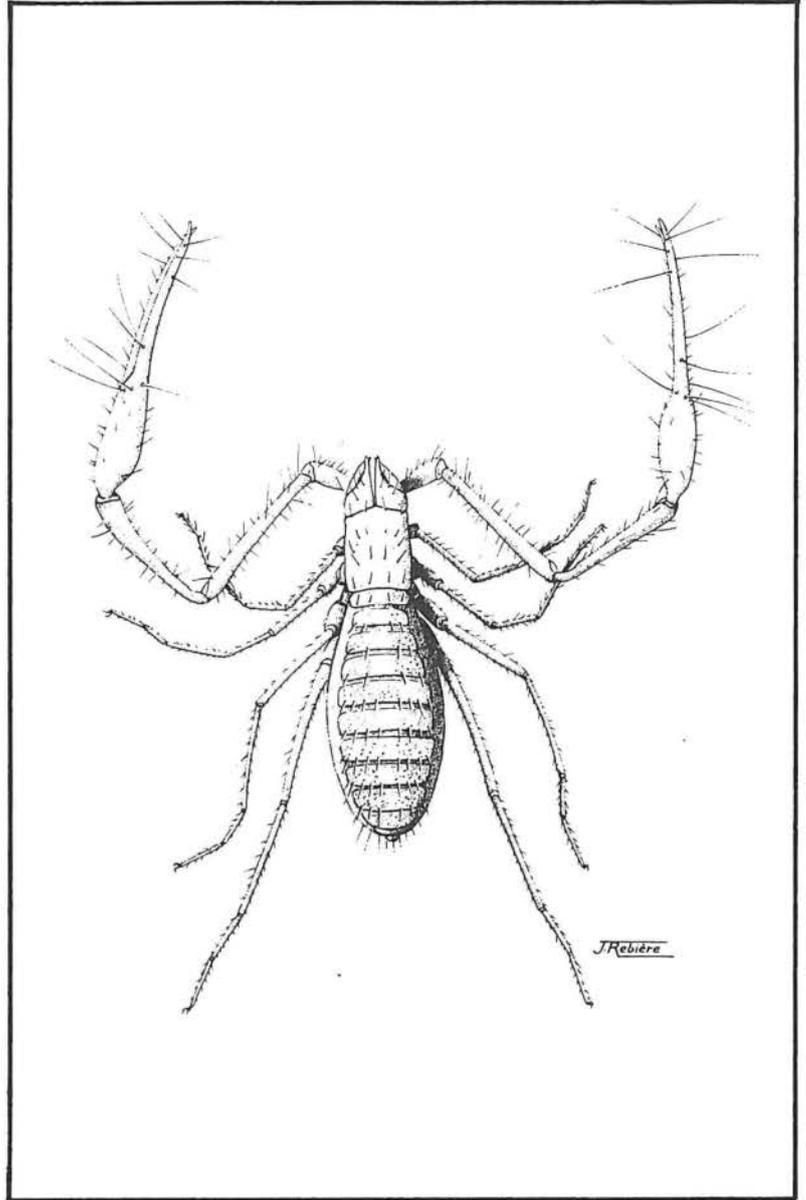
THÉVENIN (A.) - 1982 - Rochedane, l'Azilien, l'Épipaléolithique de l'Est de la France et les civilisations épipaléolithiques de l'Europe occidentale. *Mémoires de la Faculté des Sciences sociales. Ethnologie*, Strasbourg, n° 1, 2 t., 845 p., 339 fig.



1



2



3

2 BIOSPÉOLOGIE

LISTE des PARTICIPANTS au COLLOQUE BIOSPEOLOGIE Université NANCY I - 23, 24 et 25 mai 1985

Organisation : PREVOT Daniel
Coordinateur : CHAUVIN Jacques
Participants :

C. BARETH, Université de Nancy I, Biologie des insectes, Case officielle N° 140, 54037 Nancy
J.-P. BESSON, 11 rue Abadie, 65000 Tarbes
J. CHAUVIN, 15 rue J. d'Aulan, 51100 Reims
B. CONDÉ, Université de Nancy I
J.J. GEOFFROY, Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Zoologie, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris
J.P. HENRY, Université de Dijon, Biologie animale et générale, 6 bd Gabriel, 21100 Dijon
G. MAGNIEZ, Université de Dijon
G. VAUCEL, 43 rue Joseph Mangin, 54000 Nancy

Excusés : MM. BOUILLON M., DEHARVENG L., DROUIN P., GINET R., LAURENT R., LOPEZ, RAMBLA, VACHON.

Le colloque de biospéologie s'est déroulé dans les locaux de l'Université de Nancy 1. Il a regroupé une dizaine de personnes présentant des communications qui, pour la plupart, traitaient du thème choisi : bilan des recherches de biospéologie régionale.

Nous regrettons fortement que, pour des raisons diverses, la Société de Biospéologie n'ait pu s'associer à ce colloque. Il faut espérer que, dans les années à venir, le rapprochement entre notre Fédération et les scientifiques sera une réalité concrète. Il est grand temps de faire sauter les barrières séparant nos deux communautés. Nous avons le sentiment « profond » que les tabous doivent tomber, seule une collaboration franche entre tous permettra de faire progresser la spéléologie scientifique. La Commission Scientifique de la Fédération Française de Spéléologie œuvrera toujours dans ce sens.

On trouvera après ces quelques lignes le détail des sujets présentés. Il est à noter que, lors de ce colloque scientifique, des spéléologues (non-professionnels de la recherche), n'ont pas hésité à prononcer des communications. Ce fait est encourageant et doit être poursuivi.

Pendant le colloque et ensuite pendant le rassemblement de spéléologie, J.-J. GEOFFROY avait installé quelques panneaux présentant les Myriapodes en général et plus particulièrement certains de la région Centre.

A l'issue de cette journée, l'ensemble des participants s'est réuni autour d'un verre dans les locaux du Professeur BARETH. Ensuite, nous avons eu droit à une visite particulière du Muséum de Nancy. Sous la conduite du Professeur CONDE, nous avons pu admirer (et le terme est bien faible), la beauté et les étonnants caractères de certains poissons tropicaux.

Qu'il me soit permis ici de remercier les organisateurs du Congrès de la F.F.S., les participants au colloque et plus particulièrement, pour leur aide efficace et appréciée, les Professeurs BARETH et CONDE.

J. CHAUVIN

Illustrations page précédente.

1. *Niphargus virei* O (Crustacé Amphipode) - (Chiché M.J. Turquin)

2. *Myotis myotis* (Chéiroptère) - (Cliché D. Ricol)

3. *Neobisium colfai* (Arachnide: Pseudoscorpion) - collect. cartes postales : la faune souterraine des Pyrénées - éd. Soc. Biospéol., 09200 St.-Girons.

CAMPODEA (C) LECLERCI N.S.P. DE LA GROTTTE DE PUECHREDON (GARD) (DIPOLOURES CAMPODEIDES)

C. BARETH
 Université de Nancy I, biologie des insectes
 BP 239 54506 VANDOEUVRE-LES-NANCY Cédex

La grotte de Puechredon est située sur la bordure orientale des Cévennes, à une vingtaine de kilomètres au sud d'Alès. Nous tenons à remercier P. LECLERC qui, à notre demande, est retourné dans cette grotte en juin et août 1984 afin d'y récolter de nouveaux exemplaires de l'espèce qu'il y avait découverte en avril 1982 et que nous lui dédions.

CAMPODEA (C.) LECLERCI n. sp.

Grotte de Puechredon (commune de Puechredon), 19.IV.82: 1 ♂; 10.VI.84: 1 ♂, 1 ♀; 4.VIII.84: 1 ♂, 2 ♀. Au total 3 ♂, 3 ♀. Holotype: ♂ n° 2 de 3,2 mm; paratypes: 2 ♂, 3 ♀.

1. HOLOTYPE. ♂ de 3,2 mm

Tête. Seule l'antenne droite est intacte et compte 30 articles. La gauche est un régénérat de 25 articles. L'organe cupuliforme contient 6 ou 7 sensilles, qui ne présentent qu'une seule collerette. Le sensille bacilliforme de l'article III est inséré entre les phanères d et e. Les macrochètes de cet article sont glabres, ceux des suivants également. En région moyenne, les articles sont un peu plus d'une fois et demie aussi longs que larges.

Les 3 macrochètes du front sont fins, portant chacun 3 barbules: les 2 postérieurs sont subégaux, l'antérieur est une fois 1/4 aussi long qu'eux. 3 macrochètes bordent la ligne d'insertion des antennes, l'antérieur et le postérieur sont subégaux et portent chacun 2 ou 3 barbules; le moyen est un peu plus long (1/4 en plus) et porte 3 barbules. Les palpes abiaux sont de petite taille, pourvus chacun d'une cinquantaine de phanères sensoriels chez les autres spécimens, leur nombre ne dépasse pas 80). Les poils de garde sont postérieurs par rapport au sensille.

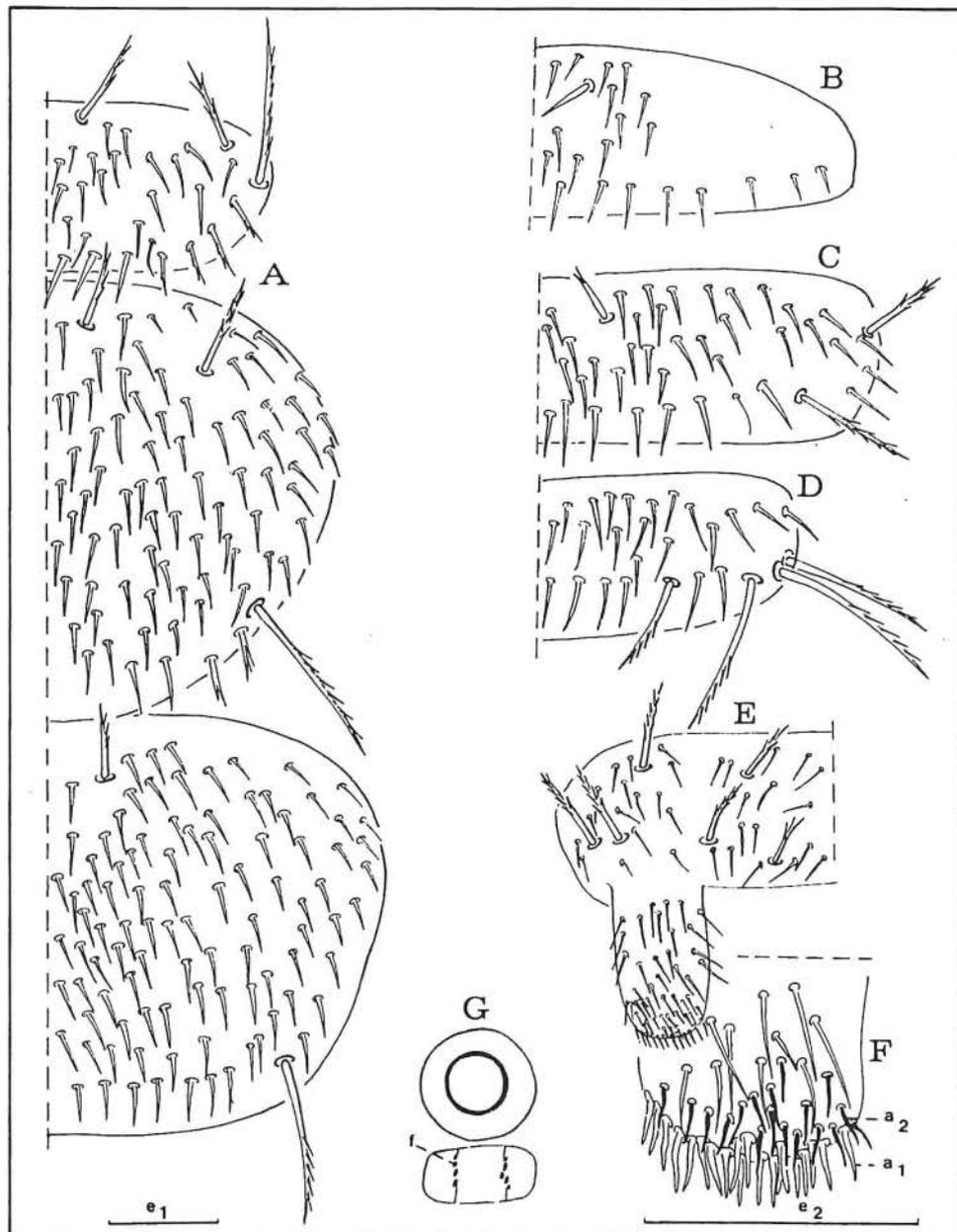
Thorax. Répartition des macrochètes

	ma	la	lp	ma	lp	lp
	la	ma	Σ p/N			
h I	1+1	1+1	1=1	1,01	1,85	3,22
h II	1+1	1+1	1+1	0,76	1,96	3,09
h III	1+1		1+1		1,88	3,03

Ces macrochètes sont assez fins, de longueur moyenne et barbelés sur leur 1/2 ou leurs 2/3 distaux. Les soies de revêtement sont fines et glabres. La cuticule ne présente que de très fines granulations.

Au pronotum, les soies marginales postérieures présentent quelques barbules, sauf les plus sagittales qui sont glabres; au mésot et métanotum, seules les plus latérales en portent.

Les pattes sont de longueur moyenne, les



Campodea C. leclerci n. sp. (♂ holotype): A. Pro-, méso-métanotum. B. premier tergite abdominal. C. cinquième tergite abdominal. D. huitième tergite abdominal. E. premier sternite abdominal. F. extrémité de l'appendice droit du premier sternite abdominal. G. faisceau de spermatozoïdes vu de dessus et en coupe optique.

a₁ = poils glandulaires *a₁*; *a₂* = poils glandulaires *a₂*; *f* = filament du faisceau de spermatozoïdes.

e₁ = 100 μm = A B C D E

e₂ = 100 μm = F G.

postérieures atteignent le milieu du 8^e segment; on note l'absence de sensille trochantérien. Le tibia métathoracique gauche porte 2 macrochètes, le droit un seul; soies des tarses toutes glabres, les plus sternales ayant parfois 1 ou 2 barbules basilaires; griffes courbes à soies prétarsales glabres.

Abdomen. Répartition des macrochètes

	ma	mp	la	lp
Ab I à IV	1+1	-	-	-
Ab V à VII	1+1	-	1+1	1+1
Ab VIII	-	1+1	-	3+3
Ab IX				6+6 (total)

Longueurs relatives : Σ = écartement des embases des **ma**, dsm = distance de l'embase des **ma** aux embases des soies marginales postérieures.

	Σ ma	dsm ma
Ab I	1,72	1,80
Ab II	2,35	2,41
Ab III	2,51	2,12
Ab IV	2,51	1,77
Ab V	2,1	1,4
Ab VI	1,87	1,14
Ab VII	1,53	0,86

Les **ma** sont courts et grêles, le plus souvent bifurqués, parfois simples. Ils sont toujours beaucoup plus courts que leur écartement (1 fois et demie à 2 fois et demie). Ils n'atteignent les embases des soies marginales qu'au tergite VII. En VIII, leurs embases sont au même niveau que celles des **lp**.

Sternite I avec 6+6 macrochètes. On note l'absence de poils grêles et de phanères glandulaires sur la marge postérieure, bien qu'il s'agisse d'un adulte, ainsi qu'en témoigne la présence de faisceaux de spermatozoïdes encore assez nombreux. Les autres σ sont eux aussi dépourvus de ces phanères. Les appendices sont subcylindriques, très légèrement évasés à leur apex qui porte 18 a_1 et 15 a_2 .

Les sternites suivants portent 4+4 macrochètes; le VIII 1+1. La papille génitale porte 13 soies à la rosette (16 chez les plus âgés). Soie apicale des styles avec 2 ou 3 barbules apicales; subapicale glabre; moyenne sternale bifurquée.

Les faisceaux de spermatozoïdes ont un diamètre externe de 43 à 47 μ m, et une épaisseur de 20-22 μ m. Le filament décrit 4 tours de spires environ, d'un diamètre moyen de 20 μ m, sa longueur totale est de 240 μ m environ, il est

rubané (1,3 μ m x 0,7 μ m) et dépourvu de lumière. Cerques brisés.

2. PARATYPES

L'étude des 5 autres spécimens, 2 σ , 3 φ , permet d'apporter les précisions suivantes :

Longueur : σ : 3,2-4 mm. φ : 3,15-4,5 mm.

Antennes. 2 autres antennes appartenant à une φ sont intactes et comptent 31 articles chacune.

Thorax. Nous donnons les limites de la variation

ma la	lp ma	lp $\Sigma p/N$
0,85 - 1,01	1,58 - 2,09	3,04 - 4,04
0,76 - 0,91	1,72 - 2,14	3 - 4,09
	1,73 - 2,05	3,03 - 3,7

Abdomen. Moyenne des rapports

	Σ et dsm	
	ma	ma
AB I	1,86	1,83
Ab II	2,39	2,37
Ab III	2,85	2,47
Ab IV	2,37	1,83
Ab V	2,37	1,75
Ab VI	2,02	1,27
Ab VII	1,84	0,88

La φ est elle aussi dépourvue de phanères grêles et glandulaires; l'extrémité de ses appendices, subcylindriques, porte jusqu'à une vingtaine de phanères a_1 . Chez les σ , on note 18 à 23 a_1 , et 15 à 20 a_2 .

Cerques. Le seul cerque entier mesure 4,3 mm, il appartient à un σ de 3,5 mm, il comprend une base, subdivisée en 3 articles secondaires, et 11 articles primaires portant des macrochètes longs et finement barbelés, sauf sur les 2 derniers où ils ont glabres.

Affinités. Dans la grotte de Puechredon, *C. leclerci* cohabite avec *C. procera* Condé 1948. Bien que la répartition des macrochètes soit identique chez les deux espèces, il se distingue aisément de *C. procera* par plusieurs

caractères : taille plus réduite, antennes plus courtes, macrochètes plus fins, absence de poils grêles et de phanères glandulaires chez les σ , faisceaux de spermatozoïdes plus petits et filament différent et beaucoup plus court.

C. leclerci se rapproche davantage de *Campodea C. cf. zuluetai* décrit par CONDÉ (1951) de la Cova d'Anes, en Cerdagne. Nos spécimens sont de longueur comparable (3,15-4,5 mm contre 3,5-5 mm pour *C. cf. zuluetai*) et leurs nombres d'articles antennaires sont voisins (30-31, 30-35 chez *cf. zuluetai*). Dans les 2 cas, les **ma** abdominaux n'atteignent les embases des soies marginales qu'au tergite VII. Nos spécimens se distinguent par l'absence de poils grêles et de phanères glandulaires au sternite I du σ , ainsi que par la forme subcylindrique des appendices, ceux-ci étant en forme de galoche chez *C. cf. zuluetai*; l'un des exemplaires de cette dernière espèce présente des faisceaux de spermatozoïdes, dont le diamètre externe atteint 47 à 50 μ m et leur épaisseur 8 à 10 μ m.

Tous ces faisceaux semblent dépourvus de filament spiralé, ce qui les distingue évidemment de ceux de *C. leclerci* qui eux en possèdent un. Il est toutefois difficile d'affirmer que le filament est totalement absent car nous avons déjà observé des cas où il est très réduit (*C.P. suenisoni*, *L.C. solomonis*, BARETH, 1968) et seules des coupes histologiques permettraient de s'assurer de son absence. Les **mp** du VIII^e tergite sont 1 fois et demie à 2 fois plus courts que la 1^{re} paire de **lp**, alors qu'ils sont de longueur sensiblement égale chez *cf. zuluetai* (plus courts d'un quart ou d'un cinquième). C'est, jusqu'ici, le seul caractère qui permet de différencier les femelles appartenant à ces deux espèces. Nous avons désigné comme lectotype de *C. cf. zuluetai* le σ n° 1 de 3,3 mm de long porteur de faisceaux de spermatozoïdes.

C. BARETH

BIBLIOGRAPHIE

BARETH (C.) - 1968 - Biologie sexuelle et formations endocrines de *Campodea remyi* Denis (Diploures Campodéidés). *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 5, p. 303-426.
 CONDÉ (B.) - 1948 - Addition à la faune des Campodéidés cavernicoles de France. *Bull. Soc. SC. Nancy, N.S.*, 7, p. 45-54.
 CONDÉ (B.) - 1951 - Campodéidés cavernicoles de Catalogne. *Speleon*, 2, p. 51-62.

ETUDE DES BIOCENOSES DE QUELQUES PUIITS ARTIFICIELS DU DEPARTEMENT DE LA MARNE COMPARAISON AVEC LES PEUPELEMENTS DU MASSIF KARSTIQUE DE LA MONTAGNE DE REIMS

Jacques CHAUVIN
15, rue Jean d'Aulan 51100 REIMS

Depuis de nombreuses années, les puits d'alimentation en eau potable ont été abandonnés au profit des stations d'épuration. Ces puits constituent des regards sur la nappe phréatique et fonctionnent comme des pièges pour la faune endogée. Les études que nous avons entreprises montrent que les peuplements peuvent être importants et les comparaisons avec les peuplements karstiques environnants indiquent qu'il n'existe que peu de similitudes entre les deux milieux.

I. GEOGRAPHIE - GEOLOGIE

Ces puits se trouvent au nord-est du département de la Marne :

— vallée de la Suippe : les 3 puits étudiés sont sur les communes de Pontfaverger et Betheniville à environ 25 km au nord-est de Reims ;

— ville de Reims : le puits Parcheminier se trouve au nord-ouest du centre ville, dans l'agglomération elle-même (fig. 1).

Il est à noter que le contexte morpho-structural présente beaucoup de caractères communs avec celui du massif de la Montagne de Reims : sables tertiaires et craie en strates subhorizontales. L'altitude moyenne est de 100 m, alors qu'elle varie de 175 à 240 m pour les phénomènes karstiques (fig. 2).

II. LOCALISATION ET DESCRIPTION DES PUIITS ARTIFICIELS

1. Le puits Parcheminier

Il se trouve au 65 de la rue de Bezannes à Reims. Cet ancien puits d'alimentation en eau potable est apparemment sec en permanence. La nourriture servant à appâter est restée sèche et a même durci, ceci traduisant un faible degré hygrométrique.

L'entrée est relativement bien obstruée par une plaque de ciment. Elle mesure 1,5 m de diamètre alors que le fond fait moins d'un mètre de diamètre. A la base du puits se

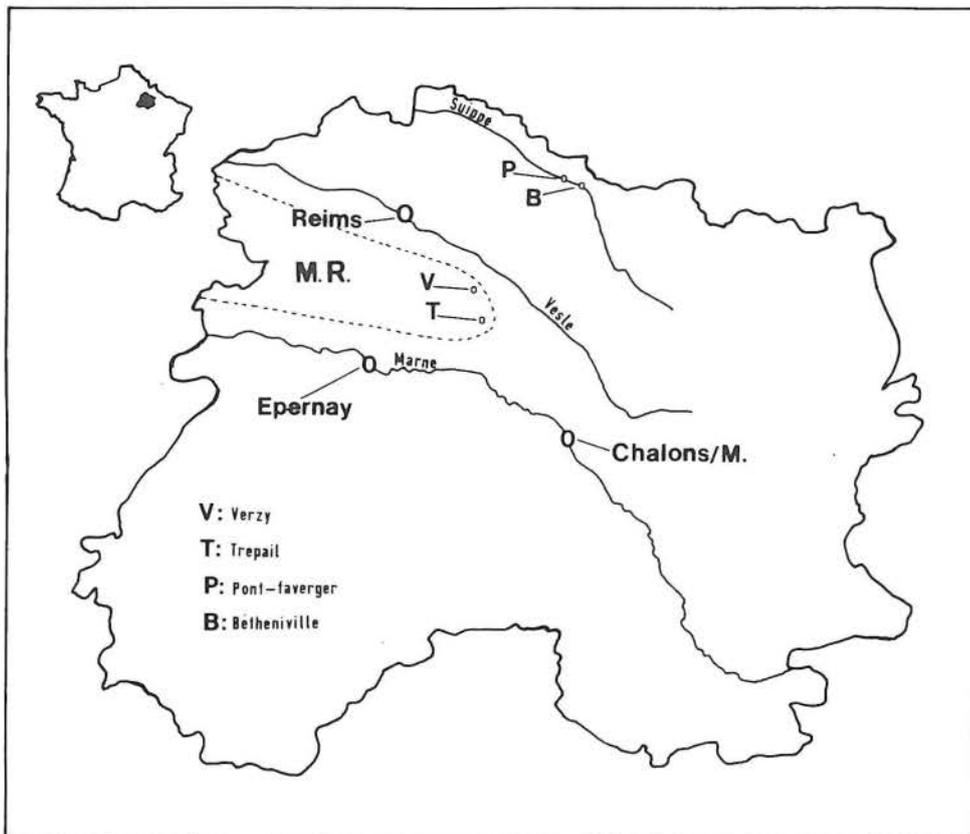


Fig. 1. Localisation du massif karstique de la Montagne de Reims (M.R.) et des puits artificiels : Reims - Pontfaverger et Betheniville.

trouve une ancienne canalisation verticale servant autrefois au branchement du tuyau de raccordement de la pompe de surface. Le niveau de l'eau est actuellement visible, à l'intérieur de la canalisation, à 1 m sous le fond du puits.

2. Le puits Severs

Ce puits se trouve dans le jardin d'une maison, rue des Remparts à Pontfaverger.

L'entrée d'un diamètre de 0,5 m de diamètre est très mal obstruée. Apparemment, le puits n'est jamais asséché, la hauteur d'eau étant d'environ 1,5 m.

3. Le puits Paquet

Ce puits se trouve dans le jardin d'une maison au 44 de la rue de Reims à Betheniville. Il a été complètement obstrué en 1981. Les études n'ont pu être en conséquence que très limitées.

4. Le puits Tirouflet

Ce puits se trouve dans le jardin de la maison située au 2 de la rue de Reims à Betheniville.

L'entrée ne fait que 0,5 m de diamètre. Elle est fermée par une plaque de ciment qui présente de nombreux orifices pouvant laisser le passage à toutes sortes d'éléments : microfaune, débris organiques divers.

Un premier horizon est formé de terre végétale très remaniée, visible sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur. Cette strate se trouve au contact direct de la craie. Les parois sont recouvertes de briques (maintien des

Tableau 1. Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des puits artificiels.

Nom du puits	Carte IGN	X	Y	Z	Stratigraphie	Dénivelée
PARCHEMINIER 51 454 1	Reims 1-2	721,735	172,780	97 m	Sables tertiaires Marne - Craie	- 23 m
SEVERS 51 440 1	Mourmelon le Grand 1-2	744,050	179,275	100 m	Sables tertiaires	- 12 m
PAQUET 51 054 1	Mourmelon le Grand 1-2	747,350	179,075	100 m	Craie	- 7,5 m
TIROUFLET 51 054 2	Mourmelon le Grand 1+ +	747,625	178,950	100 m	Craie	- 6,5 m

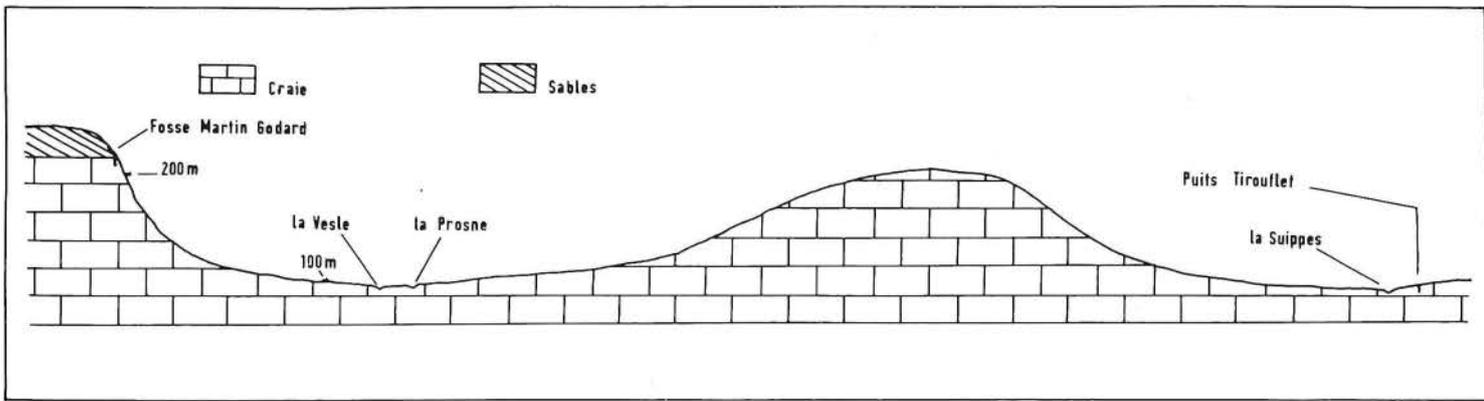


Fig. 2. Coupe réalisée entre la Fosse Martin Godard (massif de la Montagne de Reims) et le puits Tiroufflet.

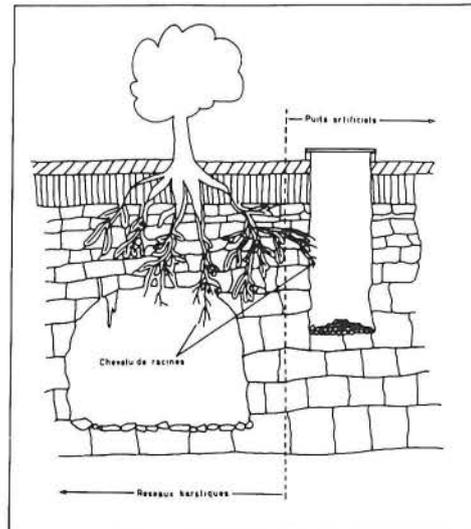
parois), sur une hauteur d'environ 2 m, ensuite la craie est à nu jusqu'au fond. Cette craie est très fissurée et les parois sont délitées (fig. 3). Le fond du puits est recouvert de résidus crayeux aux arêtes vives. Ils proviennent du délitage des parois. Le fond est plus large que l'entrée : 1,5 m de diamètre; l'eau, agressive, doit corroder les parois. La hauteur maximum d'eau observée a été de 1,5 m. Ce puits se trouve asséché pendant plusieurs mois, variant suivant les années.

III. LA FAUNE SOUTERRAINE

1. Méthode de récolte

Pour la faune terrestre, nous avons utilisé la chasse à vue : pinceau, aspirateur à bouche et pinces, mais nous avons également procédé par piégeage en nous inspirant de la balance pour la faune aquatique. Le piège est formé par une planchette parfaitement nettoyée de 0,2 x 0,2 m sur laquelle est déposée un appât. Elle est descendue au fond à l'aide d'une cordelette et est remontée selon le rythme souhaité. Ce type de piège s'est avéré très efficace pour les détritivores, mais aussi pour les prédateurs à la recherche de proies. Il présente plusieurs avantages :
 — récolte permanente possible (à utiliser avec discernement),
 — le milieu étudié reste exempt de tout dérangement et dégradation qui pourraient être occasionnés par des interventions humaines répétées, dans un environnement aussi restreint que celui du fond d'un puits. Pour la

Fig. 4. Schématisation des relations entre le milieu karstique, le milieu endogé et les puits artificiels. Inspiré de DELAMARRE DEBOUTTEVILLE, 1971.



faune aquatique nous avons principalement utilisé la balance.

2. PRESENTATION DE LA FAUNE SOUTERRAINE :

Unités systématiques	P1	P2	P3	P4
FAUNE TERRESTRE				
ANNELIDES				
Ind. 1			I	
Ind. 2			I	
GASTÉROPODES				
<i>Copaea</i> sp.			V	
<i>Helix pomatia</i>			IV	
<i>Oxychilus</i> sp.			I	
Ind. 1			IV	
Ind. 2			I	
CHÉRNÈTES				
<i>Chitonius Ehippochtonius tetrachelatus</i>			II	
ARANEIDES				
<i>Amaurobius</i> sp.			I	
<i>Erigonides</i>			III	
<i>Nesticus cellulanus</i>			I	
<i>Oplions</i>	I			
<i>Pholcides</i>			I	
<i>Tegeneria</i> sp.			I	
<i>Walckenaera acuminata</i>			I	
ACARIENS				
<i>Actinedida</i>			I	
<i>Bdellidae</i>			I	
<i>Gamasina</i>			II	
<i>Phauloppia</i> sp.			I	
<i>Oribatula</i> sp.			I	
<i>Trombidium holosericum</i>			I	
ISOPODES				
<i>Oniscus asellus</i>	I		I	
<i>Trichoniscus pusillus pusillus</i>			IV	
DIPLOPODES				
<i>Blaniulus guttulatus</i>	I			
<i>Polymicraxon polydesmoides</i>			II	
CHILOPODES				
<i>Geophilus insculptus</i>			I	
<i>Lithobius crassipes</i>			I	
COLLEMBOLÉS				
<i>Entomobrya lanuginosa</i>			I	
<i>Entomobrya multifasciata</i>			I	
<i>Folsomia candida</i>			I	
<i>Folsomia</i> sp.			III	
<i>Heleiomerus nitidus</i>			I	
<i>Hypogastrura purpurascens</i>			VI	
<i>Isotoma (Parisotoma) notabilis</i>			III	
<i>Isotoma viridis</i>			III	
<i>Isotomiella minor</i>			I	
<i>Isotomurus gr. palustris</i>			I	
<i>Kalophora</i> sp.			I	
<i>Lepidocyrtus curvicolis</i>			III	
<i>Lepidocyrtus lanuginosus</i>			I	
<i>Lepidocyrtus paradoxus</i>			I	
<i>Mesaphorura</i> sp.			I	
<i>Orchesella cincta</i>			I	
<i>Orchesella cf. villosa</i>			II	
<i>Orchesella</i> sp.			I	
<i>Protaphorura armata</i>			I	
<i>Pseudosinella</i> sp.			I	
<i>Sinella cf. caeca</i>			I	
<i>Sinella</i> sp.			I	
<i>Tamacerus minor</i>			III	
COLEOPTÈRES				
<i>Amara similata</i>			I	
<i>Anthracinus fasciatus</i>			I	
<i>Atomaria</i> sp.			I	
<i>Apion</i> sp.			I	
<i>Baryptus</i> sp.			I	
<i>Carebus auratus</i>			I	
<i>Langelandia snophtalma</i>			I	
<i>Mycetina hirta</i>			IV	
<i>Notraphilus substriatus</i>			I	
<i>Quedius mesomelinus</i>			I	
<i>Oligota</i> sp.			I	
<i>Oxytelus (Anotylus) sculpturatus</i>			I	
FAUNE AQUATIQUE				
PLATHÉLMINTHES				
<i>Phagocata</i> sp.	VII	VI	V	
MOLLUSQUES				
Lamelliibranches			VI	
AMPHIPODES				
<i>Niphargus kochlenus</i>		IV	IV	

Tableau 2. Etat récapitulatif des Invertébrés récoltés dans des puits artificiels de la Marne. P1 : Puits Severs. P2 : Puits Paquet. P3 : Puits Tiroufflet. P4 : Puits Parcheminier. I : 0 à 5 exemplaires. II : 6 à 10. III : 11 à 20. IV : 21 à 50. V : 51 à 100. VI : 101 à 500. VII : plus de 500.

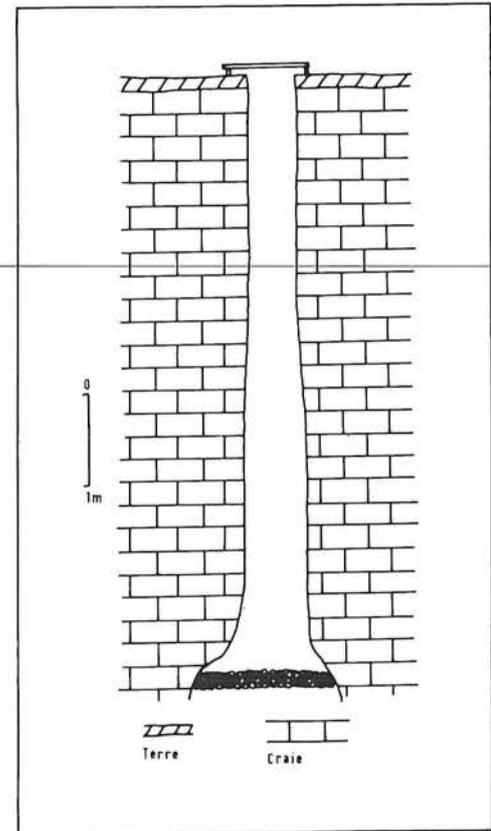


Fig. 3. Coupe du puits Tiroufflet à Betheniville.

Unités systématiques	Nombre d'individus récoltés	
	le 12.5.83	le 6.6.83
Mollusques	—	8
Chernètes	1	1
Araneides	3	2
Acariens	9	11
Myriapodes	—	4
Collembolés	52	30
Hyménoptères	3	5
Coléoptères	1	11
Plathelminthes		
Plathelminthes	—	2
Amphipodes		
Amphipodes	—	2
TOTAL	69	76

Tableau 3. Nombre d'individus des divers groupes, flottant à la surface de l'eau, au puits Tiroufflet les 12/5 et 6/6/83.

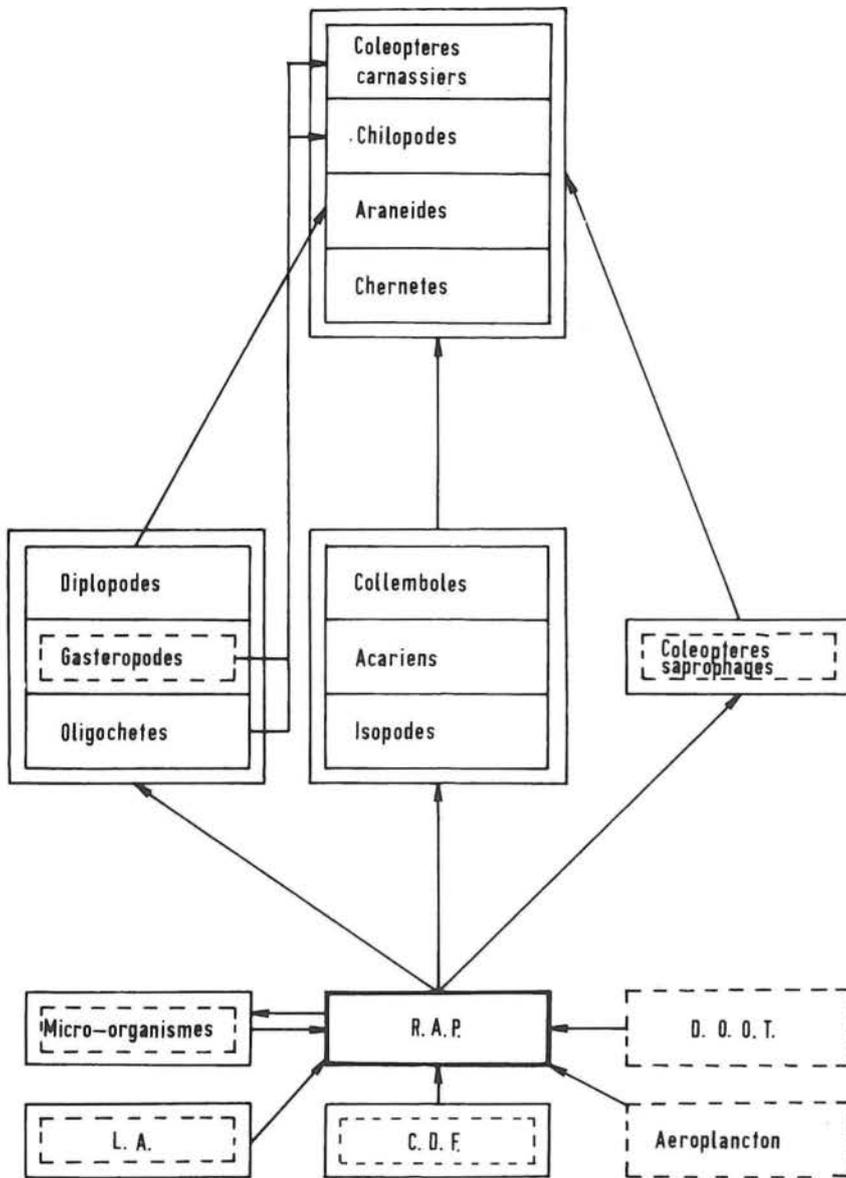


Fig. 5. Chaîne trophique du milieu terrestre souterrain des puits artificiels de la vallée de la Suippe (Marne). Traits pleins : origine autochtone. Traits pointillés : origine allochtone. L.A. : limon argileux. R.A.P. : ressources alimentaires dans le puits. C.D.F. : cadavres et déjections de la faune. D.O.O.T. : détritus organiques d'origine terrestre. Adapté de GINET-DECOU, 1977.

3. COMMENTAIRES :

Si les récoltes d'animaux révèlent plus de 60 espèces dans les puits, il faut aussi remarquer que la plupart a une origine épigée. Une grande partie de cette faune ne peut survivre et constitue donc une source de nourriture très importante pour les espèces inféodées à ce milieu.

Le tableau 3 fait apparaître les groupes que nous avons récoltés à la surface de l'eau, au puits Tirouflet, les 12.5.83 et 6.6.83. L'origine accidentelle de la majorité de la faune terrestre ne fait aucun doute : seuls les Collemboles étaient vivants. De plus, la majorité sont des troglodytes, à titre d'exemple les Coléoptères : *Anthocomus fasciatus*, *Atomaria sp.*, *Barypithes sp.*, *Oligota sp.*, etc. Il est à noter

Tableau 5. Etat récapitulatif du nombre d'espèces récoltées dans le karst de la Montagne de Reims et les puits artificiels du département de la Marne.

Unités Systématiques	Total	%	Karst	%	Puits	%	Espèces Communes	%
Annélides	2	1,72	2	3,02	2	3,08	2	14,29
Gastéropodes	5	4,32	1	1,52	5	7,69	1	7,14
Chernètes	1	0,86	0	0	1	1,54	0	0
Araneides	11	9,48	6	9,09	7	10,77	2	14,29
Acarions	8	6,90	3	4,55	6	9,23	1	7,14
Isopodes terrestres	4	3,46	2	3,02	2	3,08	0	0
Diplopes	9	7,77	7	10,61	2	3,08	0	0
Chilopodes	2	1,72	0	0	2	3,08	0	0
Collemboles	40	34,48	24	36,36	23	35,37	6	42,85
Thysanoures	1	0,86	1	1,52	0	0	0	0
Trichoptères	1	0,86	1	1,52	0	0	0	0
Lépidoptères	2	1,72	2	3,02	0	0	0	0
Nématocères	4	3,46	4	6,06	0	0	0	0
Brachycères	2	1,72	2	3,02	0	0	0	0
Coléoptères	16	13,79	6	9,09	12	18,46	2	14,29
Plathelminthes	1	0,86	0	0	1	1,54	0	0
Lamellibranches	1	0,86	0	0	1	1,54	0	0
Enchytraïdes	1	0,86	1	1,52	0	0	0	0
Copépodes	1	0,86	1	1,52	0	0	0	0
Amphipodes	2	1,72	1	1,52	1	1,54	0	0
Urodèles	1	0,86	1	1,52	0	0	0	0
Chiroptères	1	0,86	1	1,52	0	0	0	0
Total	116	100	66	100	65	100	14	100

également que le fond du puits est jonché de dizaines de coquilles de Gastéropodes d'origine épigée : *Cepaea sp.* et *Helix pomatia*.

Les apports de nourriture sont d'autant plus facilités que les entrées permettent le passage de restes organiques et d'organismes vivants. Il peut en résulter une surabondance de certains groupes qui peuvent à leur tour permettre la survie d'autres groupes. Il en est ainsi au puits Tirouflet où les Collemboles (20 espèces) peuvent atteindre des populations importantes (Tab. 2), qui assurent la survie de prédateurs tels que les Chernètes.

Nous avons pu réaliser la chaîne alimentaire sommaire de l'écosystème étudié. Elle fait apparaître 3 niveaux trophiques principaux (fig. 5) :

1. ressources alimentaires d'origine exogène détritique ;
2. animaux détritovores ;
3. prédateurs.

Le rôle des détritovores est important, aussi bien à partir des ressources d'origine exogène que pour les prédateurs. Le niveau 2 a donc des interactions avec les 2 autres niveaux.

Comme le montre le tableau 2, les populations de détritovores sont toujours beaucoup plus importantes que celles des prédateurs. Les Invertébrés ailés sont quasiment absents dans ces puits, et l'importance de ce groupe est infime. En effet, la faune aérienne ne pénètre que très difficilement dans les puits artificiels et nous n'avons observé que de très rares exemplaires sur les parois.

Les prédateurs sont bien représentés dans ces puits. Cependant, il faut remarquer qu'il s'agit presque exclusivement d'endogés, par rapport aux troglodytes que l'on trouve dans le karst. De plus, nous avons déjà indiqué que ces puits permettaient des apports faciles de faune : lien direct avec la surface et chute accidentelle des animaux.

IV. COMPARAISON ENTRE LES PEUPELEMENTS DU KARST DE LA MONTAGNE DE REIMS ET CEUX DES PUITS ARTIFICIELS DU DEPARTEMENT DE LA MARNE

Le tableau 5 indique quelles sont les espèces occupant le milieu karstique : 66 ; les

Groupe	Karst	Classe d'abondance	Puits	Classe d'abondance
Aranéides	<i>Meta manardi</i>	I	Erigonides	III
Isopodes	<i>Oniscus asellus</i>	I	<i>Trichoniscus pusillus pusillus</i>	IV
Coléoptères	<i>Pristonychus terricola</i>	I	<i>Mycetaea hirta</i>	IV
Amphipodes	<i>Niphargus schellenbergi</i>	VI	<i>Niphargus kochianus</i>	IV

Tableau 6. Tableau comparatif entre la taille des espèces cavernicoles et celles des puits pour un même groupe.

espèces occupant les puits artificiels : 65 et celles qui sont communes aux deux milieux : 14.

On peut déjà remarquer que, malgré les caractères similaires de certains facteurs abiotiques : nature du substrat, température, etc., les biocénoses sont différentes puisqu'il n'y a que 14 espèces communes aux 2 milieux sur un total de 116.

On peut particulièrement noter que les espèces cavernicoles sont surtout composées d'espèces de «grande taille», par rapport aux espèces de «petite taille» qui peuplent les puits artificiels. Ceci est remarquable pour certains groupes (voir tableau 6)

La notion d'espace intergranulaire (DELMARRE DEBOUTTEVILLE, 1971) prend ici toute son importance. On peut en effet considérer que les vides sont plus importants dans le milieu karstique que dans les puits artificiels où, en dehors du puits lui-même, il ne peut s'agir que de microfissuration. De ce fait, les espèces de «grande taille» ont plus de difficultés à coloniser le milieu endogé. D'autre part, il faut remarquer que les flux d'énergie sont beaucoup plus importants dans le karst que dans les puits artificiels. Les espèces de «grande taille», au métabolisme plus important, ont plus de facilités à se développer dans le milieu karstique, par rapport aux puits artificiels.

On peut aussi concevoir que le fonctionnement de ces 2 écosystèmes est différent dans le domaine des flux d'énergie :

1. Les puits artificiels : il s'agit d'un fonctionnement passif. Les apports de nourriture sont directement liés à la chute accidentelle des troglènes, pour les animaux vivant au fond. De plus, en régime noyé, les peuplements aquatiques sont aussi directement liés

à la montée des eaux de la nappe phréatique.

2. Le milieu karstique : il s'agit d'un fonctionnement actif. Les échanges avec la surface (apports énergétiques) ou entre les différentes parties d'un même réseau souterrain, sont continus, même s'ils peuvent être irréguliers en quantité ou dans le temps. En effet, la plupart des cavités présentent des courants d'air (plusieurs entrées et fissuration) et des entrées de grandes dimensions. En outre, elles sont occupées par des cours d'eau actifs qui sont autant de vecteurs d'énergie.

De plus, s'agissant de réseaux complexes et étendus, les animaux voient leurs propres déplacements facilités.

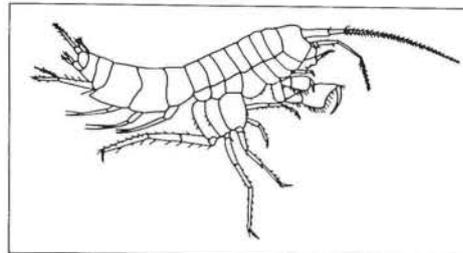


Fig. 6. *Niphargus kochianus*, d'après Schellenberg in Leruth 1939.

V. SYNTHÈSE

L'étude de 4 anciens puits d'alimentation en eau potable dans le nord du département de la Marne, nous a permis de constater qu'ils étaient creusés dans des sables tertiaires et

dans la craie du Campanien. La faune hébergée est surtout représentée par des détritivores et des Collembolés en particulier : plus de 35% des espèces, suivi par les Coléoptères : 19% et les Aranéides : 11%. En dehors de ces détritivores et de ces prédateurs, la faune est surtout constituée par des troglènes tombés accidentellement au fond du puits.

Lorsque l'on compare les peuplements des puits artificiels et ceux du karst de la Montagne de Reims, nous remarquons que le nombre d'espèces communes aux 2 milieux n'est que de 14 sur un total de 116. Malgré certains caractères abiotiques communs, les peuplements ne présentent que peu de similitudes.

Le karst héberge une faune de «grande taille» par rapport à une faune de «petite taille» dans les puits. On peut également remarquer que le fonctionnement des 2 écosystèmes est différent sur le plan des flux d'énergie. Il est beaucoup plus passif dans les puits : directement lié à la chute accidentelle des animaux, par rapport à un fonctionnement plus actif dans le milieu karstique : nombreux échanges facilités par les entrées multiples, des conduits plus grands et par certains vecteurs d'énergie tels que les courants d'air ou les cours d'eau souterrains.

Jacques CHAUVIN

BIBLIOGRAPHIE

CHAUVIN (J.) - 1980 - Classement des cavités du Karst de la Montagne de Reims, *Spelunca*, n° 4.

CHAUVIN (J.) - 1981 - Spéléoclimatologie dans la Montagne de Reims, *Spelunca*, n° 4.

CHAUVIN (J.) - 1983 - Présentation de l'écosystème souterrain du massif de la Montagne de Reims. Actes du 2^e Colloque international de Biospéologie, Béziers 1982. *Mémoires de Biospéologie*, Tome X.

CHAUVIN (J.) - 1984 - Recherches biospéologiques dans les cavités du karst crayeux de la Montagne de Reims. Publication du XV^e Congrès national de Spéléologie, Hyères 1983. *Spelunca Mémoires*, n° 13.

DELMARRE DEBOUTTEVILLE (C.) - 1971 - *La vie dans les grottes*. Coll. Que sais-je. P.U.F.

GINET (R.), DECOU (V.) - 1977 - *Initiation à la biologie et à l'écologie souterraines*. Ed. J.-P. Delarge.

Nous remercions vivement pour leur compétence de systématiciens MM. H. Coiffait, H. Dalens, L. Deharveng, M. Emerit, J.J. Geoffroy, R. Ginet, P. Leclerc.

PRESENCE DE L'ISOPODE CAVERNICOLE *PROASELLUS CAVATICUS* EN SEINE-MARITIME DANS LA ZONE INTERTIDALE

Jean-Paul HENRY

Laboratoire de biologie animale et générale
Université de Dijon 6, bd. Gabriel 21100 DIJON

L'espèce *Proasellus cavaticus* (LEYDIG, 1871) est l'Aselle anophtalme le plus répandu dans les eaux souterraines d'Europe. Son aire occupe une grande partie de l'Europe moyenne et occidentale qui comprend aussi le sud de la Grande-Bretagne (fig. 1). Ce vaste territoire s'étend sur le continent, du nord au sud, sur plus de 1300 km, sa largeur est d'environ 600 km dans la moitié septentrionale, mais elle se rétrécit considérablement vers le sud.

La limite méridionale de l'aire de répartition se situe au niveau des Cévennes où elle mord sur les Causses et atteint même vers l'ouest la vallée du Tarn; elle est limitée au sud-est par l'arc alpin: si ce Crustacé se rencontre pratiquement tout au long de la bordure convexe des Alpes, il est par contre totalement absent sur les versants oriental et méridional de la chaîne.

La limite orientale de l'aire est marquée par l'Inn et les Préalpes de Salzbourg. *P. cavaticus* est largement répandu dans le bassin du Rhin, dont la vallée constitue l'axe médian de son aire principale: des populations interstitielles sont installées dans la nappe alluviale du fleuve et de plusieurs de ses affluents (Neckar, Sieg, Main); c'est aussi le Rhin qui sert de lien aux stations cavernicoles situées dans les massifs hercyniens (Forêt Noire, Vosges, Massif schisteux rhénan).

L'aire s'étend vers le nord dans le massif du Harz et atteint le réseau hydrographique de la Weser qui représente sa limite septentrionale; au nord-est, elle mord sur le bassin de

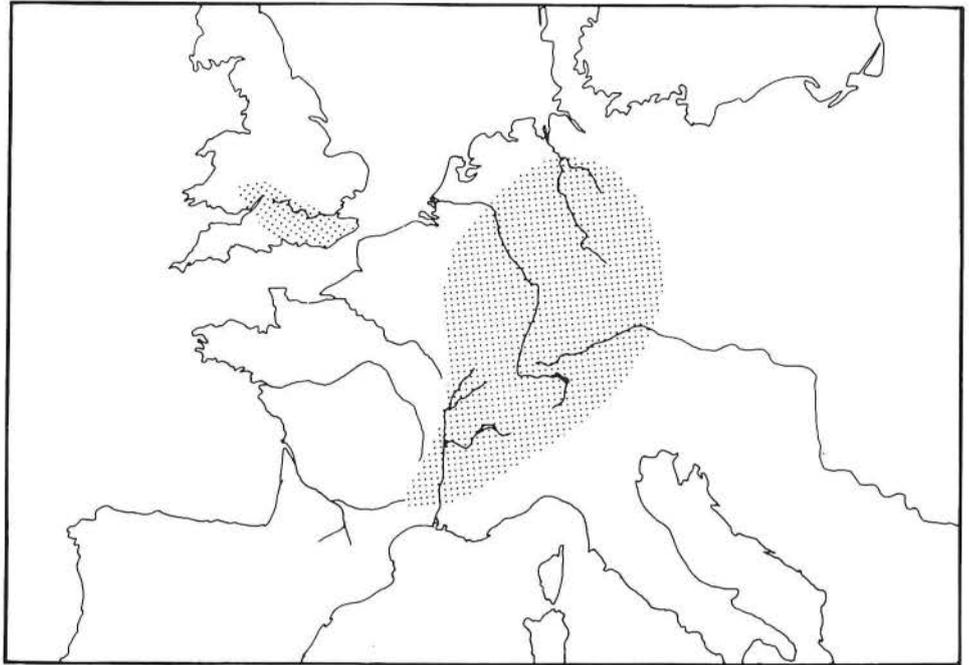
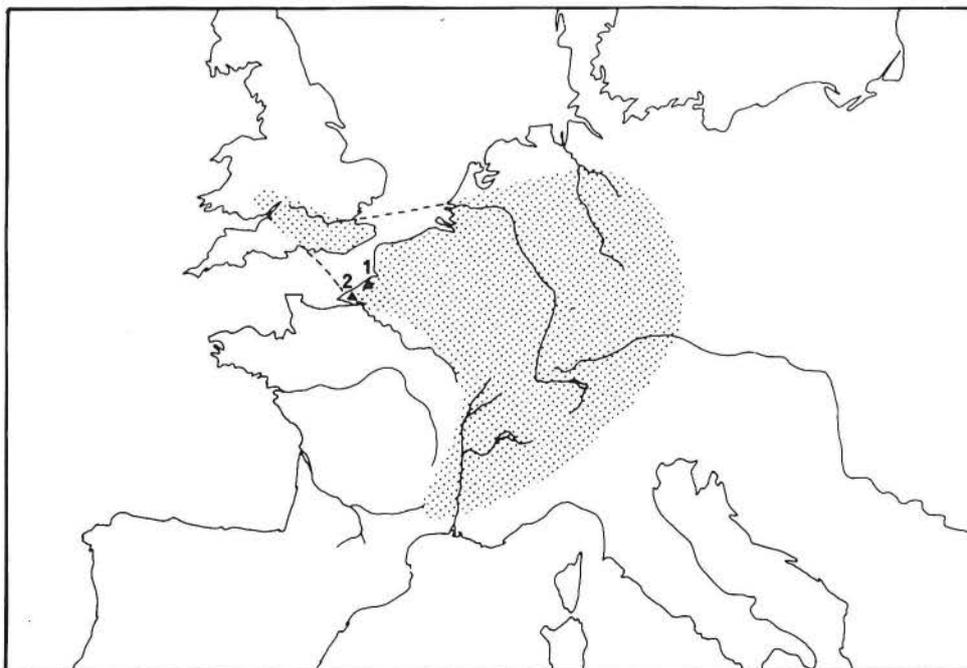


Fig. 1. Répartition géographique de *Proasellus cavaticus* (Leydig): une aire scindée en deux territoires bien séparés.

Fig. 2. Localisation géographique des 2 stations intertidales de *P. cavaticus*; 1. résurgence de Vastérial. 2. résurgence d'Étretat; aire de répartition probable de l'espèce.



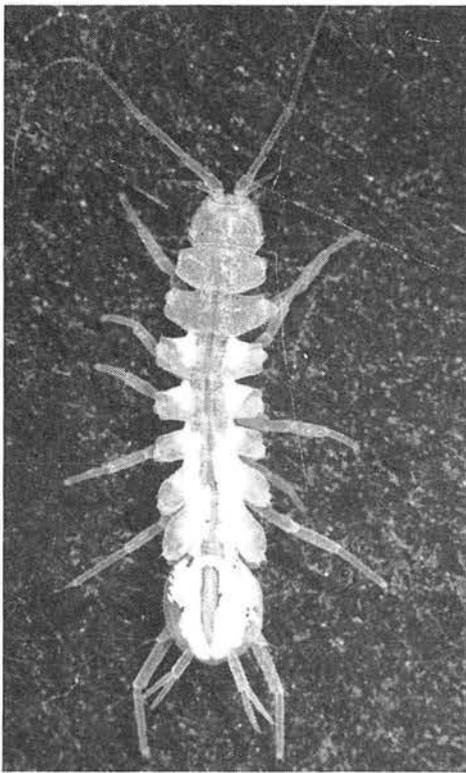
l'Elbe. A l'ouest du Rhin, l'aire se constitue dans le massif ardennais et sur le bassin de la Meuse. L'expansion de l'espèce vers l'ouest s'est effectuée jusqu'à la Grande-Bretagne où elle est répandue au sud-est de l'île, mais aussi en Galles du Sud et en Angleterre, dans les Mendip Hills (JEFFERSON, 1969).

Une distribution aussi vaste indique que *P. cavaticus* est une forme expansive. Aussi est-il normal que les prospections effectuées dans les différents types de biotopes aquatiques souterrains permettent très fréquemment sa mise en évidence; ainsi la liste des stations s'enrichit continuellement de nouvelles localités qui, par ailleurs, n'apportent aucune donnée supplémentaire à la connaissance de l'espèce.

Or, par exception, deux stations récemment découvertes par J.-H. STOCK, sont particulièrement intéressantes et méritent d'être mentionnées; elles permettent, en effet, de parfaire nos connaissances tant sur l'aire de répartition de *P. cavaticus* que sur ses milieux de vie.

1. UNE AIRE DE REPARTITION CONTINUE

Ces deux stations sont situées en France, en Seine Maritime (fig. 2), l'une à Vastérial près de Sainte-Marguerite, a été découverte en juin 1979, la seconde en octobre 1983 est à Étretat. Dans les deux cas, il s'agit de résurgences d'eau douce qui sourdent dans la zone intertidale de la grève.



Pl. 1. *Proasellus cavaticus* (LEYDIG, 1871), un individu mâle de 7,4 mm de la mine de fer de Moutiers (Meurthe-et-Moselle).

Le premier intérêt de ces deux stations est leur localisation géographique : elles sont situées, en effet, en dehors de l'aire connue de *P. cavaticus*. Jusqu'à ce jour, l'espèce n'avait pas été signalée dans la partie occidentale du Bassin Parisien, et sa présence dans les nappes phréatiques des basses vallées du Rhin et de la Meuse, aux Pays-Bas, restait hypothétique. Les peuplements de Grande-Bretagne apparaissaient donc comme très isolés de l'aire continentale.

Ces stations normandes étendent considérablement la distribution de l'espèce vers l'ouest ; elles représentent donc un lien qui unit la zone insulaire de l'aire de répartition à la zone continentale. De plus, elles constituent également une preuve que *P. cavaticus* a réussi la colonisation des réseaux souter-

rains des calcaires crétacés du Bassin Parisien. Il est probable qu'une telle continuité des peuplements existe aussi au niveau de la plaine alluviale du Rhin.

Dans ces conditions, l'extension de cet Aselle doit être prolongée jusqu'à la Manche et la mer du Nord, et on peut considérer sa répartition géographique comme parfaitement continue, la seule interruption étant marine.

Ainsi, la configuration de l'aire de répartition de *P. cavaticus* devient-elle plus conforme aux données de la paléogéographie ; celles-ci, en effet, indiquent que la présence de cet Aselle en Grande-Bretagne peut s'expliquer par son extension dans les alluvions du réseau hydrographique du Rhin, au Quaternaire au cours de la phase post-würmienne ; à cette époque, l'Angleterre se trouvait réunie au continent, et le Rhin, grossi de la Meuse, recevait la Tamise et la Weser et se déversait à peu près à la latitude de Newcastle (HENRY, 1977).

2. UN MILIEU DE VIE MIXOHALIN

C'est la station d'Etretat qui permet de donner la meilleure description de ce biotope remarquable pour un stygobie. La résurgence (fig. 3) située dans la zone intertidale de la grève, à mi-distance entre les lignes de marée haute des mortes-eaux et de marée basse des mortes-eaux, jaillit fortement d'un dépôt épais de sable grossier et de gravier ; ces sédiments hébergent une faune d'organismes stygobies qui peuplent les interstices entre les grains de sable et les graviers.

Les animaux sont prélevés au moyen d'une pompe biophréatique du type Bou-Rouch implantée entre 50 cm et 1 m de profondeur : *P. cavaticus* est accompagné d'Oligochètes, de Turbellariés, de Polychètes et d'Amphipodes parmi lesquels plusieurs espèces de Gammarides, notamment *Allomelita pellucida*, forme rare connue de très peu de localités. La méthode Karaman-Chappuis qui ne donne accès qu'aux couches superficielles n'ayant jamais permis, ici, de récolter de faune, on peut en déduire que celle-ci, et plus particulièrement *P. cavaticus* ne vit que dans la zone profonde de la résurgence (STOCK, 1984).

Mais l'originalité de cet habitat réside surtout dans le fait qu'il y a de brusques changements de la salinité de l'eau : les eaux sont

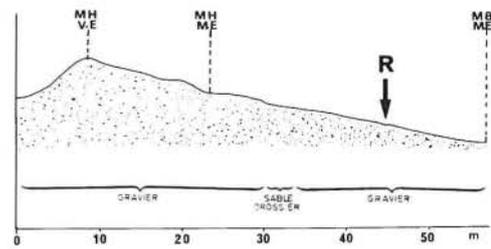


Fig. 3. Coupe transversale schématique de la grève d'Etretat au niveau de la résurgence (d'après Stock, 1984). MH V-E : ligne de marée haute des vives-eaux. MH M-E : ligne de marée haute des mortes-eaux. MB M-E : ligne de marée basse des mortes-eaux. R : résurgence. L'endroit où la résurgence jaillit des graviers est indiqué par une flèche.

douces pendant la marée basse, alors qu'à marée haute, les eaux marines immergent complètement la résurgence, les stygobies sont amenés à vivre dans une eau de nature mixohaline ; le taux de chlorinité atteint encore 1250 mg/l quinze minutes après le retrait de la marée contre 50 mg/l pendant la marée basse.

La population d'Aselle, comme celle de la résurgence de Vastéval qui vit dans les mêmes conditions qu'à Etretat, supporte parfaitement ces fortes fluctuations. Si certaines espèces de Gammarides sont typiques de ces milieux saumâtres, c'est la première fois, à notre connaissance, qu'une telle euryhalinité est observée pour *P. cavaticus*. Cette nouvelle propriété confirme l'exceptionnelle ubiquité écologique de cet Aselle souterrain.

Jean-Paul HENRY

BIBLIOGRAPHIE

HENRY (J.-P.) - Origine et ancienneté de *Proasellus cavaticus* (Leydig) (Crustacea, Isopoda, Asellota des eaux souterraines). Proc. 7th. Intern. Sepelol. Cong. Sheffield, 243-246.

JEFFERSON (G.T.) - 1969 - The distribution of hypogean animals in the British Isles. C.R. 5^e Cong. Intern. Speleol., Stuttgart, 8, 1-6.

STOCK (J.H.) - 1984 - Observations morphologiques et écologiques sur une population intertidale de «*Melita*» *pellucida* Sars (Amphipoda) à Etretat (Seine-Maritime, France). Cah. biol. mar., 25, 93-106.

LES CRUSTACES ISOPODES AQUATIQUES SOUTERRAINS DU SUD-OUEST DE LA FRANCE: FAUNISTIQUE ET BIOGEOGRAPHIE

Guy MAGNIEZ

Biologie animale et générale, Université de Dijon
6, bd. Gabriel 21100 DIJON

En 1983, mon collègue J.-P. HENRY et moi-même avons présenté une petite faune des isopodes d'eau douce de France. Bien que le nombre total des espèces soit faible (un peu plus de 60), la présentation en est complexe, car l'ordre des isopodes est très diversifié. Il se compose essentiellement des lignées marines dont la plupart ont envoyé des représentants dans les eaux douces à différentes époques et par des voies différentes, si bien que le peuplement isopodien dulcicole est extrêmement hétérogène.

Ce peuplement est dominé par les Asellides (21 espèces), les Sténasellides (6 espèces et sous-espèces), les Flabellifères (7 espèces) et les Microparasellides (quelque 14 espèces). Les autres groupes (Janiridés, Microcerbériidés, Anthuridés, etc.), étant beaucoup moins importants pour la France d'Europe.

Le quart sud-ouest de la France, bassin aquitain et ses annexes, est particulièrement riche en formes, surtout souterraines. Nous allons essayer d'analyser sa faune stygobie.

1. CAS DES ASELLIDES

Les Aselles sont des isopodes typiquement pigmentés et oculés, quoique les yeux ne soient formés que de quelques ommatidies. Les espèces de surface donnent fréquemment des populations souterraines dont les individus sont plus ou moins dépigmentés et microphthalmes, parfois anophtalmes. Ce sont aussi elles qui, au cours des temps passés, ont donné par des spéciations locales, des espèces dérivées, plus ou moins adaptées à la vie hypogée et que nous pouvons classer ainsi :

- formes obscuricoles ou troglaphiles, souvent partiellement dépigmentées, microphthalmes, obligatoirement endémiques;
- formes stygobies, totalement dépigmentées et anophtalmes, que nous pouvons classer ainsi :

- formes phréatobies au corps gracile, adaptées à la vie dans les interstices mais non à la vie en eau libre. Elles semblent très nobles au sein des aquifères souterrains;

- formes troglabies, au corps souvent rapu, adaptées à la vie en eau libre. Elles sont souvent liées à un massif karstique déterminé, donc très endémiques;

- formes ubiquistes, cumulant les aptitudes à la vie dans ces deux types de milieux souterrains, donc pouvant coloniser de vastes aires géographiques. Le meilleur exemple européen est celui de *Proasellus cavaticus*, étudié par M. J.-P. HENRY et que l'on trouve au Pays de Galles, des Pays-Bas et de l'Allemagne du Nord jusqu'aux frontières du bassin aquitain. Le Sud-Ouest de la France nous permet de retrouver ces différents types écologiques :

A. *Proasellus meridianus* (RACOVITZA, 1919) : c'est l'espèce épigée autochtone de toute la moitié ouest de la France (rivières, étangs, mares, sources...), mais fréquentant souvent les fontaines couvertes, puits obscurs, rivières souterraines (Padirac, St-Géry...). Notre collègue Claude BOU d'Albi nous a fait parvenir des exemplaires microphthalmes et presque totalement dépigmentés, provenant de drains obscurs des environs de cette ville.

B. *Proasellus coiffaiti* (HENRY et MAGNIEZ, 1972) : cette robuste espèce, décrite sur quelques exemplaires des grottes de Sare (64), juste à la frontière franco-espagnole, fortement dépigmentée, mais munie d'yeux normaux, vient d'être retrouvée par notre collègue Bernard LEBRETON dans plusieurs cavités, résurgences et sources de Chalosse (sud des Landes, régions de Peyrehorade à Aire-sur-Adour. Cette fois des individus parfaitement pigmentés et oculés ont été capturés, ce qui nous oblige à la considérer comme une espèce épigée, au même titre que les classiques *Asellus aquaticus*, *Proasellus meridianus* et *P. coxalis* de notre pays.

C. *Proasellus racovitzai* (HENRY et MAGNIEZ, 1972) : espèce très peu pigmentée, aux yeux réduits, trouvée dans le système karstique du Goueil-di-Her (Arbas, 31) et dans ses émergences, mais non dans les eaux épigées voisines, malgré les recherches.

D. *Proasellus albigensis* (MAGNIEZ, 1965) : largement répandue dans le sous-écoulement du Tarn, de la région d'Albi jusqu'à l'extrême amont (Pont de Montvert) et dans ses affluents (Agout, Dourdou, etc.), montrant la mobilité et l'aptitude des phréatobies à coloniser les systèmes aquifères alluviaux, même étendus.

E. Les espèces troglabies endémiques : au nombre de 4, elles sont toutes localisées dans l'ouest des Pyrénées et dans des bassins différents :

- *Proasellus spelaeus* (RACOVITZA, 1922) : cavités de la région d'Oxibar (64), massif des Arbaillies; très endémique;

- *Proasellus aquaecalidae* (RACOVITZA, 1922) : eaux karstiques des hauts bassins des Gaves d'Aspe et d'Ossau. Elle a été retrouvée sur le versant espagnol (cueva del Rebeco à Villanua, haut bassin du Rio Aragon), montrant que sa répartition chevauche la crête pyrénéenne;

- *Proasellus vandeli* (MAGNIEZ et HENRY, 1968) : grotte d'Arbouet (64) et autres cavités des bassins de la Bidouze et du Saison ou Gave de Mauléon;

- *Proasellus chauvini* (HENRY et MAGNIEZ, 1978) : découvert par notre collègue et ami

Jacques CHAUVIN dans deux grottes de la région de St-Jean-Pied-de-Port (bassin de la Nive, 64).

Ces 4 espèces sont fortement apparentées entre elles et appartiennent à un ensemble d'espèces ibériques que l'on trouve dans le haut bassin de l'Ebre, le Pays Basque espagnol et la région cantabre. Curieusement, pour trouver un autre Asellide troglabie plus au nord, il faut remonter jusque dans les Deux-Sèvres (rivière souterraine de Bataillé, près de Melle, bassin de la Charente), où vit *Gallasellus heilyi* (LEGRAND, 1956), une forme-relique qu'on ne peut rapprocher d'aucune de nos espèces épigées ou hypogées.

2. CAS DES STENASELLIDES :

Les Sténaselles sont très différentes des Aselles. Ces Asellotes sont tous anophtalmes et stygobies. Il est donc inutile de rechercher dans la faune épigée actuelle leurs ancêtres oculés. S'il fallait résumer leur histoire, on dirait que leurs ancêtres marins devaient vivre en fousisseurs dans les sédiments du fond, puis que les lignées, ayant envahi les nappes phréatiques continentales, au plus tard au Mésocrétacé, s'y sont propagées et ont parfois émigré vers le milieu karstique. En France continentale, nous trouvons deux espèces :

A. *Stenasellus buili* (REMY, 1949) : grande espèce endémique dépassant 15 mm, inféodée aux eaux karstiques des Corbières. C'est une forme thermophile ne semblant pas se reproduire en dessous de 12° environ. Sa survie au cours des phases glaciaires quaternaires pose un problème. Peut-être est-elle liée aux remontées d'eaux thermales existant dans cette région et se mêlant dans le sous-sol aux eaux karstiques banales.

B. *Stenasellus virei* (DOLLFUSS, 1897) : découverte à Padirac, cette espèce a une répartition très vaste, s'étendant largement sur le nord de l'Espagne. Elle comporte 5 sous-espèces dissociées et nous pose plusieurs questions :

- les deux sous-espèces *S. virei virei* (Padirac, bassin de la Garonne et affluents, bassin de l'Ebre moyen) et *S. virei angellieri* (bassin de la Têt, du Tech et des fleuves côtiers de Catalogne) ont une répartition transpyrénéenne.

Comme leur habitat est très largement hyporhénique, on peut penser que les communications hydrologiques entre les deux versants des Pyrénées sont responsables de ces transferts de faune, au moins au cours de périodes climatiques favorables (cas de la percée entre Rio Esera et Garonne ?);

- la sous-espèce karstique *S. virei hussoni* se cantonne aux versants nord des Pyrénées centrales (Ariège, Haute-Garonne, Hautes-

Pyrénées). Les causes de la limitation orientale de son aire (la vallée de l'Ariège semble former une barrière) et de la limitation occidentale (les stations ne dépassent pas Bagnères-de-Bigorre, les massifs proches de Lourdes n'étant pas peuplés) restent hypothétiques;

— la sous-espèce hyporhéique *S. virei boui*, inféodée au sous-écoulement du Salat et de ses affluents, en amont de St-Girons (09) est extrêmement endémique. Comme elle est uniquement localisée dans une ex-aire glaciaire, elle serait issue d'une très récente subspeciation à partir de la forme-type de la Garonne.

L'espèce *Stenasellus virei* est donc un complexe biologique, que nous avions appelé espèce polytypique (MAGNIEZ, 1968) et ses différentes sous-espèces ne sont pas contemporaines.

3. CAS DES SPHEROMIENS

Les auréoles calcaires jurassiques constituant l'est du bassin parisien (Lorraine, Est de la Champagne, Bourgogne) abritent le bel Isopode *Caecosphaeroma burgundum* Dollfus, 1897 dans leurs eaux karstiques. Une variété de cette espèce: *C.b. rupistucaldi* Hubault, 1934 a été retrouvée à l'ouest du Massif central dans ces mêmes auréoles: rivières souterraines à Bataillé (79), près de La Rochefoucault (16), près de Mareuil-sur-Belle (24) et enfin près de Souillac (46). Les *Caecosphaeroma* étant des faunes d'origine marine (vraisemblablement Miocène) périalpine, il est fort peu probable que les *C.b. rupistucaldi* aient une origine marine indépendante. Il s'agit plutôt d'une extension des peuplements bourguignons (de l'Yonne) en direction du Poitou, par

l'intermédiaire des auréoles calcaires méridionales du bassin parisien, puis dans les systèmes karstiques charentais et enfin nord-aquitains. Ce serait alors un bel exemple de l'extension de l'aire d'un troglobie pur par dessus les limites des réseaux hydrographiques.

4. CAS DES MICROPARASELLIDES

Une demi-douzaine d'espèces au moins de ces minuscules (2 mm et moins) Asellotes phréatobies ont été répertoriées par Mme N. Coineau pour la partie Sud-Ouest du pays, surtout dans des sous-écoulements de rivières, rarement en grotte. Cependant, cette famille présente des espèces actuelles très eurhyalines, vivant dans les sables de plages marines (*Microcharon marinus*, par exemple).

Il se pourrait donc qu'ils aient colonisé très récemment les eaux souterraines continentales, par l'inféoflux du réseau hydrographique.

5. CONCLUSIONS

La région aquitaine au sens large se présente pour la stygofaune comme un vaste système hydrographique médian (Garonne-Dordogne + Adour), encadré par les auréoles calcaires jurassiques et crétacées au nord et les Pyrénées calcaires au sud. La stygofaune isopodienne ancienne ne compte que quelques espèces, cantonnées dans les régions les plus périphériques: *Stenasellus buili* des Corbières, *Gallasellus heilyi* du Poitou. Le peuplement actuel en Isopodes stygobies semble largement tributaire des liens hydrologiques avec la péninsule ibérique: Aselles

souterrains des Pyrénées Atlantiques, Sténaselles phréatiques des Pyrénées centrales et orientales, ou avec le Poitou: *Caecosphaeroma*. Seules les espèces ayant le caractère de phréatobie ont effectué une active recolonisation des zones centrales de l'aire: *Proasellus albigensis* du Tarn, *Stenasellus virei virei*, différentes espèces de *Microcharon*.

Etant postglaciaire, ce phénomène n'est pas achevé et on peut citer le cas de l'Aselle stygobie périalpin et rhodanien *Proasellus cavaticus* qui, à partir du Haut-Languedoc, commence à envahir le bassin du Tarn par la voie de son affluent, le Dourdou: c'est un futur Aselle stygobie du bassin aquitain.

Guy MAGNIEZ

BIBLIOGRAPHIE

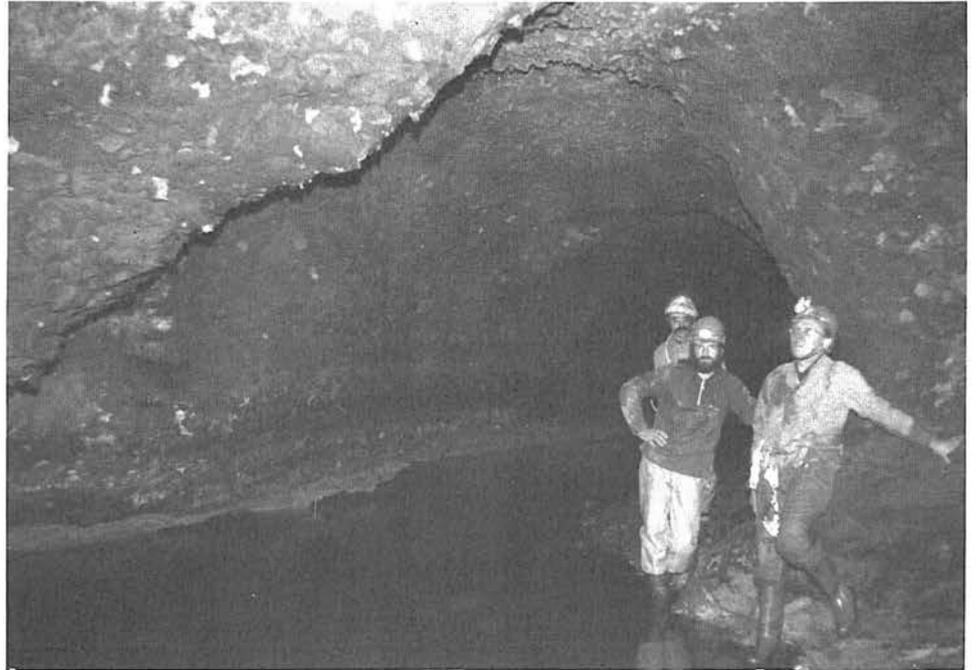
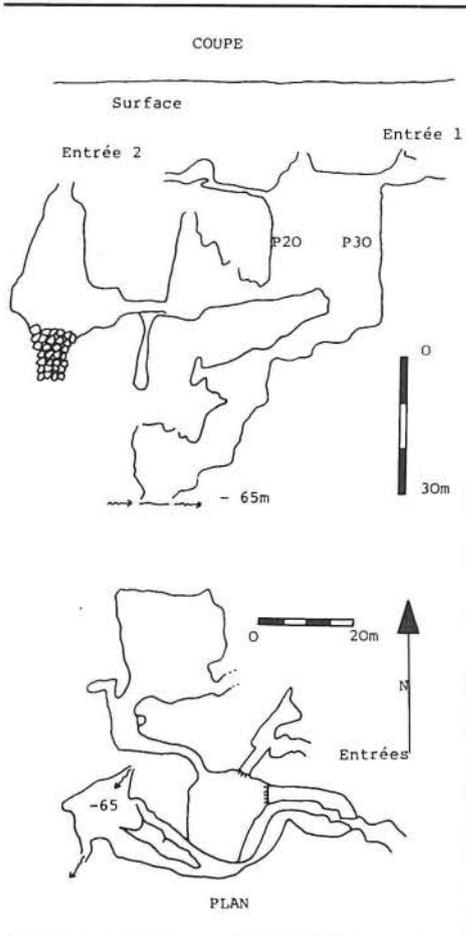
- COINEAU (N.) - 1971 - Les Isopodes interstitiels. Documents sur leur écologie et leur biologie. *Mém. Mus. Nat. Hist. Nat. Fr. N.S., A*, 64 : 1-170.
- HENRY (J.-P.) - 1976 - Recherches sur les Asellidae hypogés de la lignée cavaticus (Crustacea, Isopoda, Asellota). *Th. Sc. Nat. Univ. Dijon*, N° Dépôt A.O. 12 143, 1-270.
- HENRY (J.-P.), MAGNIEZ (G.) - 1983 - Crustacés Isopodes (principalement Asellotes). *Bull. mens. Soc. Linn. Lyon*, 52, 10 : 319-357.
- LEBRETON (B.) - 1983 - Contribution à la connaissance de l'aire de répartition de *Stenasellus virei virei*. *S.C. Info, Spéléo Corrèze Information*, 9 : 57-59.
- MAGNIEZ (G.) - 1974 - Observations sur *Stenasellus virei* dans ses biotopes naturels (Crustacea Isopoda Asellota des eaux souterraines). *Int. J. Spéléol.*, 6 : 115-171.

UNE NOUVELLE ESPECE DE COLLEMBOLE DANS DES CAVITES LORRAINES

Jacques CHAUVIN
15, rue Jean d'Aulan 51100 REIMS

Parmi les Collemboles, le genre *Pseudosinella* est représenté par de nombreuses espèces dans le milieu souterrain. Dans le gouffre de la Sonnette à Savonnières en Perthois (Meuse), nous avons récolté de nombreux exemplaires appartenant à une nouvelle espèce : *Pseudosinella chauvini* (Stomp, Gouze, 1984). Cette nouvelle espèce est intéressante par le fait qu'elle présente des modifications assez nettes, rares, en principe, chez les Invertébrés cavernicoles fréquentant nos contrées. Depuis, cette espèce a été également trouvée dans le réseau du Rupt du Puits à Beurey (Meuse). Nous ne reviendrons pas sur les caractères morphologiques de ce cavernicole puisqu'ils ont été détaillés par Stomp et Gouze. Nous apporterons quelques précisions sur les cavités hébergeant ces Invertébrés en donnant des informations sur les autres cavernicoles de ces cavités souterraines.

Fig. 1. Topographie schématique du gouffre de la Sonnette.



Réseau du Rupt-du-Puits (Meuse)
(Photo M.Louis)

I. LE GOUFFRE DE LA SONNETTE

1. Localisation :

Savonnières en Perthois (Meuse).
Carte I.G.N. : BAR 5-6.
X : 805,52 - Y : 104,16 - Z : 260 m.

Ce gouffre se trouve à l'intérieur des carrières de Savonnières en Perthois. Il a été ouvert, comme de nombreux autres gouffres, par les carrières extrayant le calcaire. Aujourd'hui encore, l'extraction continue et de nombreuses galeries servent aussi à la culture du «champignon de Paris».

- une galerie horizontale, humide, abondamment concrétionnée donne sur un P 20. A sa base, on peut, soit rejoindre le réseau vertical, soit accéder à un réseau encombré de nombreux blocs où l'atmosphère est très sèche.

2. Stratigraphie :

Valanginien - Hauterivien - Barrémien.

3. Eléments topographiques :

Dénivelée : environ - 70 m.
Développement : environ 500 m.

5. Faune récoltée :

a) Faune terrestre :
COLLEMBOLLES : *Pseudosinella chauvini*.
COLEOPTERES : *Quedius sp.*
b) Faune aquatique :
ISOPODES : *Caecosphaeroma burgundum* avec son commensal *Sphaeromicola topsenti*.
AMPHIPODES : *Niphargus sp.*

4. Description :

Il est à noter que ce gouffre s'ouvre à 20 m sous la surface (dans les carrières). Deux accès sont possibles :

- un P 30 faiblement arrosé donne sur une succession de puits jusqu'au fond où un ruisseau est recoupé ;

6. Commentaires :

Ces cavernicoles ne sont présents que dans les parties humides. En effet, les parties sèches se sont révélées azoïques. Les Collemboles sont surtout visibles dans la galerie horizontale au-dessus du P 20 sur les parois calcitées et aussi au fond du réseau.

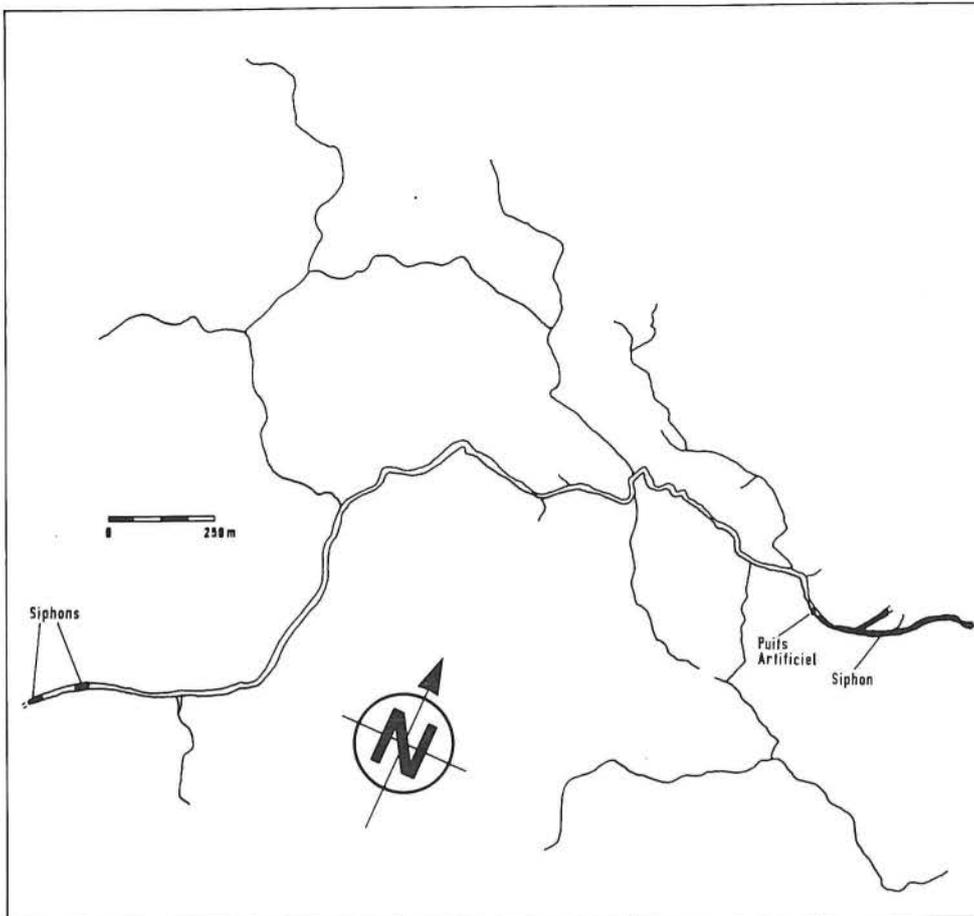


Fig. 2. Topographie schématique du réseau du Rupt du Puits.

II. LE RESEAU DU RUPT DU PUIITS

1. Localisation :

Beurey sur Saulx (Meuse).
Carte I.G.N. : St-DIZIER.
X : 797,40 - Y : 1120,18 - Z : 170 m.
Ce réseau constitue l'amont du Rupt du Frai-
niau qui se jette dans la Saulx.



Rupt- du-Puits (Meuse) - (Photo M.Louis)

2. Stratigraphie :

Barrémien.

3. Eléments topographiques :

Plus de 12000 m de développement.

4. Description :

Décrire un réseau de plus de 12000 m est une véritable gageure. L'entrée (exutoire) siphonne sur 445 m. Un puits artificiel de 47 m permet de court-circuiter ce siphon et donne sur un collecteur de plus de 2 km de long aboutissant à un autre siphon. De nombreux affluents viennent alimenter le collecteur.

5. Faune récoltée :

a) Faune terrestre :
DIPLOPODES : Iulidae*. *Tachypodoiulus niger**.
COLLÉMBOLES : *Folsomia candida**. *Onychiurus* sp.*. *Pseudosinella chauvini**.
COLEOPTERES : *Pterostichus cristatus parumpunctatus**.
b) Faune aquatique :
AMPHIPODES : *Niphargus virei*.
ISOPODES : *Caecosphaeroma burgundum*.

6. Commentaires :

L'étendue du réseau et les conditions d'exploration ne facilitent pas la tâche du biospéologue. Seule une campagne sérieuse de piégeages permettrait de connaître avec précision les cavernicoles de ce réseau.



Collembole (Photo Schejbal)

III. CONCLUSIONS

Ces quelques lignes nous montrent que, même dans des cavités connues depuis fort longtemps, très fréquentées, et dans des régions qualifiées de «pauvres», des découvertes intéressantes peuvent être encore faites. Il est évident que les autres cavités de ces massifs révéleront d'autres cavernicoles méconnus ou inconnus.

Jacques CHAUVIN

* Récoltes de J.-J. GEOFFROY (comm. pers.).

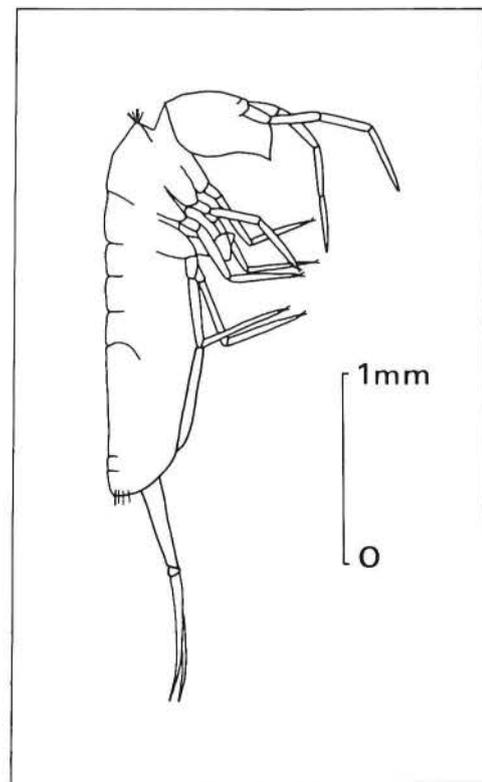


Fig. 3. *Pseudosinella chauvini*.

LES CHAUVES SOURIS CALCITEES DU GOUFFRE DU PETIT-CLAMART, LA BURBANCHE, AIN

Philippe DROUIN
Quartier Latin 01820 VILLEBOIS

La reprise topographique des cavités du Jugey-Méridional (sud du département de l'Ain) dans le cadre de l'inventaire préparé par un collectif de spéléologues et de scientifiques, amène régulièrement des découvertes dans les disciplines connexes telles que la paléontologie, la préhistoire ou la biologie souterraine.

En 1984, nous découvrons un cimetière de chauves-souris calcitées, c'est ce gisement et ses hypothèses sur sa formation qui font l'objet du présent article. Nous devons cette découverte à une anecdote que nous livrons ci : « Nous finissons de préparer notre matériel, avec Alain Bach, un matin de juillet 1984. En réalité, notre visite entre dans le cadre de la recherche du réseau souterrain de la Burbanche, dont nous connaissons uniquement la résurgence, pénétrable sur 100 m de longueur, et les pertes impénétrables.

Des fentes de décollement ont rarement la réputation de conduire au réseau karstique qui est beaucoup plus bas dans le cas présent.

Nulle part, dans le massif, au cours de nos explorations, nous n'avons accédé à un réseau karstique actif en entrant par une fracture de ce type. Aussi je dis en boutade à Alain : « Si nous tombons dans le collecteur de la Burbanche, je serais le premier à me mettre l'eau ! ».

Quelques heures plus tard, j'aurai l'occasion de regretter ces paroles : au passage de la voûte mouillante, où il faut se tremper totalement, sous l'œil goguenard de mon coéquipier.

Nous désiphonnerons ce passage, puis le siphon terminal, lors de nos visites ultérieures. Je n'aurai pas tenu ma promesse de mettre à l'eau pour rien, car une surprise nous attendait derrière ce passage ».

II. DESCRIPTION DE LA CAVITE

Nous utiliserons ici les fiches normalisées selon le système Balsan.

GOUFFRE DU PETIT-CLAMART

onymes : aven du Petit-Clamart.

I. La-Burbanche, Ain.

galerie n° 1-2.

U = 847,35. Y = 102,32. Z = 780.

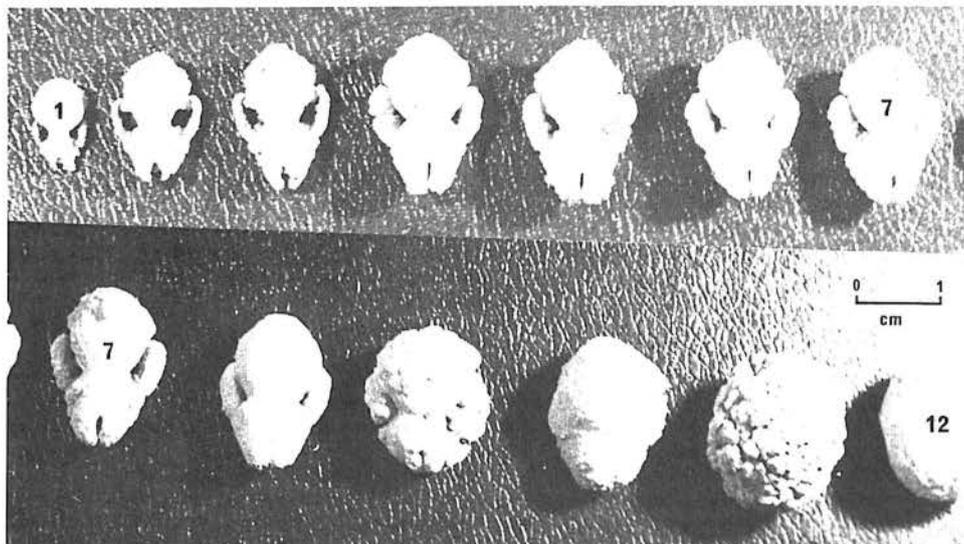
Élev. : 198,6. Lp : 110,5. P : -70,5; +4,0 = 4,5 m.

II. Kimméridigen.

III. Spéléo Club de Lyon, 22 avril 1967 sur l'indication d'Ernest Genan des Hopitiaux.

Topographie en plan et coupe et compléments d'exploration P. DROUIN et A. BACH, juillet et août 1984.

IV. Un petit couloir d'entrée mène à un puits



De gauche à droite : crânes de chauves-souris de plus en plus calcités, sur la plus grosse perle de cavernes, on aperçoit l'extrémité du maxillaire supérieur après avoir enlevé la pellicule de calcite.

fossile de 13 m de profondeur au sol encombré de gros éboulis. A l'est on descend un petit ressaut entre les blocs (main courante conseillée) et on se retrouve au-dessus du puits suivant que l'on traverse en opposition. On peut, ensuite, descendre jusqu'à un évaseement au bord duquel se trouve le premier amarrage. Attention aux blocs qui sont ici très instables, un accident étant vite arrivé. Lors de nos explorations, nous avons dû purger le puits d'environ une tonne de blocs instables pour pouvoir progresser en toute sécurité.

Le puits suivant se descend à la faveur d'une faille d'axe Nord-Sud approximatif et longue de plus de 10 m. On parvient après 27 m de descente à un fractionnement sur un plancher d'éboulis suspendu. Au sud, un important courant d'air arrive au travers des éboulis. Le plancher du puits est creusé d'un autre puits dans lequel nous n'avons pas osé descendre.

Il convient alors de se diriger au nord en restant assuré (on marche ici sur un éboulis suspendu dans la faille), jusqu'à un nouveau puits creusé à la rencontre de deux fractures, le miroir de faille est ici très important. On descend la fracture et on trouve alors plusieurs galeries.

Au nord, une galerie très ébouleuse accessible par un puits, elle est obstruée à -67,0 m.

A l'est, une galerie remontante d'origine karstique, présentant un remplissage argileux et s'arrêtant au pied d'un puits remontant. Au

sud, la descente d'un nouveau puits défendu par une étroiture verticale amène dans le prolongement de la faille, le point bas se situe à -70,5 m. Le courant d'air important n'a pu être retrouvé dans ce secteur malgré des remontées en escalade dans les plafonds. A l'ouest, une escalade permet d'accéder au prolongement de la galerie karstique décrite auparavant et recoupée, accidentellement, par la faille.

On remonte cette galerie jusqu'à un bassin que nous avons désiphonné. La galerie continue alors jusqu'au siphon terminal, surmonté d'une galerie obstruée par le remplissage de calcite mais par laquelle provient une partie du courant d'air. C'est entre ces deux plans d'eau que se situe le gisement de chauves-souris.

V. Regard sur une galerie karstique d'axe Est-Ouest approximatif, présentant une circulation temporaire.

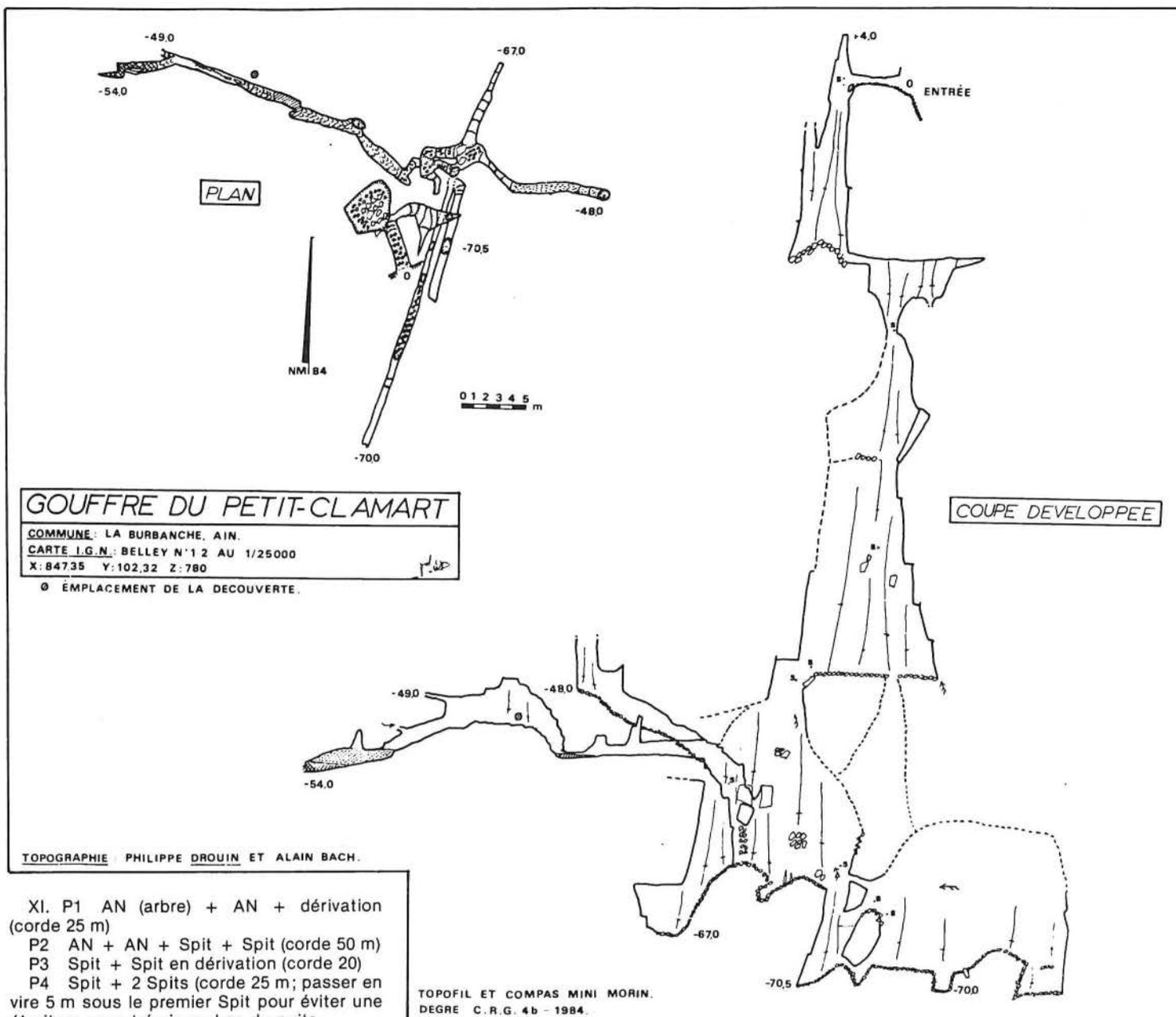
VI. Coulées stalagmitiques, fistuleuses, stalagmites vers -64,0 m et dans la galerie karstique active.

VIII. Crânes de capridés, d'oiseau, de chauves-souris vers -15 m (en cours de détermination).

Dans la galerie active : 7 grands murins, 1 Grand Rhinolophe fer-à-cheval, 2 petits vespertilionidés appartenant soit à *Myotis emarginatus*, soit à *Myotis nattereri*, 35 crânes indéterminables recouverts de calcite.

2 chauves-souris à -15 m en juillet et août 1984; indéterminables car dans des fissures de plafond.

X. Inscription à -61 m : S.C.L. 22/4/1967 (au noir de fumée).



- XI. P1 AN (arbre) + AN + dérivation (corde 25 m)
 P2 AN + AN + Spit + Spit (corde 50 m)
 P3 Spit + Spit en dérivation (corde 20)
 P4 Spit + 2 Spits (corde 25 m; passer en vire 5 m sous le premier Spit pour éviter une étroiture sous trémie au bas du puits.

XII. Voir bibliographie in fine.

B. DESCRIPTION DU MATERIEL ET HYPOTHESE SUR LA FORMATION DU GISEMENT

On a vu dans la rubrique A-VIII la détermination du matériel. Celle-ci est due à Daniel ARIAGNO avec l'aide de Jean-Louis ROLANDEZ et du Professeur MEIN; qu'ils soient remerciés ici.

La détermination est difficile du fait de l'enveloppe de calcite qui recouvre la plupart des crânes, jusqu'à les transformer en authentiques perles des cavernes.

Une des caractéristiques des crânes est de présenter tous les degrés d'enrobage calcitique. Ceci nous permet de formuler une explication quant à la genèse du phénomène.

On a vu que la fracture tectonique qui permet de recouper accidentellement la galerie karstique active était pénétrable sur environ 75 m de profondeur.

En fait, cette fracture est une fente de décollement des falaises qui surplombent ici la Cluse des Hopitoux.

L'enfouissement de la cluse a provoqué un appel au vide des falaises et des fissures tectoniques sont apparues parallèlement à celles-ci.

En l'état actuel des connaissances, rien ne permet de dater ces fractures tectoniques.

Plus à l'ouest sur le même massif, une autre fracture tectonique, la Cresse-en-Feu (Serrières-de-Briord) recérait un crâne de lynx qui permettra peut-être de dater ces phénomènes.

Pour l'instant, ce matériel reste en cours d'étude (DROUIN). Sur le diagramme de fracturation, on peut voir les deux axes principaux du réseau, l'axe Nord-Sud représentant la fente de décollement, l'axe Est-Ouest, la partie naturelle.

Actuellement, on peut émettre l'hypothèse suivante sur la formation du gisement de chauves-souris calcitées.

On peut constater d'abord la présence de quatre espèces différentes qui n'ont pas l'habitude de cohabiter.

On peut ensuite avancer l'idée que la première voûte mouillante siphonne périodiquement isolant ainsi le court morceau de galerie qui conduit au siphon terminal. Les chauves-souris qui seraient alors piégées mourraient faute de pouvoir s'alimenter.

Les ossements sont ensuite roulés par les crues dans les gours sous-jacents et se chargent d'une pellicule de calcite.

Les crânes étant plus ou moins calcités, on peut penser que le piège a fonctionné de nombreuses fois.

Malheureusement, rien ne permet de donner un âge au phénomène et on ne peut dire si le fonctionnement est encore actuel.

Au mieux, on ne peut que constater l'évolution entre des ossements sans calcite et de véritables perles de caverne, et cette couverture de calcite n'a pas dû se déposer très rapidement.

Il serait intéressant de savoir si des phénomènes similaires ont déjà été signalés et étudiés.

Philippe DROUIN

BIBLIOGRAPHIE

CHIROL (B.) - 1980 a - *Spéléologie dans l'Ain* (Vénissieux) 1980 (4) : 4-5 (plan d'accès).

CHIROL (B.) - 1980 b - *Spéléologie dans l'Ain* (Vénissieux) 1980 (5) : 26.

CHIROL (B.) - 1983 - *Spéléologie dans l'Ain*; 10^e partie. *Spéleo 01* (Bourg-en-Bresse) 1983 (7) : 15-37 (croquis en coupe du S.C. Lyon).

DROUIN (P.), LAURENT (R.), MEYSSONNIER (M.) - 1977 - Les grandes cavités du département de l'Ain. *Spéologie Dossiers* (Lyon) 1977 (13) : 67 (fiche Balsa).

LAURENT (R.), RIALLAND (A.), GINET (R.) - 1972 - Les cavités naturelles et la faune souterraine de l'Ain. *Bull. Soc. Ecol.*, 1972, t. III, 4, p. 401-412.

LAURENT (R.), RIALLAND (A.), GINET (R.) - 1973 - *Idem. Plaque pour le Parc naturel du Bugey, Ain*, p. 38-50.

JOURNEES INTERNATIONALES DE KARSTOLOGIE
En souvenir de Jean CORBEL
Metz (23-25 mai 1985)



3

KARSTOLOGIE

Précédant le congrès de la F.F.S. à Nancy, et en constituant une de ses tables rondes préliminaires, ce colloque était conjointement une réunion de la Commission des Phénomènes Karstiques et surtout de la Commission on Karst Denudation de l'U.I.S.; sur une cinquantaine de participants, dix pays étaient représentés.

La première séance de travail a été ouverte par le Doyen REITEL et Miss M. SWEETING, 1^{re} présidente de la Commission de l'U.I.S.; et l'hommage dû à Jean CORBEL rendu par Ph. RENAULT (Jean CORBEL et l'évolution des idées sur le karst dans la période 1955-1965) MM. SWEETING (... Son œuvre dans les Iles Britanniques) et R. LAURENT (... sa bibliographie spéléologique et karstologique). Les nombreuses communications avaient été regroupées en 4 thèmes:

1 - La présentation des méthodes de mesure de l'ablation karstique a permis des comparaisons utiles (que U. SAURO a esquissées pour l'Italie):

— mesures *in situ* de divers processus: corrosion des galets (A. KRANJC), élargissement des conduits sous l'action des eaux agressives (C. EK);

— méthode des «plaquettes», choix des sites, influence du sol, situation du milieu hydrique (J. MAZET à la Sainte-Baume) attaque comparée de roches différentes (F. CUCCHI et F. FORTI dans le karst Triestin). Une fois de plus, hélas, le temps a manqué pour une discussion serrée de cette méthode...

2 - Le thème «**Concrétionnement**» animé par C. EK, a été abordé avec la communication charnière de F. CUCCHI et F. FORTI, sur la mesure en une même cavité de la dissolution des parois et de l'accroissement des stalagmites. L'évolution du concrétionnement souterrain dans les grottes de Niaux-Lombrives et Sabart était présentée par M. BAKALOWICZ (note lue par C. EK). Deux interventions jointes concernaient les problèmes des travertins et formations carbonatées d'origine biogénique associées: A. WEISROCK a présenté leurs caractères au Maroc Atlantique, J.P. ADOLPHE l'étude expérimentale de leur croissance par marquage au ¹⁴C.

3 - Le thème «**Genèse du karst**» animé par H. Trimmel, a été orienté vers les évolutions paléokarstiques, dans la région de Verone (G. CORRA) et surtout le horst d'Apricena dans les Pouilles, où des coupes extraordinaires relevées par R. COLAS dans des carrières montrent un paléokarst anté-miocène supérieur totalement plombé, et une évolution karstique pliocène. J. CHEDHOMME, dans des carrières de l'Est parisien, a étudié les caractères des conduits labyrinthiques d'origine phréatique.

4 - Dans le thème «**Bassins karstiques**», on a apprécié les indications fournies sur de nombreux paramètres hydrologiques et hydrochimiques par le petit bassin karstique isolé de Saugras (Languedoc, communication de C. DROGUE) et l'étude des bassins lorrains a été abordée par C. GRIOLET et M. HALLER avec le réservoir karstique de la côte de Delme. Mais faute de temps la présentation des autres bassins karstiques lorrains a été renvoyée sur le terrain... (Notons aussi dans le cadre régional la très intéressante étude de P. FLUCK sur la climatologie des anciennes mines dans les Vosges, qui a permis des comparaisons avec les micro-climats internes du karst).

En conclusion de cette journée d'étude, Miss M. SWEETING a pu dégager les grandes orientations de recherche, en soulignant la variété des thèmes abordés.

5 - Les travaux de terrain ont permis à la plupart des congressistes de découvrir des karsts «ignorés» et pourtant riches en phénomènes intéressants. D'abord le karst des calcaires du Jurassique moyen de la Lorraine du N, avec nos collègues de Metz, M. SARY, P. GAMEZ, J. CORBONNOIS; en surface, les problèmes des «rondvaux» de l'Interfluve Loison Othain, vastes niches nivo-karstiques, et les mardelles très évolutives du bois de Marville, sur le plan hydrologique, tous les problèmes du bassin de la Damusse (en particulier les bouillons du village de Delut et les mesures que le laboratoire du C.E.G.U.M. effectue régulièrement sur le petit cours d'eau).

J. RODET avait tenu à nous présenter le karst de la craie de la montagne de Reims, et c'est par une après-midi radieuse que nous avons atteint la côte champenoise et parcouru la forêt de Verzy, avec des mardelles et mouvements de terrain engendrés par l'évolution des cavités instables dans la craie sous-jacente, comme la visite de la rivière souterraine de Verzy nous en a donné témoignage. L'aspect anthropique du problème, l'extension du réseau de caves à Champagne dans les villages n'a pas été négligé.

Enfin, toujours sous la direction des géographes messins, mais avec la participation de F. LETOUZE, du S.R.A.E. Lorraine, nous ont été présentés au sud de Toul les problèmes du soutirage karstique de l'Aroffe... Encore une victime du combat inégal entre la Moselle et la pauvre Meuse! et les phénomènes si intéressants que constituent les tertres d'Autreville (phreatic mounds) liés à la surface en trouble d'une nappe karstique émergeant lors des orages et les deuilles (inversacs) au voisinage de l'aérodrome d'Ochey.

Que tous les organisateurs qui ont contribué au plein succès de ces journées veuillent bien trouver ici l'expression de la gratitude des karstologues, le président de l'université et le maire de Metz, le Doyen F. REITEL, les enseignants et chercheurs du C.E.G.U.M. (M. SARY, P. GAMEZ, J. CORBONNOIS), les étudiants karstologues qui les ont aidés et accompagnés et J. RODET, directeur de la Commission scientifique de la F.F.S. Nous les remercions aussi pour avoir mené à bien, dans le cadre de Spelunca Mémoires, la publication des Actes.

Qu'il soit permis enfin à l'auteur de ces lignes d'exprimer aussi ses sentiments personnels de gratitude à l'issue d'un Colloque et d'excursions si magnifiquement réussis dans une région où il a pu exercer les premières années de son métier de géographe et de karstologue (notamment dans les grottes de Pierre la Treiche...!)

J. NICOD

LISTE des PARTICIPANTS aux JOURNÉES INTERNATIONALES de KARSTOLOGIE organisées en SOUVENIR de JEAN CORBEL

Université de Metz d'Etudes Géographiques
23, 24 et 25 mai 1985

Organisation : SARY Michel - CORBONNOIS Jeanine - GAMEZ Patrice

Participants :

ABEL Gustave
Spéléologue
Strubergasse 404, Box 4
5020 SALZBURG

ADOLPHE Jean-Pierre
Laboratoire de Géodynamique
des Milieux Continentaux
Tour 1C - 4^e étage - Université
Pierre et Marie Curie
PARIS 5^e Cedex

BURGER Dieter
Geographisches Institut der
Universität zu Köln
Albertus Magnus Platz - 5000 KOLN 41

CHARDON Michel
Institut de Géographie Alpine
Rue Maurice Gignoux
38031 GRENOBLE Cedex

CHEDHOMME Jacques
Géologue
32, rue Pixerecourt - Bât. F
75020 PARIS

COLAS René
Institut de Géologie
1, rue Blessig
57000 STRASBOURG

CORBONNOIS Jeannine
Centre d'Etudes Géographiques
Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

CORRA Giuseppe
Institut de Géographie
Université de VERONE - Italie

CUCCHI Franco
Istituto di Geologia e Paleontologia
Université de TRIESTE - Italie

DECLoux Jean-Pierre
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de METZ - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

DELANNOY Jean-Jacques
Institut de Géographie Alpine
Rue Maurice Gignoux
38031 GRENOBLE Cedex

DE SWART Dick
Jan Lutmastraat 19 C
3711 WL SCHOONHOVEN - Nederland

DE SWART Herman
Coolstraat 56
3312 PT LEIDEN - Nederland

DROGUE Claude
Laboratoire d'Hydrogéologie, USTL
Place E. Bataillon
34060 MONTPELLIER Cedex

EK Camille
Université de Liège
7, place du Vingt Août
4000 LIEGE - Belgique

EKARD Jasmine
111, rue de Reuilly
75012 PARIS

FLUCK Pierre
66, rue Saint-Fiacre
67000 STRASBOURG

GALDENZI Sandro
Via Maratta 10
60035 JESI (AN) - Italie

GAMEZ Patrice
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

GRIOLET Claude
SRAE Lorraine
4, rue Wilson - 57000 METZ

GULDALI Nuri
MTA Genel Direktörlüğü
ANKARA - Turquie

HALLER Michel
SRAE Lorraine
4, rue Wilson - 57000 METZ

KRANJC Andrej
IZRK, ZRC Sazu - Titov TRG 2
66230 POSTOJNA - Yougoslavie

LAURENT Roger
Université de Lyon I
Hydrobiologie souterraine
43, bd du 11 Novembre 1918
69622 VILLEURBANNE

LETOUZE François
SRAE Lorraine - 4, rue Wilson
57000 METZ



Excursion sur l'interfluve Loison-Othain : de gauche à droite MM
TRIMMEL (Sec. général de l'UIS) - ABEL (Membre d'honneur de la FFS) - MAIRE
(Vice-Président FFS) - PALOC (BRGM) - RODET (CNRS) - UGARTE. (Cliché R. LAURENT)

(Cliché R. LAURENT)

MAIRE Richard
Le Four Verchaix
74440 TANINGES

MARTIN Philippe
Laboratoire de Géographie Physique
29, avenue R. Schuman
13621 AIX-EN-PROVENCE

MAZET Jean
Laboratoire de Géographie Physique
29, avenue R. Schuman
13621 AIX-EN-PROVENCE

MEDDAHI Danielle
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

MORETAU Guy Pierre
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

NICOD Jean
Institut de Géographie
29, avenue Robert Schuman
13621 AIX-EN-PROVENCE

PALOC Henri
B.R.G.M. 94, rue de la Pépinière
34000 MONTPELLIER

REITEL François
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

RENAULT Philippe
7, rue Jamen Grand
69300 CALUIRE

RODET Joël
14, rue de Lausanne
76000 ROUEN

SAINT-DIZIER Claude
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

SAINT-PE Michel
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

SARY Michel
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

SAURO Ugo
Dipartimento di Geografia
Via del Santo 26
35100 PADOVA - Italie

SAYARET Danielle
17, rue Louis Philippe
76600 LE HAVRE

SLAGMOLEN André
Rue Ad Marbotin 113
B 1030 BRUXELLES - Belgique

SWEETING Marjorie
School of Geography
MANSFIELD RD - OXFORD - England

TRIMMEL Hubert
Union Internationale de Spéléologie
Draschestrasse 77
1232 WIEN - Autriche

UGARTE Félix
S C Aranzadi, Museo Santelmo
DONOSTIA / SAN SEBASTIAN - Spain

VAUDOUR Jean
Institut de Géographie
29, rue R. Schuman
13621 AIX-EN-PROVENCE

WEISROCK André
Université du Maine, Faculté des Lettres
72017 LE MANS

WILD Catherine
Centre d'Etudes Géographiques de
l'Université de Metz - Ile du Saulcy
57045 METZ Cedex

ZUMSTEIN Jean-François
Agence de l'Eau Rhin Meuse
57160 MOULINS LES METZ



J. MAZET



J. NICOD - R. MAIRE - MM. SWEETING

JEAN CORBEL (1920-1970) ET L'EVOLUTION DES IDEES SUR LE KARST AU COURS DE LA PERIODE 1955-1965

Philippe RENAULT
7, rue Jamen Grand
69300 CALUIRE

Indépendamment de l'hommage qui doit être rendu à un chercheur de pointe, sa biographie nous apporte à la fois un témoignage sur une époque de tâtonnements et, en outre, possède une signification épistémologique qui doit être analysée du point de vue de cette discipline. Dans le cadre de la karstologie, Jean Corbel, explorateur nordique et souterrain, géographe lyonnais, occupe sur le plan international, une position maîtresse au cours de la période 1955-1965.

Dans l'ambiance de l'après-guerre, la karstologie a vécu la révolution, au sens de Th. Kuhn, qui a renouvelé alors les disciplines scientifiques. J. C. a participé à ce mouvement, en fonction de son environnement familial et régional, et avec sa personnalité exceptionnelle.

Sa biographie permet de comprendre certains aspects de sa carrière. Celle-ci, replacée dans l'ambiance scientifique de l'après-guerre, montre son rôle dans la «révolution», au sens de Thomas S. KUHN, qui, à cette époque, a touché toutes les disciplines, sans oublier la karstologie.

Actuellement, les générations se sont renouvelées, les mentalités ont évolué. L'époque est venue de tenter une définition de la place de Jean Corbel dans le mouvement karstologique d'après-guerre.

I. SA BIOGRAPHIE

Jean Corbel est né le 8 février 1920, à Dombasle-en-Bresse, près de Lyon, d'une mère bressane et d'un père breton, d'où peut-être son besoin invétéré de parcourir le monde. Son goût de la nature était en tout cas marqué très tôt et, à 18 ans, il avait déjà fait le tour de France à bicyclette avec un passage en Italie.

En 1939, alors qu'il est en Angleterre pour un séjour linguistique, il rencontre Mlle Collard, belge, de mère anglaise et un peu irlandaise. Puis c'est la guerre de 1940. A la même époque, J. C. effectue son service militaire dans les chasseurs alpins. Après quelques semaines d'instruction, les recrues sont envoyées vers le front, en pleine débâcle. J. C. est fait prisonnier à La Rochelle, puis s'évade au cours d'un transfert et revient à Lyon. Après divers avatars, il se marie avec Mlle Collard en 1941 et les jeunes époux s'installent à Caluire.

Ce sera le début d'une collaboration qui fonde en partie l'œuvre de J. C. Lorsqu'il voyage, elle assure la permanence, reçoit les collègues; elle dessinera les figures de sa thèse. Ancienne professeur de l'enseignement technique belge, sa formation universitaire lui permet de discuter avec son mari lorsque des problèmes théoriques se posent. Elle s'occupera des problèmes pratiques et administratifs soulevés par la bureaucratie du

C.N.R.S., lors des grandes expéditions, et Dieu sait si la complication des règlements limite l'action d'un chercheur original. Mme Corbel apprend à connaître cette administration et résoud les difficultés. Et surtout une partie de la famille de Mlle Collard est anglaise, ce qui multiplie les ouvertures offertes à J. C. vers la Grande-Bretagne.

Professionnellement, il était élève à l'Ecole Normale d'Instituteurs avant 1939. En 1942, il peut s'inscrire à la Faculté des Lettres, sur un poste d'Instituteur, et suit les cours des Professeurs Alix et Gibert. Mme Corbel le remplace lorsqu'il est retenu en classe par son enseignement. En 1945, la guerre est finie, il prend ses vacances en Belgique, pratique la spéléologie, fait une première et publie la description de la grotte de Hierges. Sa vocation de géographe et de spéléologue s'affirme vers cette époque, alimentée par ses souvenirs de voyage et guidée par les Professeurs Alix et Gibert.

Il termine ses études universitaires, avec en particulier un certificat d'Ethnologie, passé avec le Professeur Leroi-Gourhan. Sur le plan professionnel, il met au point une méthode d'enseignement de la géographie dans son école, avec apprentissage simultané des méthodes de moulage de plans en relief.

De 1947 à 1950, ayant choisi sa discipline, il voyage en France — dans les Alpes, surtout le Vercors, le Jura, l'Ardèche —, et aussi en Hollande, Angleterre, Irlande, ainsi qu'au Danemark, dans un but principalement ethnologique. Il se décide pour un sujet de thèse, suffisamment original pour être considéré avec méfiance à cette époque : «**les karstifications en zones climatiques froides en Europe**».

Alors commence la période des voyages vers le Nord de l'Europe, orientés vers la réalisation d'un inventaire des Karsts «froids» et l'identification des mécanismes morphogénétiques qui leur sont propres. Il travaille sans subvention, se déplaçant sac au dos et se faisant héberger par des amis, qui sont nombreux.

En 1951 et 1952, avec C.L. Railton, il effectue un voyage en Scandinavie et un autre en Belgique. A cette époque, se précise son idée de l'agressivité souterraine des eaux froides, en étudiant les rapports altimétriques.

Lors du Congrès International de Géographie de Stockholm, en 1960, J. C. est délégué français auprès de la Commission Internationale des Phénomènes karstiques. Sa connaissance des langues étrangères le prédisposait à cette fonction. En 1960, il participe au Colloque du Quaternaire, à Wurtzbourg et au Symposium International sur les «**Remplissages naturels des Grottes**», à Varenna (Italie), remarquablement organisé par Salvatore Dell'Oca et les «**Rassegna Speleologica Italiana**». Ce symposium rassemble l'élite de la

karstologie européenne et lui permet de présenter sa théorie de la dissolution en région froide.

Mais il se consacre principalement aux voyages. En 1959, expédition en Laponie, avec un camion CNRS, ce qui, en même temps, l'initie à de nouveaux problèmes administratifs. Il en profite pour retourner au Spitsberg. En 1960, séjour d'une année dans l'Arizona, lui permettant de visiter les grandes cavités américaines — Carlsbad, Mammoth Cave, etc. —, et de parcourir le Mexique; il enchaîne en Europe du Nord, Pologne, Finlande, URSS.

Après un raid en Yougoslavie, en 1962, il se consacre aux Grandes Expéditions Géographiques du C.N.R.S., au Spitsberg, de 1963 à 1967, elles s'étofferont avec l'achat d'un bateau assurant la liaison avec le continent et la mise en place d'une station permanente sur le plateau. Simultanément il monte à Lyon la base-laboratoire de Collonges, à la fois entrepôt et centre de recherche. Pour donner une idée de l'importance de l'entreprise, signalons qu'en 1966, l'expédition regroupait 36 participants de toutes les disciplines. La même année, il conduit une mini-expédition, seulement 3 personnes, à Porto-Rico (Jamaïque), pour étudier le problème des karstifications en zone tropicale, d'un point de vue chimique.

En 1967, la base française du Spitsberg est fermée. Il est prévu que le Laboratoire de Collonges, héritage des Grandes expéditions au Spitzberg, sera maintenu dans le cadre d'une Equipe de Recherche Associée au CNRS.

L'année suivante, importante campagne dans le Caucase, avec une équipe de Tiffis bénéficiant des gros moyens (hélicoptère, etc.), mis à sa disposition par un directeur d'Institut, membre du bureau politique. Ensuite, il effectue une mission en Amérique Centrale (Jamaïque, Cuba, Mexique), conclusion de l'expédition 1966-67. Et en 1969, passage au Maroc et en Algérie, puis retour en Pologne.

En 1970, avant d'entreprendre une tournée de dosages en Espagne, il fait halte au Laboratoire de Moulis, pour me demander de venir rejoindre l'équipe lyonnaise qu'il constitue à Collonges. L'opération est difficile en raison de la rigidité administrative du C.N.R.S. Le 22 février 1970, son véhicule sort de la route et il mourra écrasé par la carrosserie.

Avec l'accord de la direction du C.N.R.S., il était prévu que le Laboratoire de Collonges deviendrait annexe du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Lyon I. Sur ces entrefaites, le C.N.R.S. décidait l'élimination des petits «laboratoires fantômes», constitués en utilisant la loi 1901 sur les associations. Le matériel subsistant des Grandes expéditions Spitsberg fut alors dispersé entre les Laboratoires de Glaciologie de Grenoble, et de Géographie et Géologie de Lyon.

Au terme de cette chronologie il faut noter la puissance de travail de J. C., réalisant son objectif, malgré les obstacles rencontrés, les pires n'étant pas de nature géographique. Il bénéficiait peut-être d'un environnement familial et amical exceptionnel, de même que géographique, la région lyonnaise étant remarquablement équipée en laboratoires, bibliothèques, etc. C'est également l'une des premières régions spéléologiques de France, par le nombre des spéléologues aussi bien que par la variété des karsts offerts au chercheur dans un rayon de 250 km.

Sur le plan humain, en dehors d'une culture générale, très diversifiée, internationale, il possédait le «don des langues» — il en parlait couramment trois et s'exprimait approximativement en deux ou trois autres —, ce qui constituait un atout précieux en dehors de nos frontières. Il savait aussi bien rassembler des équipes, soudées autour d'un but commun, que conserver des rapports cordiaux avec les adversaires suscités par le caractère original de ses idées.

Pour le situer sur le plan scientifique, évoquons d'abord le climat scientifique des études de grottes entre 1950 et 1970.

II. LES SCIENCES DU KARST LORS DE L'APRES-GUERRE

La **préhistoire** apprend à fouiller avec A. Leroi-Gourgan, à Arcy-sur-Cure, découvre le mécanisme sédimentologique des soutirages avec L. Méroc, à Montmaurin (Haute-Garonne), et constate la fragilité des peintures pariétales, avec la maladie verte affectant les figurations de la grotte de Lascaux en 1960.

Suivant une suggestion de R. Jeannel, le C.N.R.S. construit le «temple» de la **biospéologie** à Moulis (Ariège), qui édite les «**Annales de Spéléologie**» à partir de 1959, et qui va vivre le passage d'une biospéologie descriptive, de systématiciens, à une écologie souterraine.

La **karstologie**, science du karst, se situe à l'intersection des actions géographiques, spéléologiques et géologiques, relevant de méthodologies différentes.

La **géographie physique**, en Faculté des Lettres, enseigne les conceptions de J. Cvijic et de E.-A. Martel, principalement par l'intermédiaire du **Traité de Géographie Physique** d'Emmanuel de Martonne, réédité de 1909 à 1940 (6^e éd.), le dernier esquissant une géomorphologie climatique. La thèse de G. Chabot, «**Les Plateaux du Jura Central**», 1927, associe une interprétation morphotectonique du paysage à une étude karstologique (le tiers de l'ouvrage) avec 20 pages, consacrées aux phénomènes souterrains, résumant l'œuvre spéléologique de E. Fournier. D'autres, plus tardives, seraient à citer, Clozier, 1940, **karst du Quercy**, Goron, 1941, Pyrénées Centrales, etc. Pour ces derniers, l'endokarst demeure un phénomène accessoire. C. Chabot demeure le grand précurseur de la karstologie à venir.

La **spéléologie** est toujours sous l'influence de la pensée de E.-A. Martel, revue et allégée par R. de Joly; les données de la spéléologie scientifique, admises à l'époque se trouvent résumées dans «L'état actuel» de R. de Joly, présenté au 1^{er} Congrès National de Spéléologie, Mazamet, 1939. Dès 1946, la spéléologie qui, jusqu'alors, se présentait dans l'esprit d'une société savante, avec sections locales, se réorganise en fédération de groupes sportifs, au sein du Comité National de Spéléologie, qui deviendra la Fédération Française de Spéléologie, en 1963, et, tout en parlant de «Spéléologie, science et sport», s'orientera de plus en plus vers le record spéléologique, appuyée par les mass-médias. S'il faut regretter ce statut propre à la spéléologie française,

constatons que cette évolution se traduira par des acquis géographiques importants: prise de conscience de la notion de grand réseau, avec les explorations du Trou du Glaz (1943), de Padirac (1950), du Gouffre Berger (1954), etc., ainsi que de l'importance du réseau noyé, Vaucluse (1946), etc. En outre, la réalisation d'un inventaire spéléologique de la France fut tenté dès 1946. Pratiquement celui-ci n'a commencé à devenir effectif que vers 1970.

Les **géologues** français, d'une façon générale, considèrent le phénomène karstique comme une curiosité naturelle favorisant certaines activités sportives, parfois utilisables pour étoffer un dossier technique, mais le phénomène karstique n'est pas considéré comme justifiant une étude particulière. Quelques géologues pratiquent la spéléologie comme sport et en tentent de comprendre le phénomène. Les grands travaux vont conduire à étudier ce problème. Certaines difficultés compliquant la réalisation des grands ouvrages de génie civil, sont expliquées par la présence de structures karstiques. Quelques géologues ont nuancé leurs opinions. J. Crosnier-Leconte, directeur du Service Géologique de la Direction de l'Équipement de l'E.D.F., ainsi que ses successeurs, C. Bordet et R. Théron, ont engagé des études karstiques, parfois très poussées, pour résoudre les problèmes d'étanchéité posés par certaines retenues. J. Bourcart, surtout océanographe, mais de vaste culture, — connaissant les karsts yougoslaves et la littérature américaine (Davis, 1930, Bretz, 1943, etc) —, m'encourageait, en 1948, à faire un travail de karstologie, de même que P. Pruvost, autre grand nom de la géologie française d'après-guerre, professeur à l'Université de Lille. Un petit groupe de géologues, tous spéléologues et intéressés par l'étude du karst se retrouvent au sein de la Commission de Spéléologie du C.N.R.S., ou bien au Comité National de Spéléologie. Citons B. Gèze, R. Ciry, H. Tintant, Ph. Renault.

Il existe donc une association spéléologues-géologues, comme le notait P. Fénelon, en 1964, dans un rapport au Comité National de Géographie. Il faut préciser sa nature très particulière. Dans le cadre de la spéléologie, plusieurs chimistes et physiciens explorent et, simultanément, étudient les cavités visitées. P. Chevalier, à partir de 1947, fait connaître son interprétation de la formation du Trou du Glaz (Isère), et retrouve, sans l'avoir lu, les principaux termes de la classification spéléo-génétique de G. Kyrle (1923). La même année, F. Trombe entreprend l'importante expédition de la Henne-Morte une campagne de mesures atmosphériques (T° C, CO₂, ionisation) en caverne. Le **Traité de Spéléologie** de F. Trombe, paru en 1952, conclut cette époque et apporte un document de synthèse, inexistant jusqu'alors.

En 1953, sous la direction de B. Gèze, le Premier Congrès International de Spéléologie est réalisé à Paris, à l'initiative des principaux organismes spéléologiques: Comité National de Spéléologie, Commission de Spéléologie du C.N.R.S., etc. Aucun géographe ne s'est inscrit, mais dans les années suivantes, la Commission des Phénomènes Karstiques du Comité National de Géographie s'affirmera en tant qu'organisme interdisciplinaire, suppléant comme tel aux lacunes des institutions.

Ce tableau est à considérer en fonction d'un cloisonnement double, propre à la France.

D'une part, il faut tenir compte d'un héritage cartésien, puis positiviste, qui s'oppose au romantisme germanique, les guerres de 1870 et de 1914 ayant accentué cette tendance. La lecture des ouvrages de E.-A. Martel est très démonstrative à cet égard, les U.S.A.

étant d'ailleurs englobés dans cette réprobation. En 1950, par exemple, une analyse d'ouvrage résume l'interprétation proposée en parlant de «théorie américaine», avec, semble-t-il, une nuance péjorative.

Par ailleurs, la rigidité administrative française établit entre Faculté des Lettres et Faculté des Sciences une coupure dont souffre particulièrement la géographie, science qui couvre à la fois le domaine des géologues, des sociologues et des historiens. Lucien Febvre, dans «**La Terre et l'Évolution humaine**» (1922, réimp. A. Michel, 1970, p. 67) esquisse une analyse des rapports entre géologues et géographes, exagérément humains à la fin du XIX^e s. Sans insister, disons que le corporatisme, inhérent à tout corps constitué, est toujours prêt à se manifester. Quelques maladroites et incompréhensions, datant de la fin du XIX^e siècle, ont accentué cette opposition, parfois un peu sectaire. Elle n'est pas générale. Un grand géologue, aux remarques parfois caustiques, L. Glangeaud, alors qu'avec M. Dreyfuss, il effectuait l'étude morphotectonique du Jura, rendait hommage à G. Chabot, géographe et précurseur en ce domaine.

III. LA PERSONNALITÉ SCIENTIFIQUE DE JEAN CORBEL

Le (vrai) chercheur commence par être séduit par un sujet. Il apprend à travailler, met en place sa logistique personnelle — moyens, relations, etc. —, explore son domaine. Il sera obligé d'inventer, — échouera parfois et corrigera sa trajectoire —, d'accumuler les données, de synthétiser et finalement de faire connaître ses travaux. Au fil des années, les conceptions s'affinent et, dans le domaine géographique, les particularités régionales, ayant influencé les premières conceptions du débutant, sont remises à leur vraie place.

Cette évolution est conditionnée par l'**environnement initial**, celui de l'adolescence, des maîtres rencontrés, des premiers apprentissages et par sa personnalité, apte à s'adapter aux circonstances qui l'ont conduit à mettre au point une **logistique** personnelle conçue en fonction d'un **objectif** théorique.

De la jeunesse de J. C. nous retiendrons la facilité des contacts avec la nature proche ou lointaine, aussi bien que ses aptitudes linguistiques et une éducation le poussant vers la géographie, le besoin de comprendre. A l'Université, la qualité des maîtres rencontrés, au fait des nouveaux courants d'idées, et notamment des particularités de la géomorphologie climatique, l'aide à préciser son objectif.

Instituteur, il fait cet irremplaçable apprentissage du contact avec de jeunes esprits, à la fois en régime d'attente et récalcitrants. Beaucoup d'excellents universitaires de cette époque débutèrent dans l'enseignement comme instituteurs. Citons G. Viers (Toulouse) par exemple. Dans la même foulée, en tant que spéléologue, il fréquente l'administration Jeunesse et Sport, Ch. Schaffran en particulier, et ceci l'orienta vers la spéléologie.

Sa logistique personnelle se met en place à partir de Lyon, ville-carrefour proche des karsts du Jura, des Alpes et de l'Ardèche. Les relations familiales facilitent les premiers contacts internationaux au cours de cette période d'après-guerre. Plus tard sa maison de Caluire, et l'assistance de son épouse, faciliteront ses multiples voyages en assurant la permanence de son adresse postale et les réponses au courrier, et permettront la mise en place de la RCP Grandes Expéditions et de l'ERA lui faisant suite.

Cette logistique reposait aussi sur une conception pluridisciplinaire de l'équipe. La formation géographique de l'époque reposait sur

un enseignement historico-géographique désavantageant les géomorphologistes, ne bénéficiant que d'un enseignement géographique réduit à une demi-année scolaire, apportant un enseignement de qualité, actualisé, mais dépourvu de ces éléments physico-chimiques qui, dès cette époque, s'avéraient indispensables aux naturalistes.

Autodidacte en ce domaine, il recherche l'interdisciplinarité dans ses équipes. Je pense que R. et T. Muxart, G. Gallo, moi-même, lui avons apporté notre expérience de chimistes, de géologue, de même que lui-même nous faisait profiter de sa connaissance du monde. Il est ainsi passé de l'évaluation électro-chimique pH-r, ayant valeur indicative, à l'analyse chimique nécessitant une base laboratoire, mais conduisant à des bilans chimiques, c'est-à-dire à l'étude des processus mis en évidence.

Cet aboutissement correspond à l'objectif que s'est fixé J. C., qui dès 1950, adhère aux thèses géomorphoclimatiques de A. Cholley et A. Cailleux. L'intérêt suscité par les phénomènes périglaciaires et sa pratique des phénomènes karstiques le conduisent à étudier les régions karstiques du Nord froid de l'Europe. Reprenant l'idée, exprimée, semble-t-il, pour la première fois par Cosyns en 1908, d'une vitesse d'ablation déduite du volume de produits exportés, il associe cette étude quantitative à l'étude morphologique et systématise la méthode à partir de 1964.

Deux pages de sa thèse (1957) présentent le corollaire de l'hypothèse de la corrosion froide : dans les pays équatoriaux, la vitesse d'ablation chimique serait réduite mais compensée par la durée des actions chimiques. Ce point de vue fut immédiatement controversé. J. C. suscite une réunion de l'Association des Géographes Français en 1959, non déterminante en raison du manque de données et, vers 1961 ou 1962, envisage une première mission dans les karsts du Tonkin, avec R. Muxart et moi-même, pour examiner la question. La situation politique en Extrême-Orient empêche cette expédition, mais deux autres furent réalisées, à la Jamaïque et à Porto-Rico, en 1965-66 et en 1967, avec P. Birot et R. Muxart, aboutissant à une conclusion systématique, qui n'a malheureusement pas été développée.

Ce travail d'une vie a été l'un des éléments majeurs de la révolution karstologique d'après-guerre, probablement mal perçue par les jeunes chercheurs actuels.

Tout d'abord il a appris aux Français de l'époque 1950-60 à regarder au-delà des frontières européennes. Dans sa première publication, en 1947, J. C. donne, en bibliographie, les classiques karstologiques de l'époque, c'est-à-dire de Martonne, Martel, Chevalier. En 1959, A. Blanc, en publiant son mémoire sur «...études de relief karstique en Yougoslavie depuis Jovan Cvijic», révélait une littérature, linguistiquement inaccessible pour le plus grand nombre.

Entre temps, J. C. et quelques autres ont fait connaître les travaux de l'école anglo-saxonne qui a fondé la spéléogénèse.

Dans un autre domaine, J. C. constate que la France, malgré l'importance de ses karsts, ne dispose pas, en 1950, d'un Institut du Karst, tel qu'en Yougoslavie, Italie, Roumanie, Autriche, etc. En 1953 sera ouvert un laboratoire de Biospéologie à Moulis (Ariège), qui en 1959 accueillera un géologue, mais son isolement et sa position excentrée, sa spécialisation, limitent ses possibilités. J. C. étudie la mise sur pied d'un «Centre d'Etudes Supérieures de Karstologie» dans la vallée du Rhône en recherchant, vers 1964, une implantation à Vaillon Pont d'Arc. A partir de 1968, le laboratoire de Collonges remplira cette fonction avec des moyens très réduits. Actuellement, sous la direction de J. Nicod, l'U.A. 903 du C.N.R.S. (ex E.R.A. 282) «Karsts et géosystè-

mes karstiques dans les domaines méditerranéen et alpin», étudie les karsts de haute montagne, avec de jeunes spéléo-karstologues participant aux grandes expéditions lointaines.

Enfin, et c'est peut-être le plus important, il participe activement au renouvellement des concepts fondamentaux de la karstologie. A la Libération, c'est-à-dire vers 1945-1950, les idées de Martel imprégnaient les «géospéléologues». Elles correspondent approximativement à une négation des idées «germaniques» de Grund. Nous en retiendrons trois : — il n'y a pas de nappes dans les calcaires, mais des rivières souterraines en conduits à sol étanche, développés à des niveaux différents ;

— la corrosion se développe surtout dans la partie supérieure du karst, le façonnement en profondeur des galeries résultant surtout de l'action mécanique des eaux courantes ; une note de P. Chevalier au 1^{er} Congrès International de Spéléologie, à Paris, en 1953, semblera confirmer ce point de vue ; — la ventilation des galeries, continue ou saisonnière, assure le renouvellement de l'air souterrain. La présence des hautes teneurs en CO₂ est exceptionnelle.

Or, la multiplication des groupes spéléologiques d'après-guerre entraîne la découverte de grands réseaux. Après le Trou du Glaz (1943), Padirac (1947), le Gouffre Berger (1954) montrent la réalité d'un vaste domaine souterrain accessible à l'homme. Ce qui est important car la complexité des dispositions de galeries observées conduit à envisager un milieu irréductible au modèle monocyclique de la rivière souterraine. Simultanément, les hydrogéologues montrent l'existence, en pays karstique, de réservoirs à faible perméabilité, assimilables aux réseaux de fentes des biospéologues (Renault, 1959, Schoeller, 1965, Jeannel, 1943). Les chimistes rappellent les lois réglant l'équilibre du système CO₂-CaCO₃-H₂O (Trombe, 1952). H. Roques, en 1956, montre l'existence de gradients des pCO₂ dans le sous-sol des karsts.

En raison du cloisonnement des spécialités, ces informations passent mal d'une spécialité à l'autre, et leur portée théorique ne peut être perçue en l'absence d'une conception générale du karst adaptée aux nouveaux moyens de recherche. Dans cette ambiance, J. C., non seulement apporte des idées nouvelles mais, dans la foulée, suscite des rencontres et des discussions. Ses conceptions, parfois poussées très loin dans leur généralisation, heurtent, mais conduisent à une réflexion dont tous profitent.

Il suscite des réunions spécialisées sur le karst. A l'A.G.F., (Association des Géographes Français), en 1959, puis dans le cadre des Commissions des Phénomènes Karstiques. Hors frontière, les karstologues de diverses spécialités s'affrontent, lors du Colloque de Varenna, en 1961. La même année, ils se retrouvent au 3^e Congrès International de Vienne (Autriche) où les discussions continuent.

Au centre de ces discussions, la théorie de la prépondérance des actions froides qui, présentée comme un mécanisme simple était peu convaincante. En fait elle contenait en germe les éléments d'une théorie du système karstique, qui n'arrive pas à se définir, en 1950-1960, en raison du manque de données et de l'imprécision du vocabulaire.

En exergue à sa première note, J. C. place une citation de E.-A. Martel : «Il y a dans tout cela des phénomènes de capillarité et de mise en charge qui sont loin d'être éclaircis» (1921), exprimant son intuition d'un problème qu'il ne pouvait poser, prisonnier d'une conception monocyclique trop simple et ne disposant pas d'un volume suffisant de données.

Trente ans après Martel, J. C. a profité d'un succès important de la science géomorpholo-

gique, et de la prise en considération du facteur climatique. Rappelons que, en 1929, F. Blondel, chef du Service Géologique de l'Indochine, après avoir décrit deux types de karsts «en cuvettes fermées» et «en pitons isolés», concluait : Ces «phénomènes karstiques ne présentent aucun trait spécial qui permette d'être attribué au climat tropical». Entre temps la karstologie germanique met en valeur les travaux de K. Terzaghi, Hongrois, qui insiste sur le rôle de la végétation dans les karstifications tropicales. H. Lehmann est le spécialiste des karsts intertropicaux depuis 1936.

En 1970, lors de sa mort, J. C. avait 50 ans. C'est l'époque du bilan. La base du Spitsberg étant fermée, il comptait étendre ses recherches vers le Sud, toujours dans le sens d'une évaluation quantitative de l'ablation, étendues à l'ensemble du globe.

En 1985, il est possible de situer la place occupée par J. C. dans la science karstologique d'après guerre. Quelques repères chronologiques faciliteront cette analyse : 1957, la thèse de J. C. révèle à un large public l'existence des karsts froids ; 1965-75, plusieurs thèses apportent les données quantitatives «de laboratoire» ou un cadre géodynamique, nécessaires pour exploiter les observations directes. Une définition de la notion de système karstique était en germe dès 1960 et, au cours du Colloque de Varenna, la même année, les échanges de vues conduisent à en fixer les éléments. Dans ce mouvement, J. C. fut un initiateur.

A la fois spéléologue, montagnard, explorateur, géomorphologiste, il a introduit la spéléologie dans la géographie française. Auparavant, le géographe exploitait, comme G. Chabot, les documents transmis par les spéléologues. Avec J. C., il étudie le paysage aérien et souterrain. Il fut l'initiateur, en France, et probablement en Europe, de l'étude quantitative de l'ablation, reprise par de nombreux chercheurs. Citons l'un de ses amis, M. Pulina, en Pologne. Ses études de géomorphologie climatique des zones froides en font le pionnier de l'étude des régions calcaires nordiques et d'altitude. Il importait de le rap-

peler. Dans la période d'après-guerre, la théorie du karst s'est rapidement précisée, lors des nombreuses réunions d'après-guerre regroupant les principaux karstologues européens. Parmi ceux-ci, J. C., avec son renom de voyageur nordique, ses hypothèses reposant sur l'observation des karsts froids, son dynamisme personnel, a joué un rôle déterminant dans l'évolution des idées.

Cet exposé, forcément limité, néglige certains aspects de l'œuvre de J. C., qui seront analysés dans une autre note.

Remercions Mme Corbel qui nous a livré ses souvenirs et ouvert ses archives.

Philippe RENAULT

BIBLIOGRAPHIE

Pour la bibliographie exhaustive des publications de J. C., renvoyons à l'article de Roger Laurent dans le même fascicule.

Par ailleurs, citons les ouvrages suivants, mentionnés dans le texte ou complétant celui-ci :

BLANC (A.) - 1959 - Répertoire bibliographique critique des études de relief karstique en Yougoslavie depuis Jovan Cvijic. *Mém. et Doc. du Centre de Doc. Cartogr. et Géogr.*, t. VI, p. 135-227.

DRESCH (J.) - 1984 - Géographie d'hier et d'aujourd'hui. *La Pensée*, n° 239, p. 9-20.

FEBVRE (L.) - 1922 - *La terre et l'évolution humaine*. Coll. «L'évolution de l'humanité», rééd. A. Michel, 1970, 444 p.

NICOD (J.) - 1972 - *Pays et paysages du calcaire*. P.U.F., 244 p.

THE WORK OF JEAN CORBEL IN THE BRITISH ISLES

M. M. SWEETING

School of geography, Oxford University
Mansfield Road, OXFORD GREAT-BRITAIN

Jean Corbel and myself were of similar age: by coincidence we were both occupied with our doctorates at about the same time — Corbel working at Lyon, myself at Cambridge. It was not until after the war that both of us were able to pursue full-time work on our own chosen field of karst geomorphology. Neither in Britain nor in France had modern ideas and techniques then been applied to karst studies — though this was not so true of Germany where Herbert Lehmann had already introduced ideas of climatic geomorphology from his studies in Java.

Jean Corbel was trained in the Alpine School of Physical Geography at Grenoble — in attitudes very different from the schools in Paris and also in England. He was also working alongside a lively resurgence of post-war French geography, which included geographers such as Pierre Birot, Jean Tricart, Paul Marres and André Guilcher. Geomorphologists in Britain just after the war were still under the influence of the «platform» school — developed through the influence of Davis, Wooldridge and Henri Baulig.

Jean Corbel's doctorate thesis (on *Les Karst du N.W. de l'Europe*) burst upon the British scene in the late 1950s, though by then he was well known to British geomorphologists. For his thesis he has visited every limestone region in the British Isles — which was quite a feat as some of the areas were very difficult to get to. 115 pages of his thesis are concerned with the British Isles. He was well equipped to work in Britain — his mother was of English extraction and his English was very fluent. He knew a great number of speleologists and geographers in Britain and was always welcome in their homes. He was a frequent visitor both to meetings and to the field excursions and caving meetings. He published letters and articles in both English and French in our journals and particularly in the transactions of the newly formed Cave Research Group. He was a good speleologist. In this regard, he worked closely with M. Gordon Warwick, who died last year.

It can be said that Jean Corbel's work was inaccurate and hasty; that it was largely the result of what in English is called a «hunch» (or presentiment) and that he lacked the application to develop his work in a scholarly manner. He was, however, the first person to attempt to look at relative erosion rates of limestones (and other rocks) on a world-wide climatic basis, and he was the first to apply these techniques to Britain. His map of the *bilan de l'érosion karstique* of limestones in the British Isles was admittedly very rough, but was based on experiments at almost every possible limestone location and gives a tolerably accurate assessment of calcareous erosion in Britain. Because the vegetational differences in the British Isles are relatively small, the errors caused by Corbel's neglecting carbon dioxide as a factor in limestone erosion rates, are minimised.

It has been left to later and more careful workers to develop more exact and long-term experiments, to illustrate the reasons for the differences in erosion rates that Corbel presumed and called attention to.

Corbel made apt and pertinent observations about all the areas in Britain that he visi-

ted. I can only select some of the many points that he made. In N.W. Yorkshire — a region with which I am very familiar, particularly as applied to Ingleborough — he recognized two important factors in the karst evolution:

1. the effects of recent tectonic uplift along the Craven Faults, which caused the block-like nature of the relief and gave rise to the strongly vertical erosion;

2. the effects of the recent glaciation during which time Ingleborough resembled Svartisen in Norway or a Lapland plateau. These two main factors were correctly stressed by Corbel in his assessment of the formation of one of the most important areas of karst phenomena in Northern Europe. In the Mendip area, on the other hand, he recognized the importance of frost action and periglaciation during former cold periods, in forming the present day landforms; in particular, this idea was applied to the origin of Cheddar Gorge — and has subsequently been developed by Professor Derek Ford. Some of his most important observations were made in Ireland where he was the first modern geomorphologist to call attention to the karstic features. Both in the North and the South he saw the climatic implications and effects of the Quaternary ice cover and periglaciation; he stressed also the influence of modern processes, in particular the amount of chemical dissolution caused by peaty vegetation. He paid particular attention to the Marble Arch area (explored first by Martel) and to the Burren of Clare.

He also worked in both Wales and Scotland. In South Wales he recognized the unique importance of the karst features along the northern edge of the coalfield — ranking that area as one of the most important in Britain. In Scotland, he visited areas which few karst geomorphologists have seen; in particular, he made observations of karstic dissolution on Lismore — an island of dolomitic limestone in Loch Linnhe — which is very difficult of access. These are examples of Jean Corbel's perspicacity and unbounded energy. He was very quick to notice changes in the landscape, though his interpretations could be erroneous. In England he saw and referred to the differences between the Central and West Mendips in the South. In both cases, he thought the contrasts were between an essentially new and glacial (or periglacial) karst and an ancient and possibly sub-tropical karst.

These ideas have not yet been proved and in the Morecambe Bay area are likely to be incorrect. He tended to interpret differences in the karst landforms in terms of climatic history rather than geological history. This tendency is especially seen in the sections of his thesis dealing with the more ancient forms of the Southern Irish karst and with his interpretation of the karst in central England in Derbyshire. For my part, I think Corbel's intuitive conclusions are to some extent right, but the problems are by no means as simple and clear cut as he thought.

His interpretation of the geological structure of an area was coloured by his Grenoble and Alpine background. He tended to see the effects of recent tectonic movements and faulting in scarps and most cliff-lines. Though in some areas this interpretation is the correct one (as along the South Craven Fault, in

the Ingleborough area), in others it is probably incorrect (as in the erosional escarpment on the East of the Burren in the West of Ireland). However, his viewpoint was a refreshing one to a Britain in 1955 still living under the shadow of Davisian geomorphology.

For his time, Corbel was able to make apt comparisons between karst areas in the British Isles with those elsewhere. I have already referred to his comparison of Ingleborough with Svartisen; but his text abounds in other comparisons. For example he compares the small caves in the Dove Valley with those in the Italian Dolomites and Ben Bulbin in N.W. Ireland with Bear Island (Björnöya). Such illuminating comments had never been made before on the British limestone areas.

In addition to his doctoral thesis, he wrote letters and articles on British karst areas — and was always ready to engage in lively discussions. I have recently re-read his thesis — every sentence is full of ideas and observations. He found it difficult to apply the scholarly tests in support of his intuitive opinions. I doubt, even if he had not been so tragically killed he would have ever been able to achieve such scholarly work. But his writings on the British Isles were a significant step in the study of the British karst areas. His great contribution was to stimulate others to undertake the experiments which he would have found so tedious to do. As a result of his work in Britain, there have followed the detailed works of Ingle Smith in the Mendips, Pitty in Derbyshire, Williams in Ireland, and many others. By promoting «outrageous» hypotheses — Corbel did karstic studies both in Britain and elsewhere, a great deal of good and helped to advance karstology significantly.

BIBLIOGRAPHY

CORBEL (J.) - 1957 - Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe. Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon. *Mem. et Doc.*, N° 12, 541 pages.

CORBEL (J.) - 1952 - Une région karstique d'Irlande. Le Burren. *Revue de Géographie Lyon*, XXVII pp. 21-23.

CORBEL (J.) - 1949 - Preliminary Notes. Cave Research Group, *Newsletter*, N° 26, pp. 17-19.

CORBEL (J.) - 1952 - A comparison between the karst of the Mediterranean region and North-Western Europe. *Trans C.R.G. II*, N° 1, pp. 1-25.

CORBEL (J.) - 1950 - Karst and Tectonics in Yorkshire. *Cave Research Group Newsletter*, N° 32.

FORD (D.C.) and STANTON (W.I.) - 1968 - The Geomorphology of the South-Central Mendip Hills. *Proc. Geol. Assoc.*, pp. 401-427.

KENNEDY (B.A.) - 1983 - An Outrageous Hypotheses in Geography. *Geography*, Vol. 68, pp. 326-330.

LEHMANN (H.) - 1936 - Morphologische Studien auf Java. *Geog. Abhandlungen* (Stuttgart), Vol. 9 (Series 3), pp. 1-114.

PITTY (A.F.) - 1966 - An Approach to the Study of Karst Water. *Univ. Hull Occ. Paper in Geography*, N° 5, 70 pages.

SMITH (D.I.) - 1975 - The Erosion of Limestones on Mendip, in *The Limestones and Caves of the Mendip Hills*. Ed. by D.I. Smith and D.P. Drew. David Charles, pp. 135-170.

WILLIAMS (P.W.) - 1968 - An Evaluation of the Rate and Distribution of Limestone Solution and Deposition in the River Fergus Basin, Western Ireland. *Australian National University Res. Sch. Pacific Studies, Dept. Geography Pub. G/5*, pp. 1-40.

LES TRAVAUX SCIENTIFIQUES DE JEAN CORBEL SUR LE KARST. RETROSPECTIVE ET ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

Roger LAURENT

Technicien au CNRS, ancien collaborateur de J. Corbel
Hydrobiologie et écologie souterraines. UA 367 du CNRS
Ecologie des eaux douces Université de Lyon I

Pour mieux comprendre la démarche intellectuelle et les orientations scientifiques de Jean Corbel, décédé accidentellement le 22.2.1970, il nous faut remonter jusqu'à sa formation universitaire et à son travail d'enseignant à l'Ecole Normale d'Instituteurs de Lyon.

L'importante ouverture pédagogique qu'avait retirée Corbel de cette profession initiale le suivra en effet tout au long de sa carrière de chercheur.

C'est dès 1946 qu'il définit la base d'un enseignement de la géographie à l'usage de l'Enseignement Technique. Au cours des excursions pédagogiques en milieu rural, il précise et distingue les paysages en fonction de la nature des roches présentes (1946/2) et il souligne l'intérêt de ne pas dissocier histoire et géographie; tout au long de ses travaux ultérieurs, cette démarche d'esprit se retrouve; en effet, ses publications sur le milieu physique sont souvent accompagnées de remarques ou d'articles sur le facteur humain dans les régions ou les pays qu'il étudie. Il faut rappeler que, parmi ses six certificats de Licence, figure celui d'Ethnologie.

Dans le cadre de son activité d'enseignant, il présente en 1948 un dossier sur la préhistoire (1948/3). Ces investigations sur ce sujet seront plutôt axées vers le proto-historique, la civilisation et l'ethnographie (1).

Son orientation vers l'étude du domaine calcaire est «précoce», car dès 1947, il met l'accent sur l'utilité notamment pour les jeunes de parcourir le milieu souterrain. La spéléologie est pour lui une démarche culturelle : «elle répond à un besoin d'explorateur» qui caractérise cette période de la vie humaine. Il insiste sur l'apport de cette activité sur le plan sportif, sur son intérêt scientifique, soulignant notamment que... «la morphologie interne du karst est encore à l'heure actuelle (en 1947) une science dans l'enfance...» (1947/1). Dans le même article, il met l'accent sur les disciplines parallèles et complémentaires à la spéléologie physique (2); la physico-chimie, la biospéléologie, la préhistoire...

Ses premiers travaux de recherche sur le karst s'orientent vers des comparaisons géomorphologiques entre le milieu superficiel et le sous-sol. D'après ses propres observations, il précise la différence entre karst nu et karst couvert. Il s'intéresse également aux processus de cristallisation dans les cavernes (1947/2).

A compter de 1950, l'orientation et les conceptions scientifiques de Corbel s'affirment : il distingue les karsts du Nord de l'Europe et



J. CORBEL (Instructeur C.N.S.)
stage moniteur Vallon-Pt-d'Arc
1960 (cliché Ch.Schaffran)

ceux du Midi (1950/1 - 1952/13 - 1956/3), mais ses idées évoluent et en 1954/8 il assimile les karsts du Nord comme des karsts se développant ou s'étant développés en climat froid.

Son sujet de thèse et sa vocation pédagogique font qu'il collabore avec de nombreux clubs spéléologiques en France, en Belgique, en Grande-Bretagne notamment; et de ce fait, il est sollicité comme conférencier (1953/8 - 1955/6 ...) et pour écrire des articles dans de nombreux bulletins (1949/2 - 1950/4, 8 - 1951/8, 9, 10 - 1952/7, 8, 9, 13, 14 - 1953/8 - 1954/9, 10, 11 - 1963/7 - 1971/1 - 1981/1...). Ces publications, et peut-être aussi d'autres qui nous sont inconnues sont parfois de simples traductions de ses articles, elles présentent toutefois l'avantage de faire circuler les idées et de faire connaître des karsts différents dans d'autres pays. Cette collaboration entre la recherche et le milieu spéléologique a été bénéfique pour l'actuelle Fédération Française de Spéléologie (FFS), puisque Corbel a enseigné de 1957 à 1960/61 comme Instructeur dans les stages de Moniteur en Spéléologie, stages organisés à l'époque par le Ministère de la Jeunesse et des Sports (SDJS) et le Comité National de Spéléologie (CNS), l'actuelle FFS (1958/6).

Jean Corbel attachait beaucoup d'importance à la bibliographie, car il tenait à informer «ses lecteurs» des grandes tendances scientifiques et notamment sur le karst (1951/2 - 1952/1 - 1954/10). D'autre part, dès ses premiers articles, il cherche à intégrer l'évolution des paysages dans notre passé climati-

que et tectonique. A l'aide d'exemples actuels, il présente l'évolution de différentes régions karstiques (1947/3 - 1951/3, 4 - 1952/1, 3, 4, 12 - 1953/3 - 1954/5, 6 - 1956/5, 6) (se reporter à sa thèse (1957/1) pour avoir une bibliographie plus complète).

Le problème de la dissolution, de l'ablation, de l'érosion du calcaire l'a toujours préoccupé. Aussi mène-t-il ses recherches en fonction de sa définition des karsts : il observe la dissolution des formes marines (1952/5) en parallèle avec des secteurs glacés (1952/4), tout en tenant compte des facteurs cryokarstiques et des processus d'érosion. Aussi, tout en continuant d'écrire la géomorphologie des régions qu'il étudie, Corbel s'attache à donner des explications sur la genèse des microformes ou sur la particularité de certains héritages (1951/1 - 1953/3, 4).

Les premières mesures numériques réalisées par ce chercheur ont porté, semble-t-il, sur les «Indices d'aplanissement des galets» (méthode définie par A. CAILLEUX), mais malgré l'abondance des mesures effectuées sur du matériel superficiel et souterrain, ces données n'apparaissent pas clairement dans ses articles (1956/6).

Autre objet de mesures systématiques : l'impact sur le calcaire des eaux froides; pour mieux comprendre l'influence du périglaciaire sur le karst, Corbel a travaillé sur le pergélisol, notamment au Spitsberg (1953/2 - 1970/5) et

1) Ces travaux seront cités dans le numéro en préparation, à paraître dans la Revue de Géographie de Lyon.

2) Le terme «spéléologie» est employé par Corbel comme désignant la «science des grottes», qui est d'ailleurs la traduction littérale des racines grecques du mot; il suivait en cela l'opinion suggérée par E.-A. MARTEL.

dans les régions arctiques de l'Ouest des Etats-Unis, grâce à un séjour à l'Institut Arctique d'Amérique du Nord. Alors commence pour lui de nombreuses études sur le climat (1959/4), la neige, la glace (1). De ces travaux, retenons seulement la mise en évidence des circulations d'eau sous-glaciaires (1952/4 - 1955/2 - 1970/3); circulations qui ont été étudiées également par R. Vivian au glacier de l'Argentine en Haute-Savoie, en Norvège par W.E. Davies (1961), au Spitzberg par M. Pulina (1962). A ce sujet, Pulina utilise le terme de **glaciokarst** (1984) pour éviter une analogie entre les phénomènes *cryokarstiques* et *thermokarstiques*.

L'étude de ces circulations a permis à J. Corbel de mieux cerner les processus d'ablation liés au calcaire sans oublier les phénomènes péri-glaciaires et ceux du pergélisol (1953/2). Il soutient sa Thèse d'Etat en 1955 (1957/1), il affirme que l'érosion des calcaires est plus rapide sous climat neigeux que sous climat chaud. Pour lui, c'est en basse température que se produit le maximum de dissolution du calcaire. La gélifraction favorise la corrosion et l'érosion mécanique. Sa thèse est un des premiers travaux d'ensemble qui traite des karsts se développant au-delà du Cercle Polaire, en Europe de l'Ouest.

A partir de 1955, Corbel cherche à mettre en évidence une comparaison entre les karsts se développant en climat froid, neigeux et humide. Ceci le conduit à faire le point des connaissances d'alors sur les karsts tropicaux (1955/1, 5). Parallèlement, il affine ses recherches sur la dissolution du calcaire et ses idées sur la zonation altitudinale des karsts européens (1957/5, 6). Aussi tout en continuant ses réflexions sur l'évolution des climats (1964/5), il poursuit ses recherches géomorphologiques, tant sur le karst superficiel que sur le milieu souterrain. En fonction de sa zonation, il y associe des mesures physico-chimiques, des calculs d'ablation, de dissolution, d'érosion; ainsi plusieurs comparaisons sont publiées :

— en climat tempéré à moyenne altitude (1956/5 - 1957/4, 5 - 1958/8);

— en climat tropical ou en zone aride (1958/1 - 1963/1 - 1967/1);

— en climat froid, neigeux, humide, arctique ou en hautes altitudes (1957/6 - 1960/9, 11 - 1964/4).

En même temps, il poursuit des travaux sur la spéléogénèse, il cherche à comprendre la relation entre les différents types de karst et l'évolution des cavités en fonction de leurs héritages; il en informe les Clubs spéléologiques et les Karstologues (1959/8 - 1960/11 - 1961/7 - 1962/5, 6 - 1963/3).

Suite à l'ensemble de ses travaux et observations, Corbel définit quelques idées principales :

— l'indice d'excavation (1959/8 - 1960/8), sujet qui reste toujours d'actualité (voir le colloque organisé en 1984 par le Spéléo-Club de Paris, sur les Grands Volumes souterrains);

— la vitesse d'érosion (1959/1); pour cela, il s'appuie sur les travaux de H. Lehmann, et présente des exemples d'utilisation de cette méthode sur les principaux types de karst (1959/2). En 1959/10, il publie un historique sur ce sujet qui rassemble 138 références bibliographiques.

Certains articles et parfois les « théories » émises par Corbel sur l'érosion semblent avoir été mal lus ou mal interprétés par quelques karstologues, tant français qu'étrangers; aussi il est proposé lors des réunions de Stockholm et de Vienne (1960) de conduire une étude approfondie sur un karst tropical humide, afin de trouver un accord entre les points de vue favorables à la rapidité de la dissolution en pays chaud et les points de vue de Corbel qui donnent l'avantage aux régions froides (1961/3).

A compter de 1959, doté de structures administratives par le CNRS, Corbel peut alors envisager d'organiser et de concourir à des recherches pluridisciplinaires sur le karst notamment. Il collabore avec des chimistes comme R. Muxart et T. Stchouzkoy (cher-

cheurs et membres du Gr. Rech. Spéléol. Ile-de-France). Ce groupe va associer ses travaux avec un club lyonnais, le Gr. Ursus (G. Gallo, Y. Besset). Dès lors, dans le Jura, les Préalpes, les Pyrénées, ... des campagnes d'analyses physico-chimiques commencent, recherches désignées par le terme de « karstochimie » par Corbel (1964/3). Puis s'organisent des missions plus lourdes, avec des moyens accrus en personnel et en matériel; elles sont financées par la Direction Générale de la Jeunesse et des Sports, puis par le CNRS avec la création de la RCP 42 (Recherches sur les zones de Hautes latitudes). Lors de ces missions, Corbel fait bénéficier les membres de ses nombreuses connaissances personnelles acquises dans les milieux spéléologiques et karstologiques étrangers, durant ces 10 années de travail (1964/6 - 1965/2, 3, 4, Paterson K., 1974...), et inversement comme en 1969 où l'équipe participe à une campagne sur le Caucase.

L'étude du quaternaire et des écoulements d'eau tiennent toujours une place importante dans les travaux de Corbel (1962/2 - 1964/5 - 1965/1 - 1966/1 - 1967/2 - 1968/1, 6). Ces études continuent à être liées à l'évolution et à l'ablation des calcaires (1961/5).

Dans le même ordre d'idée, un programme élaboré par T. STCHOUZKOY s'oriente vers le rôle de la matière organique et l'apport de la végétation sur l'agressivité des eaux (1968/2, 3), Corbel travaillant toujours sur l'érosion (1963/9 - 1964/2, 6 - 1965/4) et son influence sur la topographie (1967/4 - 1969/3), sur la géomorphologie (1969/2).

Parallèlement, l'étude des régions chaudes et tropicales prend de plus en plus d'importance. Une équipe de recherches CNRS « karstologie » remplace la RCP. Par son orientation de recherches, elle peut répondre aux vœux émis lors de la réunion de Stockholm (1967/1 - 1969/2 - 1970/4 - 1971/2).

En France, c'est dans les années 1960 que les recherches de karstologie physique ont pris une réelle importance grâce à l'activité de chercheurs professionnels plus nombreux.

Deux disciplines ont alors côte à côte abordé le sujet :

— les « scientifiques » avec les géologues, les chimistes, ...

— les « sciences littéraires » avec les géographes karstologues, les hydrologues, les géomorphologues, ...

Longtemps, ces deux écoles se sont senties « concurrentielles » malgré les contacts étroits qu'il aurait dû y avoir à l'occasion des congrès, des colloques nationaux ou internationaux, lors des séminaires ou des réunions spécifiques sur le domaine souterrain. Cependant Corbel avait très vite compris qu'il fallait unir les idées et les gens entre ces deux disci-

plines (1964/3); mais sa disparition prématurée ne lui a pas permis de mener à terme tous ses travaux, ni d'épuiser ses idées. Il est décédé au moment où les recherches pluridisciplinaires qu'il dirigeait sur le karst portaient ses fruits.

En vingt-quatre années de recherche et de réflexion, Corbel a été très productif (plus de 200 titres) en publications de toute nature et d'orientations diverses. Sont présentées ici seulement une sélection des publications liées directement au karst, à la géomorphologie et à sa démarche scientifique pour étudier le calcaire. Certaines de ces notes étant simplement des traductions d'autres à l'usage des Anglophones, des Italiens, des Espagnols, ... Compte tenu de la culture de ce chercheur qui maîtrisait plusieurs langues, les méthodes de travail, comme je l'ai déjà écrit, reposaient beaucoup sur la bibliographie où il trouvait matière à comparaison et à réflexion. Son esprit entreprenant et synthétique lui permettait de transposer les phénomènes observés, notamment en milieu arctique (1970/3 - 1970/4, 5) pour comprendre ce qui se passe sous nos latitudes. Il est évident que Jean Corbel s'est probablement laissé parfois dépasser par son enthousiasme et qu'il a de ce fait certainement commis des erreurs de jugement ou d'appréciation, et des lacunes de conception ou d'interprétation; mais celles-ci semblent inévitables devant l'ampleur des sujets traités et la diversité des pays étudiés. De plus, il faut replacer ses travaux dans le contexte scientifique de l'époque.

Cette analyse schématique des publications de Jean Corbel n'a pas la prétention d'être complète; elle a simplement pour but, à l'aide de ses nombreux articles, de préciser les grands traits sur ses principaux travaux concernant le karst et d'en retracer la chronologie, tout en essayant de situer sa démarche scientifique globale dont l'empreinte persiste encore dans la karstologie actuelle, et nous avons comme dernier exemple le travail de David Saint-Pierre (1984) où les travaux de Corbel et de son équipe servent de base à la karstologie dans les pays scandinaves.

Roger LAURENT

BIBLIO CITÉE

DEVIES (W.E.) - 1961 - Glacier caves in Svartissen, Norway. *Nat. Spéléol. Soc. Bull. USA*, 23, 2, p. 75-76, 3 ph.

PATERSON (K.) - 1974 - Contribution à l'étude de l'hydrologie souterraine du Plateau de Presles et du Massif des Coulmes, Vercors. *Rev. Géogr. Lyon*, vol. 49, fasc. 3, p. 241-251.

PULINA (M.) - 1962 - Karst. related phenomena at the Bertil Glacier, West Spitzberg. *Kras i Spéleological*, 4, p. 67-82, 8 fig., cartes ou topo, 4 ph., Katowice, Pologne (résumé en fr.).

PULINA (M.) - 1984 - Glacier karst phenomena in Spitzbergen. *Norsk geografisk Fids-skrift. Norsk Géog. Tidsskr.*, vol. 38, n° 3-4, p. 163-168, 8 fig. Symposium : arctic and alpine karst, 1984 (synthèse de son article).

SAINT PIERRE (D.) - Karst et grottes de Norvège, essai de bibliographie française. *Grottes et Gouffres*, n° 93, p. 15-21, éd. S.C. Paris.



J. CORBEL

Remarque de J. Nicod : Les travaux de J. Corbel sur le karst ont eu des prolongements dans le domaine non karstique, en particulier l'ouvrage « Pédiments d'Arizona », édité par le CNRS, où Corbel applique aux processus géomorphologiques actuels et passés, ses idées sur l'altération des roches et le départ de substances en solution, qui permet d'expliquer l'altération préalable de roches soumises ensuite aux processus de pédimentation. Il avait trouvé la clé du problème, 20 ans avant ses successeurs.

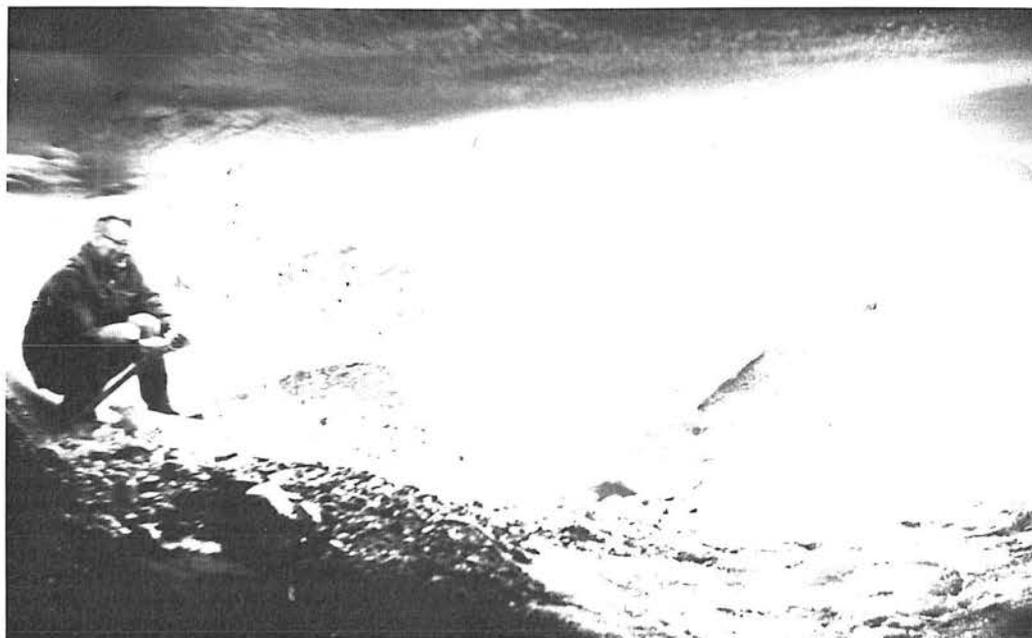
ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

(liste élaborée conjointement avec J. CHOPPY*)

- | | | |
|--|--|--|
| <p>946-2, L'enseignement de la géographie. Technique, Art, Science, <i>Rev. Enseign. Techn.</i>, Paris, n°2, 23-24.</p> <p>947-1, Les sorties en histoire et en géographie au second degré : "Un cas particulier de sortie : la spéléologie". Technique, Art, Science, <i>Rev. Enseign. Techn.</i>, Paris, n°9, 26-29.</p> <p>947-2, Observations sur le karst couvert en Belgique (Bilan de deux campagnes spéléologiques 1946-1947). - <i>Bull. Soc. Belge Etudes Géogr.</i>, Louvain, XVIII/1-2, 95-105, 6 fig. (voir 1950-8).</p> <p>947-3, Phénomènes karstiques dans le Jylland du Nord, Danemark. - <i>Meddeleser fra Dansk Geologisk Forening</i>, Copenhage, 11/12, 218-219.</p> <p>948-3, La préhistoire. Technique, Art, Science, <i>Rev. Enseign. Techn.</i>, Paris, n°8, 37-39.</p> <p>949-2, Preliminary : note on some types of karst (traduction E.A. GLENNIE). - <i>Cave Research Group of Great Britain</i>. Newsletter 26, 17-20.</p> <p>950-1, Deux types de karsts en Europe occidentale. - <i>L'information géographique</i>, Paris, 4, 137-141, 1 fig.</p> <p>950-4, Notes scientifiques : érosion mécanique et érosion chimique. Concrétion et climat. - <i>Bull. G.S. Bourg</i>, Ain, n°2, 19-20 (voir 1954-9).</p> <p>950-8, Observations on the covered karst of Belgium (report of two seasons of speleological field-work, 1946-47) (traduction G.T. WARWICK voir 1947-2). - <i>Cave Research Group of Great Britain</i>. Newsletter, n°30, 4-12.</p> <p>951-1, Les "Lapiés" dans l'Europe du Nord-Ouest (étude de géographie climatique). - <i>Rev. Géomorphol. Dynamique</i>, Paris, 2, 66-74, 10 fig.</p> <p>951-2, Les études sur le karst depuis dix ans. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 26, 1, 67-70 (voir 1954-10).</p> <p>951-3, Les phénomènes karstiques dans les Pennines (Angleterre). - <i>Rev. Géogr. Lyon</i> 26,4, 478-486.</p> <p>951-4, Le relief du Sud-Ouest du Bugey, étude de morphologie karstique. - <i>Bull. Soc. Nat. et Archéol. Ain</i>, Bourg, 65, 128-136, 4 fig.</p> <p>951-8, Karst and tectonics in Yorkshire (traduit du français par M.E. RAILTON). - <i>Cave Research Group of Great Britain</i>, Newsletter, n°32, 10-14, 4 fig.</p> <p>951-9, Karst of the Northern Pennines (traduit du français par M.E.R. & E.A.G.). - <i>Cave Research Group of Great Britain</i>, Newsletter, n°34, 5-7.</p> <p>951-10, Ingleborough again. - <i>Cave Research Group of Great Britain</i>. Newsletter, n°36.</p> <p>952-1, Travaux russes sur le karst. - <i>Ann. de Géogr.</i>, Paris, LXI, 327, 377-378.</p> <p>952-3, Une région karstique d'Irlande, Le Burren. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 27, 1, 21-33, 6 fig., 2 pl. (article traduit également en anglais).</p> <p>952-4, Karsts et glaciers en Laponie. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 27, 3, 257-267, 7 fig., 2 pl.</p> | <p>1952-5, Les Lapiaz marins. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 27, 4, 379-380, 1pl.</p> <p>1952-7, Les grottes du Pays de Galles. - <i>Bull. Gr. Spéolol. Bourg</i>, Ain, n°3 (1951-52), 5-6.</p> <p>1952-8, Deux stades de la formation des grottes. - <i>Bull. Gr. Spéolol. Bourg</i>, Ain, n°3 (1951-52), 7-11, 7 fig. (voir 1954-11).</p> <p>1952-9, Note sur la grotte d'Ogof Flynnon Ddu et sur l'accident du 20 Août 1951. - <i>Bull. Gr. Spéolol. Bourg</i>, Ain, n°3 (1951-52), p. 12.</p> <p>1952-12, Les phénomènes karstiques en Suède. - <i>Geogr. Ann. Sverige</i>, 34, 3-4, 203-237, 33fig.</p> <p>1952-13, A comparison between the karst of the mediterranean region and North Western Europe. - <i>Cave Research Group of Great Britain</i> - Transactions, 2, 1, 1-25, 14 fig., 2 pl. (traduit du français par E.A. GLENNIE).</p> <p>1952-14, Ingleborough : yet again. - <i>Cave Research Group of Great Britain</i>. Newsletter n°37, 195-196.</p> <p>1953-2, Problèmes de morphologie périglaciaire au Spitzberg. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 28, 3, 262-268, 8 fig., 6 ph.</p> <p>1953-3, Une région karstique de Haute Laponie : Navlösiell (la montagne qui a perdu son nom). - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 28, 4, 329-344, 8 fig., 8pl.</p> <p>1953-4, Sols polygonaux sur le Causse Méjean. - <i>Bull. Soc. Linn. Lyon</i>, 10, 263-264.</p> <p>1953-8, La Laponie et ses grottes (C.R. de conf. du 26/1/52 par A.D.). - <i>Bull. Soc. Nat. Archéol. Ain</i>, Bourg, n°67, 50-51.</p> <p>1954-5, Les phénomènes karstiques dans les Grands Causses. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 29, 4, 287-315 et 345, 25 fig., 2pl.</p> <p>1954-6, Les phénomènes karstiques dans la région de Cork (Irlande du Sud). - <i>Norais</i>, Poitiers, 2, 129-140, 7 fig., 2 pl.</p> <p>1954-8, Les phénomènes karstiques en climat froid, "Das Karstphänomen in den verschiedenen Klimazonen". - <i>Erkunde, Arch. Geogr.</i>, Bonn, VIII, 2, 119-120, 3 fig.</p> <p>1954-9, Erosion mécanique et dissolution en grotte. - <i>Bull. Inform. Fédér. Spéolol. Belgique</i>, 5, Avril, 22-23 (reprod. du 1950-4).</p> <p>1954-10, Les études sur le karst depuis dix ans. - <i>Bull. Inform. Fédér. Spéolol. Belgique</i>, 5, Avril, 23-27, (reprod. partielle du 1951-2).</p> <p>1954-11, Deux stades de la formation des grottes. - <i>Rev. Spéolol. de Belgique</i>, Louvain, (reprod. du 1952-8).</p> <p>1955-1, Note sur les karsts tropicaux. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 30, 1, 49-54, 2 fig., 2 pl.</p> <p>1955-2, Crevasse et rivières sous-glaciaires. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 30, 3, 237-247, 7 fig., 4 pl.</p> <p>1955-5, Les reliefs calcaires en climat tropical humide. - <i>Actes 73^e Cong. A.F.A.S. 1954</i>, Ann. Univ. Poitiers, (2), 5, 347-349.</p> <p>1955-6, Dans les gouffres glacés de Suisse et d'Autriche (C.R. Conf. par A.D.). - <i>Bull. Soc. Nat. et Archéol. Ain</i>, Bourg, n°69, 35-36.</p> <p>1956-3, Un karst méditerranéen de basse altitude : le massif des Calanques et la formation de son relief. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 31, 2, 129-136, 2 fig. 2 pl.</p> | <p>1956-5, Le karst du Vercors. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 31, 3, 221-241, 4 fig.</p> <p>1956-6, Le karst proprement dit : étude morphologique. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 31, 4, 303-317, 5 fig.</p> <p>1957-1, Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe et de quelques régions de comparaison, Thèse. - <i>Rev. Géogr. Lyon, Mém. et Doc.</i>, Inst. Et. Rhodaniennes, 12, 541 p., 100 fig. h.1.</p> <p>1957-4, Hydrologie et morphologie du Nord-Ouest américain. - <i>Rev. de Géomorphol. Dynamique</i>, Paris, 7-8, 97-112, 12 fig.</p> <p>1957-5, Karst alpins de moyenne altitude : Interlakan, Beatenberg. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 32, 1, 3 fig., 2 pl.</p> <p>1957-6, Karsts haut-alpins. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 32, 2, 135-158, 154 fig., 2 pl.</p> <p>1958-1, Karsts du Yucatan et de la Floride. - <i>Bull. Ass. Géogr. Fr.</i>, n°282-283, 2-14, 5 fig.</p> <p>1958-6, Le plein-air. - <i>Rev. Amicale anciens stagiaires, animateurs des activités de la jeunesse ouvrière et rurale</i>, Metz, 15, 63 p., 25 fig.</p> <p>1958-8, Les karsts de l'Est canadien. - <i>Cahiers Géogr. de Québec</i>, 4, 193-216, 18 fig.</p> <p>1959-1, Une nouvelle méthode d'étude des régions calcaires. - <i>Rev. de Géomorphol. Dynamique</i>, Paris, 10, 1-4, 45-48.</p> <p>1959-2, Erosion en terrain calcaire (vitesse d'érosion et morphologie). - <i>Ann. de Géogr.</i>, Paris, 68, 366, 97-120, 11 fig., 2 pl. (voir 1981-1).</p> <p>1959-4, Nouvelles méthodes de mesures des paléotempératures. - <i>Rev. Géogr. Lyon</i>, 34, 2, 169-173, 4 fig.</p> <p>1959-8, Les grandes cavités de France et leurs relations avec les facteurs climatiques. - <i>Ann. Spéolol.</i>, CNRS, Paris, XIV, 1-2, 31-47, 9 fig. (voir 1975-1).</p> <p>1959-10, Vitesse de l'érosion. - <i>Z. f. Géomorphol.</i>, Berlin, 3, 1, 1-28.</p> <p>1960-8, A propos de l'indice d'excavation. - <i>Ann. de Spéolol.</i>, CNRS, Paris, XV, 1, p. 86.</p> <p>1960-9, Nouvelles recherches sur les karsts arctiques scandinaves - 2^e Rapport Commis. Phénomènes karstiques - (XIX^e Intern. Geogr. Cong., Norden, Stockholm). - <i>Z. f. Géomorphol.</i>, Berlin, Supp. band 2, 74-78.</p> <p>1960-11, Karst et climat en Scandinavie, "Abstracts of papers", (XIX^e Intern. Geogr. Cong., Norden, Stockholm). - <i>Z. f. Géomorphol.</i>, Berlin, Supp. Band 2, p. 55.</p> <p>1961-3, Etude des phénomènes du karst (travaux des commissions XIX^e Intern. Geogr. Cong. Stockholm). - <i>Ann. Géogr.</i>, Paris, LXX, 381, 473-476 (en collaboration avec M. DERRUAU).</p> <p>1961-5, Notes de recherche sur la dissolution du calcaire. - <i>Rev. Géogr. Est</i>, Nancy, 4, 363-365.</p> <p>1961-7, Remplissages de grottes et climats (Atti del Symposium Intern. di Speleologia, Varenna 1960). - <i>Rassegna Speleol. Ital.</i>, V, 11, 131-136.</p> <p>1962-2, Erosion et grands cours d'eau en France (mise au point). - <i>Inf. Géogr.</i>, Paris, 26, 3, 113-117, 2 fig.</p> |
|--|--|--|

*Pour une meilleure unité des travaux cités, j'ai laissé les références que nous utiliserons pour la bibliographie générale de J. Corbel.

- 1962-5, Marmites-de-Géant, Tinajitas, Vagues d'érosion, Niches. -*Spelunca*, Paris, 2, 3, 34-37.
- 1962-6, Recherches nouvelles sur les grottes (Actes IV. Congr. Nat. Spéol., Belfort-Mallaux 1962). -*Spelunca Mém.*, Paris 2, 35-40, 2 fig.
- 1963-1, Pédiments d'Arizona. - *Mém. et Doc.*, Centre de Documentation Cartogr. et Géogr. C.N.R.S. (nouv. série) IX, 31-95, 24 fig., 5 p.
- 1963-3, Marmites de Géants et microformes karstiques. -*Norois*, Poitiers, 38, 121-132, 5 fig., 2 pl.
- 1963-7, Généralités sur la spéléologie. -*Spéleo. Dordogne, S.C. Périgieux*, 8, 5-8 et 18 (en collaboration avec Ph. RENAULT).
- 1963-9, Vitesse d'érosion et formation des grottes. (3^e Congr. Intern. Spéologie, Wien), II, 37-41, 1 fig.
- 1964-2, L'érosion terrestre. Etude quantitative (Méthodes - Techniques - Résultats). -*Ann. Géogr.*, Paris, LXXIII, 398, 365-412, 3 fig.
- 1964-3, Des expéditions géographiques collectives. -*Rev. Géogr. Est*, Nancy, V, 3, 217-228, 4 pl.
- 1964-4, Les karsts des régions polaires. -*Rev. Belge Géogr. N° spécial*, "Karst et climats froids", 1-2 83-103, 5 fig., 7 ph.
- 1964-5, Les changements de climat au Quaternaire dans les Alpes françaises (VI^e Congr. Intern. Quaternaire, Warsaw 1961), vol. 2. Paléoclimatological section, Lodz, 263-271, 2 fig.
- 1964-6, Erosion chimique dans le karst de Moravie. Comparaison des résultats avec ceux obtenus dans les karsts voisins. - *Bull. Gr. Rech. Spéol. Ile de France*, Arcueil, 6, 13 p. (en collaboration avec T. STCHOUZKOY, J.C. FRANCK, R. MUXART) (voir 1965-4).
- 1965-1, Observations sur les vallons glaciaires actuels et méthode de datation des formes anciennes, C.R.A.S. Paris (9) 260, 5079-5080.
- 1965-2, Karsts de Yougoslavie et note sur les karsts tchèques et polonais. -*Rev. Géogr. Est*, Nancy, V, 3, 245-294, 7 fig., 4 pl.
- 1965-3, Introduction aux karst des Pyrénées françaises, *Spélaison Carso*. -Gr. Rech. Spéol. Ile de France, Arcueil, 2, 34-54.
- 1965-4, Chemical erosion in the Moravian Karst (Comparison of results with those obtained in the neighbouring karst regions) "Problems of Speleological Research". -*Academia*, Praha, 107-124 (en collaboration avec T. STCHOUZKOY, R. MUXART, J.C. FRANCK).
- 1966-1, Zones hypoglaciales et hyperglaciaires lors du maximum des inlandsis quaternaires arctiques. -*C.R.A.S. Paris, Série D*, 263, 1055-1057.
- 1967-1, Morphologie des régions calcaires à la Jamaïque et à Puerto-Rico "Phénomènes Karstiques". -*Mém. et Doc.* Centre de Documentation Cartogr. et Géogr. C.N.R.S. (nouv. série), 4, 335-392, 16 fig., 4 pl. (en collaboration avec P. BIROT et R. MUXART) (réédité en 1972).
- 1967-2, Les zones du monde écoulant plus de trois mètres d'eau. -*Rev. Géogr. Est*, Nancy, 4, 397-401, (reprint dans 1968. Mélanges offerts à M. Pardé, Grenoble, p. 151-153).
- 1967-4, Expédition Irlande 1967. -*Karstologie et géohydrologie* CNRS/ER29, fasc. 5., pré-publication (reprint partiel dans 1969-3).
- 1968-1, Karsts et glaciers quaternaires. Irlande et Laponie. -*Norois*, Poitiers, 60, 469-479, 1 fig., 8 ph.
- 1968-2, Etudes d'eau en Laponie (1967). -*Norois*, Poitiers, 60, 517-521 (en collaboration avec T. STCHOUZKOY).
- 1968-3, Tourbières et morphologie karstique dans la région de Sligo (Irlande). -*Rev. Géogr. Alpine*, Grenoble, LVI, 2-3, 517-520, 3 fig., 1 pl. (en collaboration avec A. REFFAY et T. STCHOUZKOY).
- 1968-6, Recherches sur l'inlandsis quaternaire en Norvège septentrionale. -*P. Simonsen Varanger-funnene*, VI, 75-95, 26 fig.
- 1969-2, Les karsts des régions chaudes. -*Abh. 5 Intern. Kongress f. Speläologie Stuttgart 1969*, München, 1, M12, 3p. (voir 1971-2).
- 1969-3, Karsts océaniques britanniques 1967. (Act. Réunion Intern. Karsto. Languedoc-Provence 1968). - *Et. et Tr. de Méditerranée*, Gap, 7, 211-226, 17 fig., 4 pl. (Ces actes ont été dédiés à la mémoire de J. CORBEL). (voir 1967-4).
- 1970-3, Cryokarsts et chimie des neiges en zone polaire. -*Rev. Géogr. Pyrénées Sud-Ouest*, 41, 2, 123-138 (en collaboration avec G. GALLO).
- 1970-4, Karsts des zones tropicales humides. -*Z. f. Geomorphologie*, Berlin, 14, 4, 411-474, 14 fig., 28 ph. (en collaboration avec R. MUXART).
- 1970-5, Du karst au cryokarst. Définitions descriptions discussions "Spitzberg. Mission française 1966". -*Mém. et Doc.* Centre de Documentation Cartogr. et Géogr. C.N.R.S. (nouvelle série), 10, 185-188. (Numéro dédié à la mémoire de J. CORBEL).
- 1971-2, Les karsts des régions chaudes (Des déserts aux zones tropicales humides). -*Studia Geomorphologica Carpatho - Baltanica*, Krakow, V, 49-76 (voir 1969-2).
- 1975-1, The major caves of France and their relationship with climatic factors. -*Cave Geology*, College, 2, 42-55 (trad. du 1959-8, par C. LENDIS).
- 1981-1, Erosion en terrain calcaire "Karst Morphology" Ed. by M.M. SWEETING. -*Benchmark Papers in Geology 59*, Hutchinson Ross Publishing Co., Stroudsburg, Pennsylvania, 100-125 (trad. de 1959-2).



Spitsberg - (Ny-Alesund) - 1966 - Grotte de glace du Loven-Est (Cliché G. Gallo).

LIVRET-GUIDE DES EXCURSIONS (EXTRAITS)

Patrice GAMEZ
Michel SARY
Joël RODET
François LETOUZE

MORPHOGENESE ET KARSTOGENESE EN WOEVRE SEPTENTRIONALE «L'INTERFLUVE LOISON-OTHAIN»

I. L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE

L'environnement physique de l'interfluve Loison-Othain (Woèvre septentrionale, Lorraine), est caractérisé par le contraste lithologique entre les argiles de la Woèvre (Callovien) et les calcaires de la Dalle d'Étain (Bathonien supérieur) sur lesquels elles reposent. Proches du massif ardennais, les couches ont subi une accentuation de pendage (NE-SO) et les effets d'une tectonique souvent cassante (direction hercynienne et composantes latérales).

Le climat, de transition océanique-continentale, se caractérise surtout par de fortes irrégularités interannuelles et saisonnières : tous les mois peuvent être hydrologiquement actifs, mais cette activité est plus intense et plus fréquente durant la période hivernale (octobre à avril). L'écoulement de

l'eau sur l'interfluve dépend de ces variations climatiques, mais également du comportement hydrique du substratum (argiles sableuses relativement imperméables, calcaires fissurés et fracturés très perméables) et de l'état de la couverture végétale naturelle et anthropique.

II. LA MORPHOGENÈSE

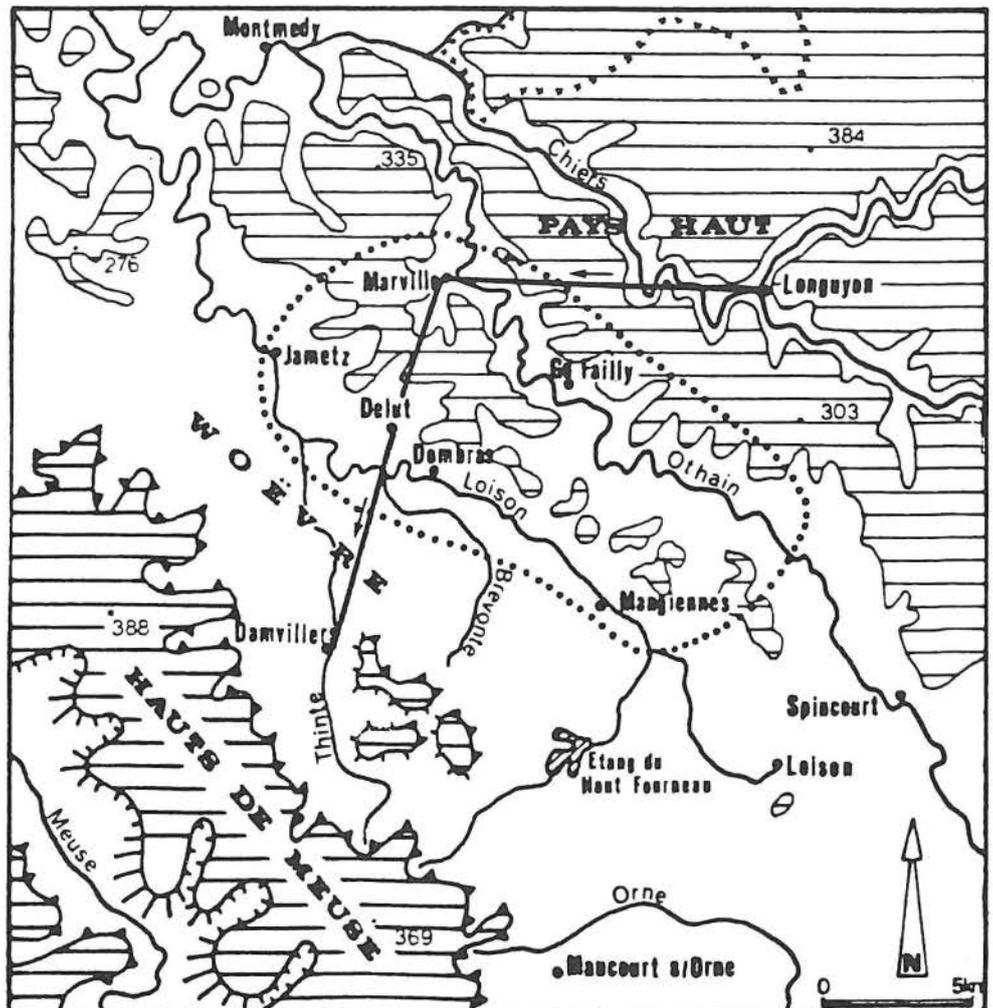
La morphogenèse de l'interfluve est liée au développement d'un réseau hydrographique

subséquent, affluent de la Meuse (Loison et Othain). Il est conforme à l'orientation générale d'une topographie fini-tertiaire (SE-NO) et adapté à une tectonique d'ondulations de même direction (flexures faillées). Le réseau secondaire est le plus souvent de direction hercynienne.

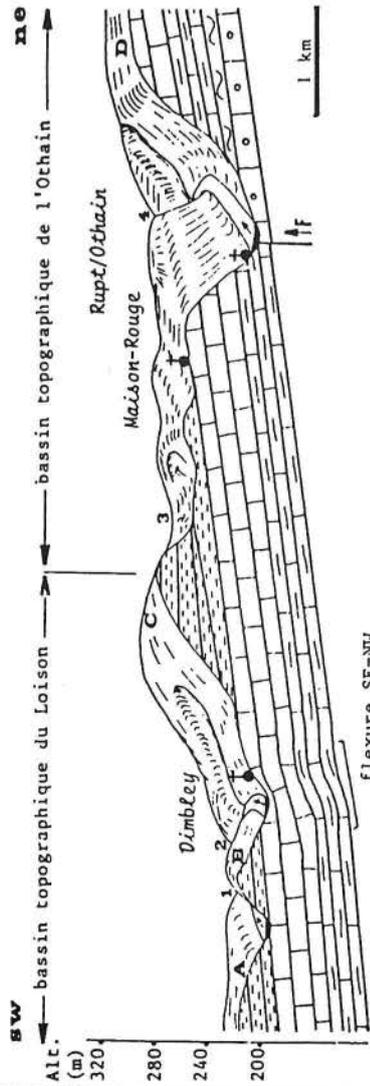
Les nuances lithologiques et tectoniques ont été largement exploitées par le réseau hydrographique. Il en résulte une morphostructure d'autant plus nette que les processus érosifs dominent au cours du Quaternaire (dépôts détritiques inexistantes ou de faible épaisseur). L'état actuel du relief résulte surtout d'une morphogenèse ayant pour élément moteur l'écoulement de l'eau. Dans le bassin de Delut, les «rondvaux» en tête de vallon constituent des formes en hémicycles à morphogenèse très active qui commande le recul des versants. Actuellement, l'homme accentue ou modifie les processus érosifs (stabilité



DELUT (Meuse), gouffre-perte dans le Bathonien calcaire (dalle d'Étain) en pied versant argileux Callovien; effondrement de la voûte nécaniquement détendue. Seul subsiste encore un pont rocheux séparant les deux ouvertures apparentes (photo P. Gamez).



COUPE MORPHOSTRUCTURALE
(transversale à l'interfluve Loison-Othain)



Relief :
dépressions collines

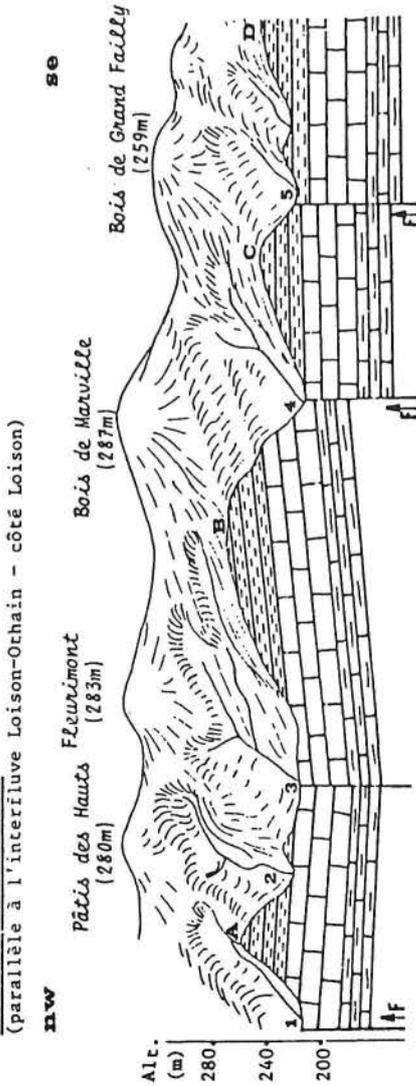
- 1 vallée de La Brévonté A La Haute Satty (218m)
- 2 vallée du Loison B Les Feuillettes (215m)
- 3 Fond de Peu C Le Petit Bois (281m)
- 4 vallée de l'Othain D Les Ouilons (300m)

Géologie :

- Callovien
- Bathonien sup.
- Bathonien moy.
- Bathonien inf.
- Bajocien sup.

FIGURE 4

COUPE MORPHOSTRUCTURALE
(parallèle à l'interfluve Loison-Othain - côté Loison)



Relief :
dépressions collines

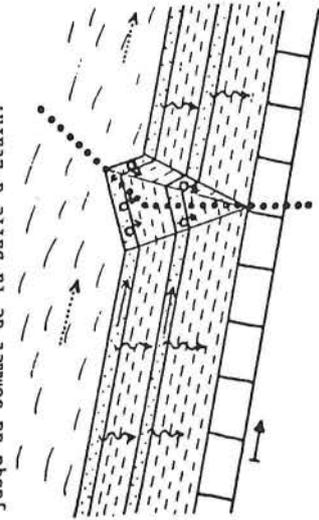
- 1 Les Rouges Terres A Bois Saulé (260m)
- 2 Croix des Vaux B La Ronchette (260m)
- 3 Croix Mathias C Bois Marimont (240m)
- 4 La Goulette D Bois Parfondévaux (240m)
- 5 Parfondévaux

Géologie :

- Callovien
- Bathonien sup.
- Bathonien moy.

PHASE INTERPERIGLACIAIRE

Entaille linéaire le long d'une zone de fracturation : érosion différentielle par ruissellement qui entame les argiles jusqu'au sommet de la Dalle d'Étain.

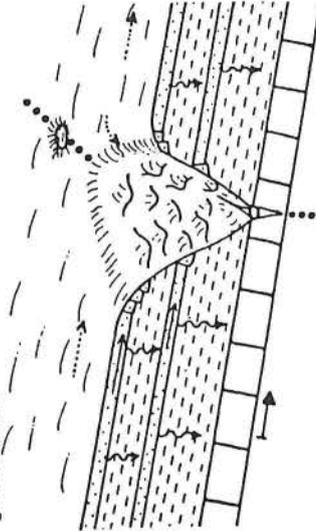


STRUCTURE

- argiles de la Woèvre (à bancs calcaro-gréseux)
- affaissement de banc (pseudo-pendage)
- calcaires de la Dalle d'Étain (fracturés et karstifiés)
- zone de fracturation
- pendage

PHASE PERIGLACIAIRE

Amorce de l'érosion latérale due aux actions gel-dégel (gélifluxion) et stabilisation pendant les périodes de gel continu.



ÉCOULEMENT DE L'EAU

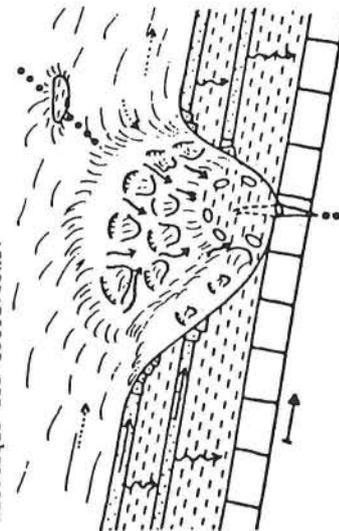
- ruissellement épisodique sur les collines
- écoulement préférentiel dans les Pierres d'eau
- percolation lente dans les argiles sableuses
- sourcins des Pierres d'eau
- ruissellement de versant (surface + sourcins)

MORPHOLOGIE

- mouvements de masse (gélifluxion solifluxion)
- gouffre karstique (ouverture permanente)
- doline de pied de versant (épisodiquement comblée par colluvions soliflués)
- entaille temporaire de fond de rondsaux
- mardelle

PHASE POST-PERIGLACIAIRE ET ACTUELLE

Reprise de l'érosion latérale par solifluxion et ruissellement. Élargissement du fond du rondsaux par évacuation karstique des colluvions.



sur les versants à taillis sous futaie, solifluxion sur versants argileux en herbes, ruissellement dans les vallons colluvionnés, stabilité sur les glacis à gélifracts de la Dalle d'Étain). Le recul des versants argileux est d'autant plus rapide que le profil d'équilibre est perpétuellement remis en cause par l'ouverture de formes karstiques en pied de versant.

III. L'HYDROGÉOLOGIE

Le quadrillage tectonique joue également un rôle important dans l'écoulement des nappes souterraines. Dans les calcaires de la Dalle d'Étain, l'écoulement général correspond à l'orientation NE-SO du pendage, avec des émergences dans les vallées de l'Othain et du Loison. Mais les zones de fracturations (NE-SO), où s'entaillent les affluents délimitent des blocs basculés latéralement (SE-NO ou NO-SE) qui dévient en partie l'écoulement général de la nappe vers les vallées affluentes (émergences de nappe captive ou de nappe libre).

IV. LES FORMES KARSTIQUES

Les formes karstiques de la Dalle d'Étain s'intègrent parfaitement dans le circuit hydrique. Les dolines sont ouvertes dans les argiles de pied de versant par soutirage au niveau des fissures de la Dalle d'Étain. Les gouffres ont été façonnés par l'érosion remontante d'un niveau hydrostatique fluctuant, le long des discontinuités tectoniques (karst suffoquant).

V. GENÈSE ET ÉCOULEMENT KARSTIQUE

La rivière souterraine du Faily draine les eaux de l'impluvium Callovien et de la nappe libre du Bathonien. La genèse du karst est liée aux fluctuations de cette nappe à l'époque fini et post-Quaternaire. Cinq phases génétiques peuvent y être décelées :

- Phase I : écoulement en régime de nappe captive, avec corrosion prédominante en période interglaciaire humide et chaude.
- Phase II : surcreusement de type anaglaciare, plus frais et plus humide.

- Phase III : comblement détritique de type périglaciaire.
 - Phase IV : recréusement et surcreusement de type cataglaciare, tempéré frais et humide.
 - Phase V : actuelle, processus actifs mais de faible ampleur.
- Du point de vue hydrologique, la Dalle d'Étain est caractérisée par trois zones superposées :
 — une zone non saturée dans laquelle se sont développés les drains verticaux,
 — une zone de fluctuation de la nappe dans laquelle se sont installés les drains horizontaux,
 — une zone saturée (nappe libre) bloquant l'enfoncement du karst.

Le ruissellement de surface, capté par les ouvertures karstiques, se surimpose à la nappe bathonienne et aboutit dans la vallée du Loison sous formes de grosses émergences (Damousse, Mircoussin). La mise en charge des drains horizontaux crée une surpression hydrostatique engendrant momentanément des geysers dans les zones d'émergence (les « Bouillons » de Delut).

Morphogenèse et karstogenèse sont donc liées à l'activité prépondérante des écoulements d'eaux qui exploitent les particularités géologiques de la Woëvre septentrionale.

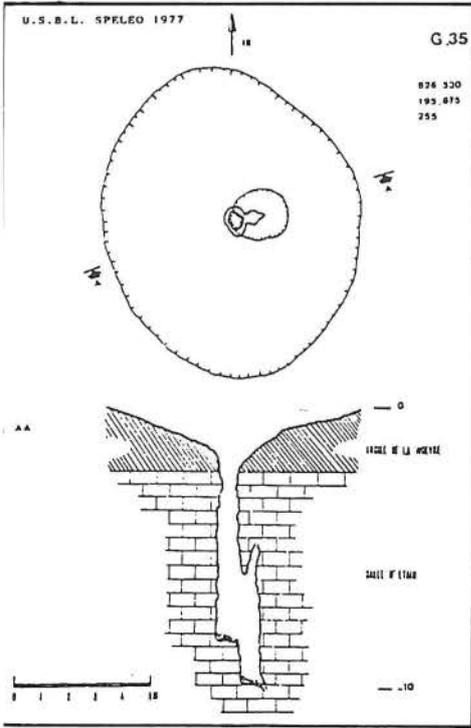
P. GAMEZ ET M. SARY
 Centre d'Études Géographiques de l'Université de Metz CEGUM.

KARST DE LA CRAIE DE LA CUESTA D'ILE-DE-FRANCE LA MONTAGNE DE REIMS ORIENTALE

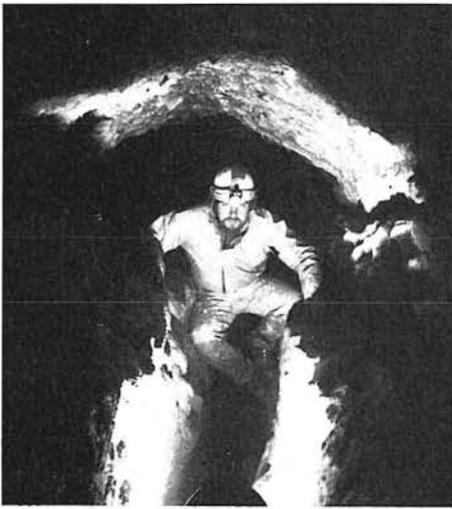
Située entre la vallée de la Vesle, au nord, qui arrose Reims, et la vallée de la Marne qui traverse Epernay au sud, la Montagne de Reims est indentation de la cuesta du Tertiaire d'Ile-de-France qui s'avance vers l'Est, sur la plaine crayeuse du Crétacé supérieur de Champagne.

Rappels sur la craie, roche carbonatée

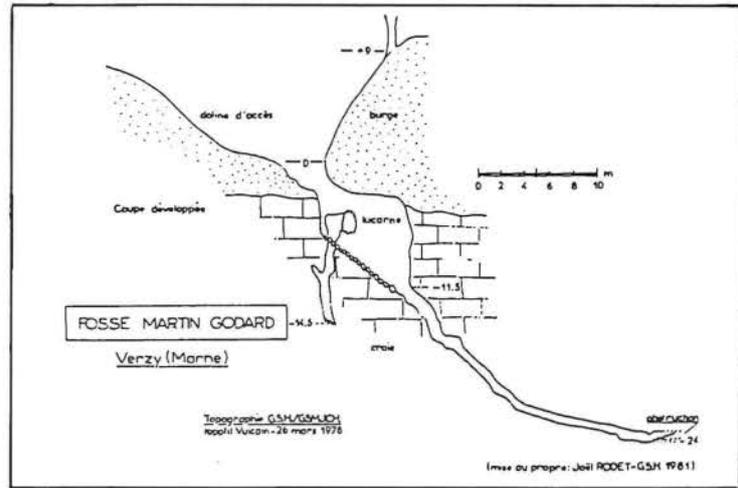
La craie est une roche carbonatée qui s'est sédimentée dans une mer peu profonde, en 15 à 20 millions d'années durant le Crétacé supérieur, lors de la subsidence du Bassin de Paris. La fin de l'ère secondaire est marquée



Drains verticaux dans le karst de la Dalle d'Étain.



Entrée de la FOSSE MARTIN GODARD (Verzy, Marne). Karst crayeux de la Montagne de Reims (photo P. Gamez).



par une régression qui a dû s'étaler sur une longue période si on en juge par l'intensité de l'érosion qui atteint le Campanien.

Il s'agit d'une sédimentation biodétritique traduisant la grande stabilité géologique des terres émergées proches (M. Laurain et al., 1981).

Les craies de la Montagne de Reims sont blanches, parfois jaunâtres, très pures, sans silex. La macrofaune y est rarissime. La roche est très friable et particulièrement gélive. Elle a été peu exploitée et dans les meilleures zones. Les carrières montrent une fissuration intense, avec de grands réseaux de diaclases orientées. La craie est de structure très fine et homogène, et présente une cassure conchoïdale. Pour retrouver les coupures stratigraphiques classiques, il est nécessaire de faire appel à la micropaléontologie : cette grande homogénéité est un trait fondamental des craies qui offrent un comportement hydrologique identique, quel que soit l'étage, du Cénozoïque supérieur au toit du Sénonien.

En raison de ses conditions de sédimentation, la craie offre une porosité interstitielle très élevée (30 à 40%). Cette qualité la rend particulièrement sensible à la gélifraction. Cependant la porosité efficace ou coefficient d'emmagasinement est bien différente : les valeurs admises généralement sont de 5 à 10% dans les vallées et de seulement 0,5 à 1% sous les plateaux.

Cette porosité élevée explique le développement quasi général d'une nappe de porosité et de microfissures, dite «nappe phréatique» dans la craie. La surface piézométrique de cette nappe épouse sensiblement la topographie, en atténuant les reliefs. Profonde sous les plateaux, elle peut recouper la surface topographique dans les avals des vallées sèches, donnant des nappes d'inondation. Le lent transit des eaux de la nappe engendre des fluctuations saisonnières de la surface piézométrique dont l'amplitude sera d'autant plus importante que la fissuration sera réduite. Elle est faible sous les vallées (de l'ordre du mètre) et importante vers les crêtes piézométriques (de 10 à parfois plus de 20 m).

Ces variations sont liées directement à la pluviosité hivernale pour la recharge et au débit des cours d'eau drainant la nappe pour la décharge. Ainsi en Normandie, les hautes eaux de la nappe se situent en juillet, en saison la plus sèche, et les basses eaux en novembre-décembre, en pleine période pluviale (J. Rodet, 1981). Ce régime assure aux eaux de la craie une grande stabilité chimique tout au long du cycle hydrogéologique. La minéralisation s'accroît des plateaux vers les vallées, d'amont en aval des bassins, et reste

inférieure aux normes françaises de potabilité. La dureté varie de 15 à 30°. Ces eaux essentiellement bicarbonatées calciques (90 à 95%) ont des teneurs en magnésium très faibles (5 à 10%) (M. Laurain et al., op. cit., F. Megnien et al., 1977). Ces qualités et une grande demande des activités locales expliquent que la nappe de la craie, aquifère régional fondamental, soit très sollicitée par toutes les adductions d'eau destinée à l'alimentation humaine (A.E.P.) et les établissements industriels ou agricoles. Les champs captants de Reims à Fléchambault et à Couraux prélèvent à eux seuls plus de 25 000 m³ par jour.

1. CARRIÈRE DE BISSEUIL

Stratigraphie de la cuesta

Notre premier arrêt offre une coupe géologique du Sud de la Montagne de Reims. Sur la craie campanienne, on trouve successivement :

- Thanétien (marnes et calcaires à blocs de craie durcie),
- Thanétien (sables et grès calcaires à Microdium). Deux faciès différents mais géné-

riquement liés. Les marnes à blocs de craie représentent le résultat de l'altération pédologique de la craie pendant l'émersion post-crétacée. Les sables et grès à Microdium, une concentration de matériel détritico-calcaire et de cellules de Microdium à partir de la formation précédente.

— Yprésien à «faciès Sparnacien» (sables et argiles ligniteux), un ensemble de lentilles fluvio-estuariennes, de faciès très variés, constitue une masse de 15 à 20 m de puissance. Sables fins ou grossiers, argiles, argiles ligniteuses, lignites, faluns argileux s'enchevêtrent sans ordre apparent.

— Yprésien à «faciès Cuisien» (sables blancs ou jaunâtres), représente des faciès fluvio-estuariens constitués de sables blancs, fins, à passées et filets argileux.

— Eocène supérieur continental. Les Lutétien, Bartonien, Ludien sont représentés par des faciès argilo-dulçaquicoles dans lesquels les traces paléopédologiques abondent : le Lutétien est azoïque, par contre le Bartonien est bien fossilifère. Le Ludien présente à sa base un banc calcaire marin fossilifère qui a servi à la définition de l'étape (Ludes). Bien développé au nord de la Montagne de Reims, cet ensemble ne paraît pas exister au sud (lacune de sédimentation).

— Le faciès Sannoisien (argiles rouges, à blocs de meulière) constitue l'armature du plateau.

— Stampien : des sables argileux rouges, accumulés en poches dans les meulière, sont attribués au Stampien.

— Quaternaire : les limons des plateaux, d'épaisseur très variable (0 à plusieurs mètres), recouvrent le Sannoisien et les placages du Stampien. Ce sont eux qui permettent le développement de la couverture forestière.

La série tertiaire de la Montagne de Reims est donc presque exclusivement continentale ou dulçaquicole. Les seules influences marines se manifestent dans le Sparnacien (passées de sables marneux à faune saumâtre) et dans le Ludien (banc calcaire à faune marine acceptant bien une relative dessalure). Pour plus de précision, nous vous renvoyons à la bibliographie de Michel Laurain, géologue-spécialiste de la cuesta d'Ile-de-France.



Emergence karstique de la Montagne de Reims, VERTUS (Marne) (photo P. Gamez).

2. FONTAINE DE VERTUELLE

Emergence karstique

Il s'agit d'une source aménagée sortant d'un abri en béton, qui peut être remontée sur 300 m environ dans une galerie maçonnée. En amont, on arrive au bas du puits alimentant la ferme, situé dans la cour. Une salle de 3 m de diamètre, située immédiatement après, est occupée par un lac. L'eau sort d'une galerie

siphonnante reconnue sur 6 m de profondeur (R. Contant et M. Balliot, 1959).

La présence d'une émergence pénétrable prouve le développement de drainages karstiques dans la craie. L'aquifère crayeux est donc de type mixte «nappe + karst». Dans cet aquifère, la nappe assure la quantité (90 à 99% des eaux restituées) tandis que le karst détermine la qualité (essentiellement biologique) par les transits rapides qu'il autorise, rendant vulnérables aux pollutions les réserves (F. Calba, 1980; J. Rodet, op. cit.).

3. LES FAUX DE VERZY

Les Faux (de Fagus) de Verzy sont des mutants du hêtre, à faciès convulsé peu ordinaire. Ceux connus dans l'Est de la France semblent provenir de la même souche cultivée par les moines de Saint-Basle au VI^e siècle.

Nous allons laisser ici l'autocar pour gagner à pied, à travers bois, Verzy en faisant quelques observations sur le karst de la Montagne de Reims. Nous sommes dans une région à forte empreinte anthropique. Il s'agit d'une zone tampon importante de la guerre 14-18, et de nombreux ouvrages de défense affectent la morphologie (tranchées) ainsi que des «trous de bombes». Au siècle dernier, des travaux de captage des sources ont modifié aussi le relief de détail du massif, faisant suite aux anciennes exploitations à ciel ouvert (carrières de sable stampien rubéfié conservé en poches à la surface du plateau). Un limon sableux décalcifié et très dégradé constitue le sol de la forêt. Les fossés de drainage atteignent parfois un niveau d'accumulation à concrétions de limonite.

Dans la forêt, divers phénomènes karstiques ont été explorés par les spéléologues : La Fontaine Pleureuse, anciennement captée, est reconnue sur 300 m de conduits drainés se développant dans les sables et grès du Thanétien. A proximité, le système grotte du Creusin-fosse du Creusin offre une petite émergence du Thanétien dont les eaux se répèrent toujours dans la «Burge» thanétienne, avant de percer la craie sous-jacente par un puits de 12 m de haut, suivi d'un second de 3 m, puis d'un troisième de 6 m, avant que l'eau ne forme une petite rivière reconnue sur une vingtaine de mètres, à une profondeur de 34 m sous la surface. Son émergence semble être la Fontaine Paramelle, à Villers-Marmery.

La coupe entre les Faux et le village de Verzy laisse apparaître deux replats, le supérieur se développant dans le Lutétien, le second (sur lequel s'ouvre la Fosse Martin-Godard), doline-perte, donne par un puits de quelques mètres qui perfore la craie, dans un conduit reconnu sur plusieurs dizaines de m. Un traçage a montré une relation hydrogéologique avec la Fontaine de Verzy, toute proche.

Malheureusement, le conduit se comble peu à peu de sédiments tertiaires limitant de plus en plus la pénétration, malgré les travaux des spéléologues. La jonction humaine entre les deux cavités n'est donc pas encore acquise.

Dépassons maintenant le dernier replat, au contact Tertiaire/Craie et pénétrons dans le bourg de Verzy. Sur ce replat était construite une voie ferrée d'intérêt local joignant Verzy à Villers-Marmery. Aujourd'hui c'est la limite entre la forêt et l'urbanisation récente.

4. LA GRANDE FONTAINE DE VERZY

Cavité karstique pénétrable

L'ancien captage, abandonné au profit de l'A.E.P. intercommunal du Val de Vesle en raison des difficultés d'exploitation (qualité bac-



Fontaine de TREPAIL (Marne) (photo J. Rodet).

tériologique médiocre, ensablement de la crêpine, faible productivité...) est aujourd'hui transformé par le Parc Naturel Régional de la Montagne de Reims en refuge pour les spéléologues qui ont désormais toutes latitudes pour mener leurs travaux dans la magnifique rivière souterraine reconnue sur 560 m, au-delà d'un passage très bas et très humide. Ce passage bas montre une certaine stabilité du point d'émergence. Quelques dizaines de mètres après, le cours d'eau se reperd dans les craies pour rejoindre la nappe de la Vesle. Au-delà de la voûte «mouillante» d'entrée, le plafond se relève très rapidement, en même temps que le conduit devient haut et étroit, offrant un parcours sinueux, de type «méandre», venant buter en amont sur un siphon. Quelques mètres avant, en rive gauche, débouche un affluent à même morphologie



Grande Fontaine de VERZY (Marne). En amont de la zone d'exsurgence (photo D. Sarayet).

qui recoupe l'amont du ruisseau, au-delà du siphon. L'exploration est actuellement limitée par un siphon amont très étroit, à 350 m de l'entrée.

A proximité de ce court-circuit se développe un affluent important parcouru jusqu'à des obstructions d'eau et de sédiments tertiaires en cours de dégagement par les explorateurs. Au-delà nous devrions retrouver la galerie de la fosse Martin-Godard. Cette liaison fortement espérée, constituerait la première liaison spéléologique «perte-résurgence» réalisée au monde dans un matériau crayeux. L'ensemble de la cavité se développe dans la craie. Les seules parties facilement accessibles constituent les éléments d'un affluent reconnu sur quelques mètres. Sa confluence se réalise par un petit ressaut montrant deux niveaux de drainage. Le profil longitudinal très pentu qu'on observe dans cette percée hydrogéologique illustre un caractère fondamental des karsts crayeux des talus de cuesta tels que nous les avons définis dans un travail antérieur (J. Rodet, op. cit.).

5. LA FONTAINE DE TREPAIL

Nous ne nous arrêterons pas à Trépail, par manque de temps. Ce charmant village est le dernier de ce secteur qui soit encore alimenté par une émergence karstique. Les autres sont desservis par le Syndicat Intercommunal A.E.P. du Val de Vesle. Cette fontaine, la plus célèbre de Champagne, et peut-être de la craie du bassin de Paris, a été explorée au début du siècle par E.-A. Martel (1921), après que le conduit d'accès ait été ouvert sur une centaine de mètres par les carriers, en suivant le petit chenal d'écoulement de l'exsurgence. Dans les années 50, Queffelec découvre, par un passage supérieur, l'amont de la rivière (1959). La cavité développe actuellement 850 m topographiés, mais les exigences du captage ne permettent pas la visite de cette magnifique cavité. Avec notre arrivée dans le village d'Ambonnay, se termine notre visite de la Montagne de Reims, et le karst se doit bien de céder sa place (s'il veut conserver un pouvoir attractif) à un concurrent hors classe, fils lui aussi de cette magnifique côte : le Champagne !!!

J. RODET

BIBLIOGRAPHIE

CALBA (F.) - 1980 - Hydrogéologie du karst crayeux du Pays de Caux (France). Etude de deux bassins. Thèse 3^e cycle, Géologie, Paris VI, 189 pp. + ann.

CHAUVIN (J.) - 1980 - Classement des cavités du karst de la Montagne de Reims. *Spelunca*, 1980 (4), 159-162, Paris.

CHAUVIN (J.) - 1981 - Spéléoclimatologie de la Montagne de Reims, Marne. *Spelunca*, 1981, 4, 31-34, Paris.

CONTANT (R.), BALLIOT (M.) - 1959 - Etude hydrologique de la Montagne de Reims. *L'Inconnu Souterrain*, (10 avril 1959) & 11 (sept. 1959), Paris.

LAURAIN (M.) - 1979 - Coupe géologique synthétique de la Montagne de Reims, in *Les Faux de Verzy*, CRDP Reims, 1979, 10-11.

LAURAIN (M.) & al. - 1981 - Reims. Notice explicative et carte géologique au 1/50 000, BRGM Orléans, 34 p.

MARTEL (E.-A.) - 1921 - Les eaux souterraines de la craie, in *Nouveau Traité des Eaux Souterraines*, ch. 10-11, 334-373, Doin, Paris.

MEGNIEN (F.) & al. - 1977 - Vertus. Notice explicative et carte géologique au 1/50 000, BRGM Orléans, 24 p.

QUEFFELEC (C.) - 1959 - Les cavités de la craie dans le Bassin Parisien. *Grottes & Gouffres*, 12, oct. 1959, 0-15, Paris.

RODET (J.) - 1981 - Contribution à l'étude du karst de la craie : l'exemple normand et quelques comparaisons. Thèse 3^e cycle, Géographie, Paris I, 472 pp.

traçages et l'étude des cotes des sources (S.R.A.E.L., D.D.E.) ont permis de délimiter grossièrement les zones drainées au profit de l'Aroffe souterrain :

— au sud, une zone correspondant au bassin amont de l'Aroffe, avec un drainage général vers Autreville, de direction N.O.

— au centre, une zone à drainage subméridien en direction de la Moselle (différent de l'écoulement de surface qui se prolonge vers la Meuse, en direction N.O.).

La limite sud est marquée par une zone drainée au profit du Vair. La limite orientale, mal connue, correspond à une zone drainée en direction de la Côte de Moselle (sources de débordement, à débits faibles, au profit du Madon). La limite occidentale correspond à la Côte de Meuse, avec la percée de l'Aroffe inférieur dans la partie méridionale et l'entaille obséquente des ruisseaux des Bouvades et du Poisson dans la partie septentrionale.

La disjonction de l'écoulement de surface (vers la Meuse) et de l'écoulement souterrain (vers la Moselle), entre Autreville et Barisey, est un élément important pour la compréhension des captures de rivières sous influence karstique dans l'est du Bassin parisien.

L'écoulement souterrain de l'Aroffe a été mis en évidence par les différentes campagnes de traçages colorimétriques. L'exutoire permanent du système est matérialisé par les sources d'affleurements dans la partie septentrionale du bassin (la Rochotte, Pierre-la-Treiche, Bicqueley). Des exutoires temporaires fonctionnent dans le bassin, lors des périodes de crues, au niveau des pertes-



Grotte JACQUELINE (Pierre-la-Treiche, Meurthe-et-Moselle) (photo M. Louis).

exurgences (Trou du fond de la Souche, terres d'Autreville, Deuille de Crézilles, Deuille de Moutrot, Trou de Chahalot, Deuille d'Ochey).

Il existe donc une relation très nette entre l'écoulement souterrain de l'Aroffe et la fracturation du Dogger. En effet les fossés tectoniques de Colombey-les-Belles et d'Harmon-

ville sont certainement propices à une circulation karstique intense comme en témoignent les vitesses enregistrées lors des traçages. Il apparaît également que ces vitesses varient en fonction du régime hydrologique annuel : environ 100 m/h en basses eaux et 500 m/h en hautes eaux.

Présentation : P. GAMEZ-F. LETOUZE et M. SARY

ETUDE GEOCHIMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DE L'AROFFE ET DE L'AAR (Thèse 3^e Cycle : Michèle THILLAY)

Les études karstohydrologiques d'envergure étant encore rares en Lorraine, nous présenterons le cas du système souterrain de l'Aroffe étudié par étapes de 1972 à 1978.

L'Aroffe, seule rivière pérenne du plateau de Colombey-les-Belles, se perd à Gémonville et possède un cours aérien dirigé SE-NW vers la Meuse (en période de crue uniquement) et un cours souterrain permanent dirigé vers la Moselle. Le plateau calcaire de Colombey-les-Belles est limité :

— au nord par la Moselle de Toul à Sexey-aux-Forges,

— à l'est par le front de la côte bajocienne,

— au sud par la vallée du Vair,

— à l'ouest par la plaine argileuse de la Woëre très rétrécie au pied de la côte oxfordienne.

Il est formé par l'ossature des calcaires du bajocien inférieur et moyen, siège des circulations les plus actives.

Les traçages ont montré d'une part des communications souterraines certaines sur les distances élevées (près de 30 km), d'autre part des vitesses de transit souvent proches des vitesses des eaux de surface (260 à 650 m/h alors que l'on observe plus couramment des vitesses de 10 à 20 m/h; et surtout la complexité du système hydrologique qui se divise en deux unités de drainage présentant chacune une zone indépendante et une zone interconnectée.

L'étude géochimique des différents exutoires du système Aroffe/Aar, permet d'obtenir des éléments relatifs soit aux éléments chimiques, à leur évolution, à leurs origines proba-

bles, à la similitude de comportement de certains, soit aux points d'émergence, à leur individualité ou à leur parenté géochimique.

Ainsi il a pu être mis en évidence l'existence de deux groupes d'éléments : TAC, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, conductivité, d'une part évoluent à l'inverse du débit et ne présentent que de faibles variations, caractérisant ainsi le phénomène d'acquisition de la minéralisation en sous-sol; SO₄⁻, Cl⁻, Na⁺, K⁺, évoluent dans le même sens que le débit et avec des variations assez brusques traduisant une fonction de lessivage par ruissellement.

L'étude de la distribution des éléments met en lumière l'existence soit de plusieurs modes d'alimentation du système (pertes, infiltration directe, infiltration retardée), soit plus certainement d'une alimentation double ou multiple du système, en accord avec les résultats des traçages :

— L'étude du comportement du chimisme de crue, fonction des conditions hydrologiques, simple en période d'étiage quand l'alimentation du réseau est unique, plus complexe en période de hautes eaux quand l'alimentation est multiple, révèle toutefois l'importance du mécanisme de chasse d'eau.

— L'étude des corrélations entre éléments révèle l'existence de parentés géochimiques entre pertes et émergences. Les trois sources (La Rochotte, Bicqueley, Pierre-la-Treiche), peuvent être alimentées simultanément par l'Aar et l'Aroffe. Mais Pierre-la-Treiche est préférentiellement alimentée par l'Aar (teneurs comparables en Mg⁺⁺, Cl⁻, SO₄⁻, Na⁺), la Rochotte et Bicqueley sont principalement

alimentées par l'Aroffe et dans une moindre mesure par l'Aar (teneurs similaires en Mg⁺⁺, K⁺, SO₄⁻).

— L'étude de la distribution des conductivités caractérisant chaque cours d'eau superficiel par un élément du chimisme (l'Aar par les SO₄⁻, l'Aroffe par K⁺, la Bouvade par l'association SO₄⁻, TAC), confirme l'influence de l'Aroffe sur les trois exutoires et y rajoute celle de la Bouvade sur Bicqueley.

— L'étude des débits classés met en évidence la forte influence des trop-pleins de crue (deuille de Crézilles, trou de Chahalot) sur les débits de la Rochotte : la diminution de débit et la perte de charge provoquée par le fonctionnement de la deuille occasionnent une baisse sensible de la vitesse des eaux.

— Enfin l'étude de courbe de décrue et de tarissement de la Rochotte montre que :

- la faible valeur du coefficient Σ (0,22) est corrélative d'apports au karst par infiltration très étalés dans le temps (alimentation importante par pertes de cours d'eau aériens)

- la faible valeur du coefficient η (0,018) est corrélative d'une durée d'infiltration relativement longue

- le coefficient du tarissement (0,012) induit un volume dynamique important, sauf années sèches nombreuses et consécutives, et met le système à l'abri d'un risque de tarissement

- les coefficients k (0,167) et i (0,676) de Mangin permettent de comparer le système karstique de l'Aroffe à d'autres systèmes. Ils montrent que nous sommes en présence d'un système complexe d'assez grande taille, où l'alimentation par le ruissellement de surface est pérenne (Aroffe), importante et multiple (Aar, Bouvade). Cette complexité serait renforcée par la présence possible de plusieurs niveaux aquifères à nappe semi-captive (drainance) entrant en communication à la faveur de la tectonique.

Résumé : P. GAMEZ

UN EXEMPLE DE CORROSION SUR LES GALETS CARBONATES

La grotte Babja jama est située sur la rive gauche du fleuve Soca (Slovénie d'Ouest) dans un versant des calcaires du Crétacé supérieur très raide. L'entrée s'ouvre à 130 m au-dessus du niveau de la mer, 30 m au-dessus de la Soca, sous une paroi verticale.

La grotte est une exsurgence périodique. Lors de grandes pluies sur l'arrière-pays (sur le plateau calcaire, partiellement de flysch, s'appelant Banjsce), un ruisseau sort de la grotte avec un débit atteignant $2 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ (Habib, 1980).

Dans la zone de transition entre la grande galerie d'entrée et les galeries intérieures, basses et horizontales, le ruisseau souterrain dépose des bancs de graviers. Les graviers sont composés à peu près de 85-95% de galets de calcaire et 5-15% de galets de silex. La longueur moyenne des galets est 15,5 mm, l'indice d'aplatissement (d'après Cailleux) est 194, la sphéricité (d'après Krumbain) est 699 et l'éroussé (d'après Cailleux) 348. Ce sont des graviers récents, déposés et remués par le ruisseau souterrain actuel. Cela confirme aussi l'allure des galets, leur surface est lisse et luisante.

Le long de quelques parois sont conservées les couches de graviers alternant avec des couches de matière plus fines (sable et poudre) avec des quantités importantes de matière organique. Sur la base des analyses des spores et de C14, on a trouvé l'âge de ces couches : entre $317 (\pm 80)$ et $148 (\pm 80)$ ans. Maintenant, je ne parlerai pas de la question : pourquoi le ruisseau avait commencé de déposer des sédiments différents, de manière différente, il y a à peu près 150 ans. La question n'est pas tout à fait résolue.

Les analyses de ces sédiments, sédiments plus anciens si je peux les appeler ainsi, ont montré qu'il s'agit à peu près des mêmes graviers que ceux déposés par le ruisseau actuel (longueur des galets 13,6 mm, l'indice d'aplatissement 197, de sphéricité 700 et d'éroussé 209) (Kranjc, 1981).

Cependant, il y a une grande différence entre la surface des deux types de graviers. Comme je l'ai déjà dit, les cailloux des graviers actuels ont la surface lisse et luisante. Les cailloux des couches plus anciennes ont la surface rugueuse et mate, sillonnée, corrodée, loin de l'allure luisante des graviers actuels. C'est peut-être aussi la raison de la différence entre les indices d'éroussé de deux types de graviers, bien que par principe cela ne doit pas influencer leur arrondissement.

Il n'y a aucun doute que la surface des graviers plus anciens est altérée par la corrosion. Par l'observation minutieuse, on voit que la surface initiale des galets est préservée, sauf qu'elle n'est plus lisse mais rongée par la corrosion de telle sorte qu'elle est devenue rugueuse. Sur cette surface rugueuse se sont développés de petits sillons qui ressemblent

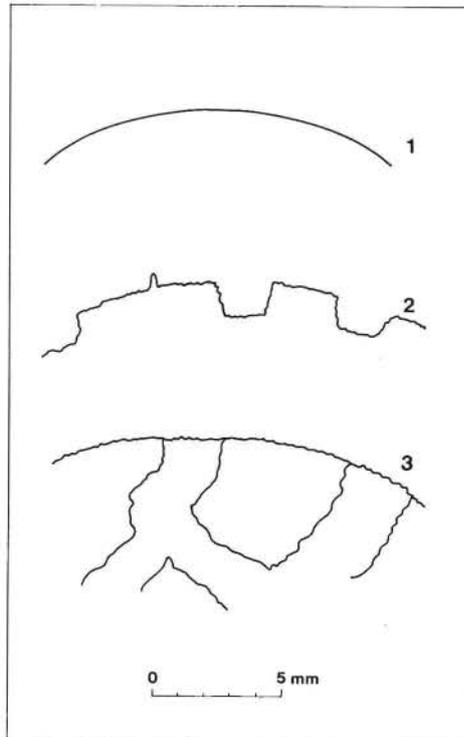


Fig. 1. L'aspect de la surface d'un galet sous binoculaire.

Graviers récents : surface lisse et luisante (1). Graviers anciens : surface rugueuse et corrodée. Coupe (2). Plan (3).

aux sillons de la bostryche sous l'écorce des arbres. Ces sillons sont très nets et il n'est pas difficile de les distinguer du reste de la surface corrodée. La profondeur de ces sillons est entre 0,5 et 3 mm et la largeur entre 1 et 4 mm. Sur quelques parties ou sur quelques galets, on a remarqué des filons de calcite en relief, les plus saillants étant de 0,7 mm au-dessus de la surface.

En s'appuyant sur l'évaluation de quelques galets (les plus grands et les plus faciles à observer), des mesures dans le sens strict ne pouvant être faites, je peux dire que la surface des galets a été corrodée après leur dépôt d'1 mm en moyenne.

De cette manière, j'ai observé les graviers de la plus haute couche, c'est-à-dire la plus récente, déposée il y a 150 ans environ. Si on

Remarque de P. RENAULT : il serait intéressant de faire une comparaison entre la corrosion des galets et celles des plaquettes artificielles.

recalcule l'abaissement de la surface des cailloux, par la corrosion, on obtient le chiffre de 0,7 mm par 100 ans ou plus exactement 6,6 mm par millénaire.

J. Kunaver (1978) qui a mesuré l'abaissement de surface sur les plateaux carbonatés haut-alpins (Kanin) dans le même bassin de Soca, a obtenu des valeurs entre 11 et 102 mm par millénaire (34 mm par millénaire en moyenne). Si on compare ces données avec celles obtenues sur les galets, on voit que les données des graviers sont en moyenne cinq fois plus petites que celles du karst haut-alpin.

Dans ce cadre, les résultats que j'ai obtenus me semblent assez réels, parce que l'eau du ruisseau souterrain qui submerge les couches des graviers et qui seule est responsable de la corrosion n'est jamais très agressive. D'autre part, le ruisseau ne coule pas en permanence, beaucoup moins de la moitié de l'année et ainsi les graviers sont exposés à la corrosion sur une durée de temps réduite.

Je ne pense pas du tout que les observations décrites peuvent représenter une méthode pour prouver ou même pour mesurer les taux de corrosion. Avec mon exposé, je veux seulement attirer l'attention sur le fait qu'il peut être intéressant d'étudier sommairement des données et des processus qu'on rencontre par hasard et qui peuvent être utiles pour la branche d'un certain point de vue ou pour un autre spécialiste.

D'autre part, mes observations sont similaires à la méthode d'évaluation de la corrosion par les «standard tablets» (Gams, 1981) ou par l'abaissement de surface sur les monuments des tombeaux de calcaire (Kupper, 1976). La différence est que les galets sont naturels, donc moins précis dans tous les cas que les objets artificiels.

Andrej KRANJC

REFERENCES

GAMS (I.) - 1981 - Comparative Research of Limestone Solution by Means of Standard Tablets. *Proc. 8 Intern. Congr. of Speleol.*, 1, 273-275, Americus (Georgia).

HABIC (P.) - 1980 - Krasko zaledje in moznosti zascite vodnih virov na Goriskem. *Geografske raziskave*, manuscript, 1-54, Institut za razis kovanje krasa, Postojna.

KRANJC (A.) - 1981 - Sediments from Babja near Most na Socil. *Acta carsologica* 10, 201-212, Ljubljana.

KUNAVER (J.) - 1978 - The Intensity of Karst Denudation in the Western Julian Alps and the Measuring of it. *Geografski vertnik*, 50, 33-50, Ljubljana.

KUPPER (M.) - 1976 - Méthode de mesure de l'érosion des calcaires. *Karst processes and relevant landforms* 127-135, Ljubljana.

CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET DE L'ABLATION KARSTIQUE DANS LE GEOSYSTEME COULMES - CHORANCHE

Jean-Jacques DELANNOY
 Groupe «Eau» LAMA
 Institut de géographie alpine
 Rue Maurice Gignoux 38031 GRENOBLE Cédex

La station expérimentale, installée dans la grotte de Coufin (cirque de Choranche, Massif du Vercors, Isère), s'intègre à l'étude du géosystème karstique des Coulmes, Choranche. Elle a pour finalité d'une part de définir les principaux caractères des écoulements karstiques (cours d'eau souterrain, infiltration...) et d'autre part de quantifier l'ablation karstique sous les conditions bio-climatiques actuelles.

Cette station étant d'installation récente (juin 1984 - mai 1985), peu de résultats seront analysés dans cet article. Par contre, la problématique et les approches méthodologiques seront développées.

PROBLEMATIQUE A L'ORIGINE DU SITE EXPERIMENTAL

Lors de nos travaux antérieurs (Delannoy, 1981) sur la dynamique karstique dans le Massif du Vercors, nous avons relevé, par l'analyse physico-chimique des eaux, lors des grosses crues consécutives à de sévères étiages, un accroissement de la minéralisation corrélativement à l'augmentation de débit (fig. 1).

Ce phénomène avait été bien observé par M. Pulina (Bournillon, Vercors, 1976) et par les hydro-chimistes (M. Bakalowicz, H. Paloc,...). Ce fait a souvent été attribué à une vidange partielle ou totale des eaux contenues dans les fissures, par effet «chasse d'eau». Devant de tels comportements, une question se pose : l'aquifère fissural possède-t-il des

Fig. 1. Courbe de la minéralisation des eaux lors de l'émergence de Bournillon (Vercors) en fonction du débit (PULINA, inédit).

○ = petite crue
 * = grosse crue des 14, 15, 16.09.1976 après écheresse estivale.

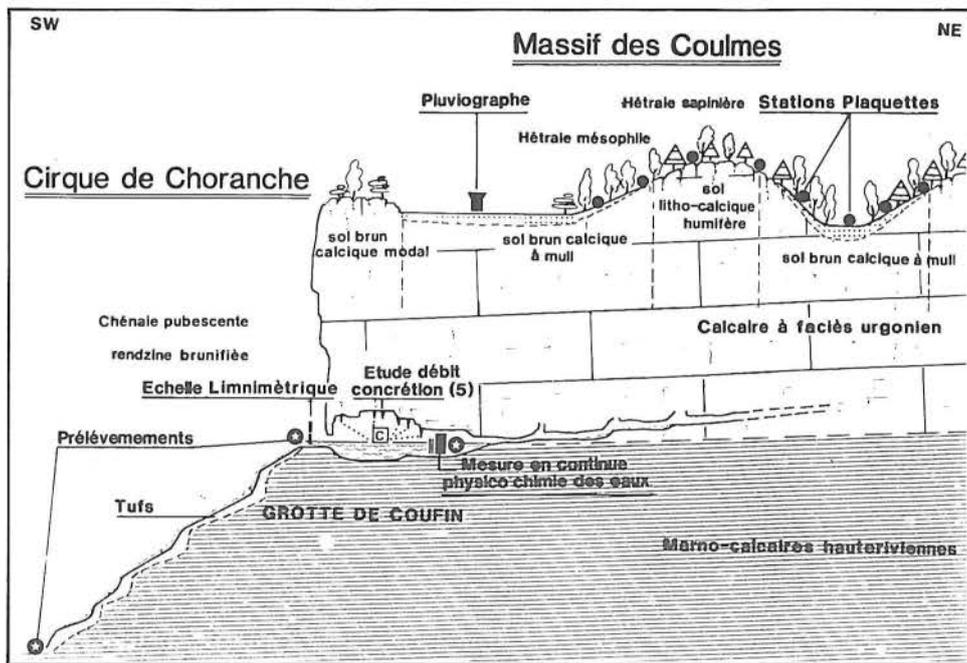
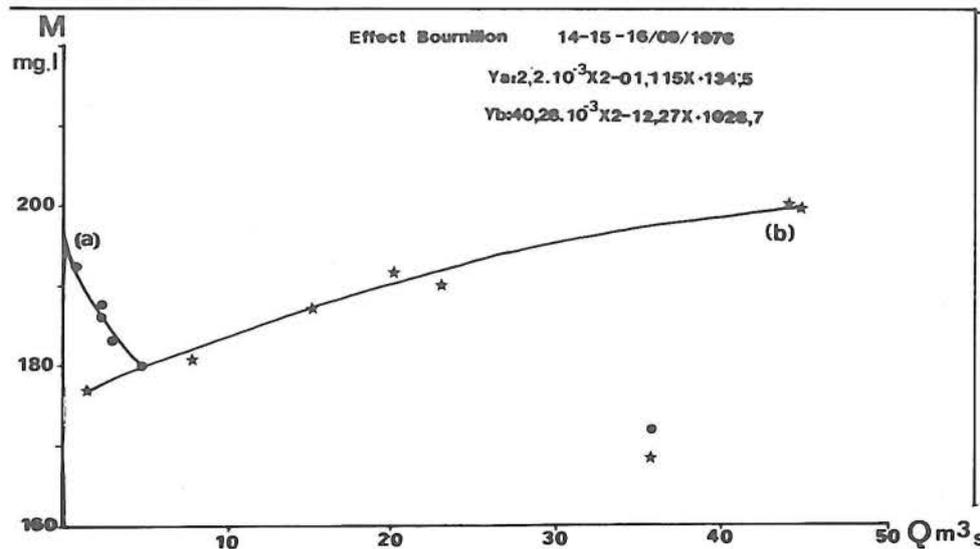


Fig. 2. Caractères biogéographiques du géosystème Coulmes-Choranche. Dispositif expérimental.

CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL COULMES-CHORANCHE

Pour tenter de résoudre ce problème, il fallait un domaine d'étude spatialement bien délimité et dans lequel on maîtrisait l'ensemble des paramètres litho-structuraux, hydro-géologiques, bio-pédologiques...

Le géosystème karstique Coulmes-Choranche obéit à ces critères (fig. 2).

— Une structure «simple et homogène» : anticlinorium des Coulmes caractérisé par les calcaires du Barremio-Aptien, à faciès urgonien, reposant sur les marno-calcaires hauteriviennes.

— Le plateau des Coulmes est affecté d'un pendage axial vers le SW et des petites ondulations synclinales accompagnées de failles qu'ont exploitées les circulations karstiques. Quatre circulations majeures drainent le massif des Coulmes-Choranche : Source Jallifier, Gournier, Coufin, Chevaline. Le domaine d'étude porte sur les trois derniers collecteurs dont on connaît à la fois les cheminements et les bassins d'alimentation.

— Le plateau des Coulmes se caractérise par une hêtraie mésophile (en exposition S. SE) ou plus couramment par une hêtraie-sapinière liée à des sols bruns calciques à Mull. En deçà de 800 m, la hêtraie est pénétrée par la chênaie pubescente associée au buis. Dans le cirque de Choranche, tourné vers le Sud, se développe une végétation sub-méditerranéenne.

— Le terme aval du géosystème étudié correspond aux dépôts des carbonates transportés par les eaux d'origine karstique et caractérisés par les cascades de tuf du cirque de Choranche (320 m de dénivelée pour 1,2 km). Seul site dans le Vercors, le cirque de Choranche permet de quantifier les dépôts de tuf,

Fig. 3. Dispositif expérimental dans la grotte de Coufin (Choranche, Vercors).

corrélatifs de l'ablation karstique à l'amont des émergences.

— A l'ensemble de ces paramètres, il faut noter l'accueil et l'aide du personnel de la grotte touristique de Coufin. Cette contribution n'est pas nouvelle, car, dès les années 65-68, J. Corbel, R. Muxart et M. Pulina avaient travaillé sur ce site.

3. LES EXPERIMENTATIONS

Plusieurs expérimentations sont actuellement menées dans le site :

A. Evaluation et Mécanismes de la dynamique karstique.

La première expérimentation repose sur deux méthodes complémentaires : l'analyse physico-chimique des écoulements souterrains et la méthode des plaquettes calcaires standardisées.

Sur le cours d'eau de la grotte de Coufin, ont été installées (mars 1985) des sondes afin de définir la température, le pH et la résistivité; celles-ci sont reliées à un enregistreur potentiométrique (fig. 3).

Ces données physico-chimiques, enregistrées en continu, sont corrélées aux variations de débit relevées quotidiennement aux échelles limnimétriques.

Conjointement à ces mesures, des prélèvements journaliers sont effectués aux émergences de Gournier, de Coufin et de Chevaline, ainsi qu'en contrebas des cascades de tuf.

Sur ces prélèvements sont définis le Ca^{2+} et le HCO_3^- . Les analyses à l'amont et à l'aval des cascades de tuf permettent d'évaluer le concrétionnement et ses variations spatio-temporelles en fonction du débit, des écarts de température, des cycles bio-végétaux... (fig. 4).

Un pluviographe a été installé dans le poljé de Presles, à l'aplomb du cirque de Choranche (mai 1985) afin de mieux appréhender l'hydrodynamique endokarstique.

En fonction des résultats nouvellement acquis, il est possible d'évaluer la dynamique karstique dans la région des Coulmes, durant l'hiver et le printemps 1984-1985.

Système Coufin-Chevaline

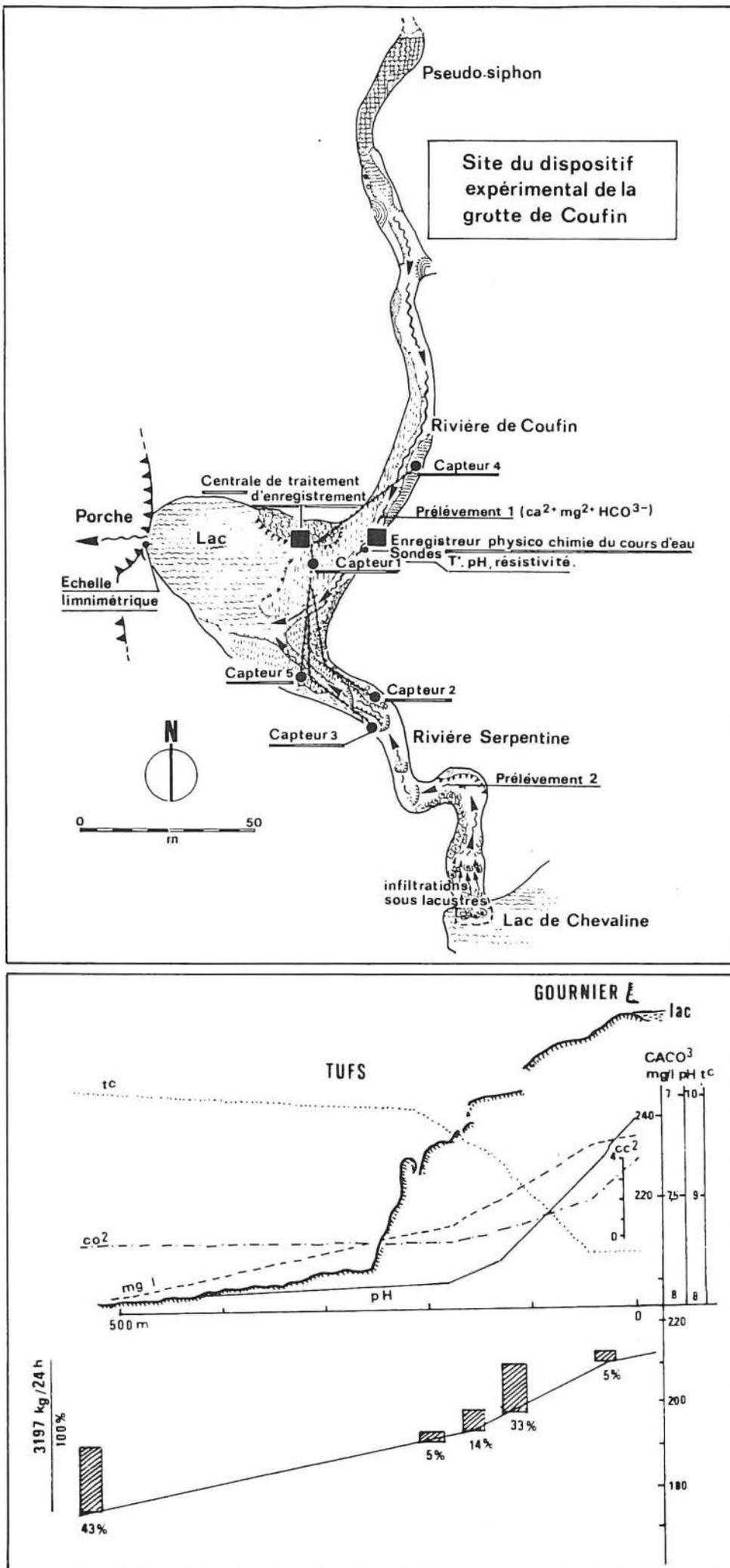
Superficie : 4 km².
Etiage hivernal (80 l/s)
 T Ca CO₃ = 195 mg/l - A : 50 m³/km²/an
Fusion nivale (500 l/s)
 T Ca CO₃ = 170 mg/l - A : 267 m³/km²/an

Système Gournier

Superficie : 8 km².
Etiage hivernal (150 l/s)
 T Ca CO₃ = 190 mg/l - A : 51 m³/km²/an
Fusion nivale (1,2 m³/s)
 T Ca CO₃ = 150 mg/l - A : 325 m³/km²/an.

A ce bilan global de l'ablation, calculé aux émergences, il est important de prendre en compte l'ensemble de paramètres qui conditionnent la dissolution et ses variations spatio-temporelles. La méthode des plaquettes calcaires est un des moyens de travailler de façon systémique sur la dynamique karstique. Par cette méthode, il est possible d'envisager l'action des eaux pluviales ou nivales dans les processus actuels ainsi que le rôle

Fig. 4. Quantification des dépôts de tuf au débouché de la grotte de Gournier (Vercors, Choranche). D'après Pulina, 1969 et Delannoy, 1981.



des horizons pédologiques et du contexte végétal dans la corrosion épikarstique.

Huit stations ont été installées sur le plateau des Coulmes selon des transects tenant compte de l'orientation vis-à-vis des précipitations et l'étagement bio-pédologique. Ces stations comportent au moins quatre plaquettes par contexte (ex : sur lapiés ou sous horizon numifère...) (fig. 5) et sont relevées semestriellement : avant et après l'épisode nival. Les pertes de poids sont exprimées en $gr/m^2/période$ (Delannoy, 1981, Bocquet Fr., 1984).

Afin de normaliser les conditions d'humectation des plaquettes et de pouvoir comparer les différentes stations, seront également utilisées des micro-stations conçues par G. Rovera 1985 (fig. 6). Ces micro-stations ont l'avantage de fonctionner comme de petits pluviomètres bien utiles dans la compréhension de la dissolution. Les premiers résultats dans les Coulmes, sous hêtraie-sapinière et sous horizon humifère (Mull), donnent des valeurs de 70 à 100 $m^3/km^2/an$, soit environ 50 à 60% de l'ablation totale.

Des levés morpho-pédologiques et phytosociologiques compléteront cette approche sur a dynamique karstique.

B. Etude de l'aquifère fissural à leurs émergences : les concrétions.

La seconde expérimentation dans le site de Coufin concerne les eaux qui cheminent par la fissuration. En fonction de la problématique posée et conjointement à l'étude des cours d'eau souterrains du géosystème des Coulmes, il s'avérait important de mieux connaître l'aquifère fissural et ses réactions vis-à-vis des conditions météorologiques ainsi que ses caractères physico-chimiques.

Dès 1961-1962, H. Roques a travaillé sur la physico-chimie des concrétions dans la grotte de Moulis (Ariège) afin d'appréhender les mécanismes de croissance des concrétions (Roques, 1963). Cette première expérimentation ne prenait pas en compte le régime hydrologique des stalactites. Le débit était évalué à partir de la quantité d'eau récoltée pendant un laps de temps pouvant aller jusqu'à plusieurs jours...

En 1969-1970, J.-L. Destombes s'intéressait au débit de concrétions situées dans la grotte du Sourcier (Ste Eulalie en Royans, Drôme) et relevait des oscillations semi-diurnes dans le débit et des variations de grande amplitude liées aux orages. Cette expérimentation limitée aux étés 69 et 70 n'a pu définir les régimes hydrologiques des concrétions étudiées.

Suite à ces travaux et considérant l'eau au débouché de la concrétion comme une double source d'information : information hydrodynamique (conditions d'écoulement, temps de réponse...) et information chimique (dissolution et transport des carbonates...), il semblait nécessaire, avant de travailler sur les paramètres physico-chimiques, de bien maîtriser les mécanismes hydrologiques propres aux infiltrations (si ceux-ci existent !). L'étude fine et en continu du débit des concrétions apparaissait être un des moyens de mener à bien ce travail. Ayant vérifié, dans le cas de la grotte de Coufin, que le volume de la goutte était quasi constant malgré les variations de rythme dans la chute des gouttes, l'estimation du débit de la stalactite pouvait passer par le comptage des gouttes.

Un dispositif expérimental a été conçu avec l'aide de la société A.T.E.I.S. Il est composé de cinq capteurs reliés à un micro-ordinateur et une imprimante (fig. 3). Les capteurs, fonctionnant comme des détecteurs de chocs, sont sensibles à la chute de chaque goutte d'eau tombant de la stalactite. L'information est transmise au micro qui imprime chaque

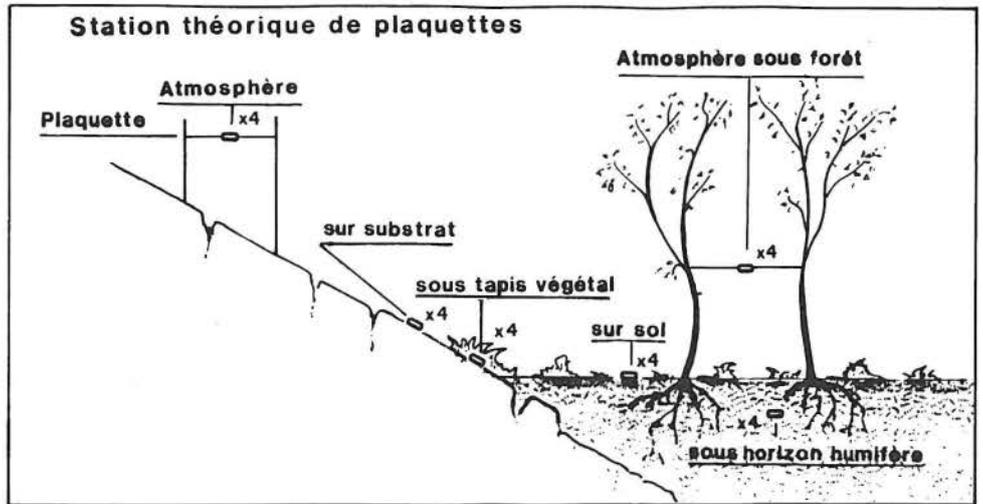


Fig. 5. Station de plaquettes dans le massif des Coulmes.

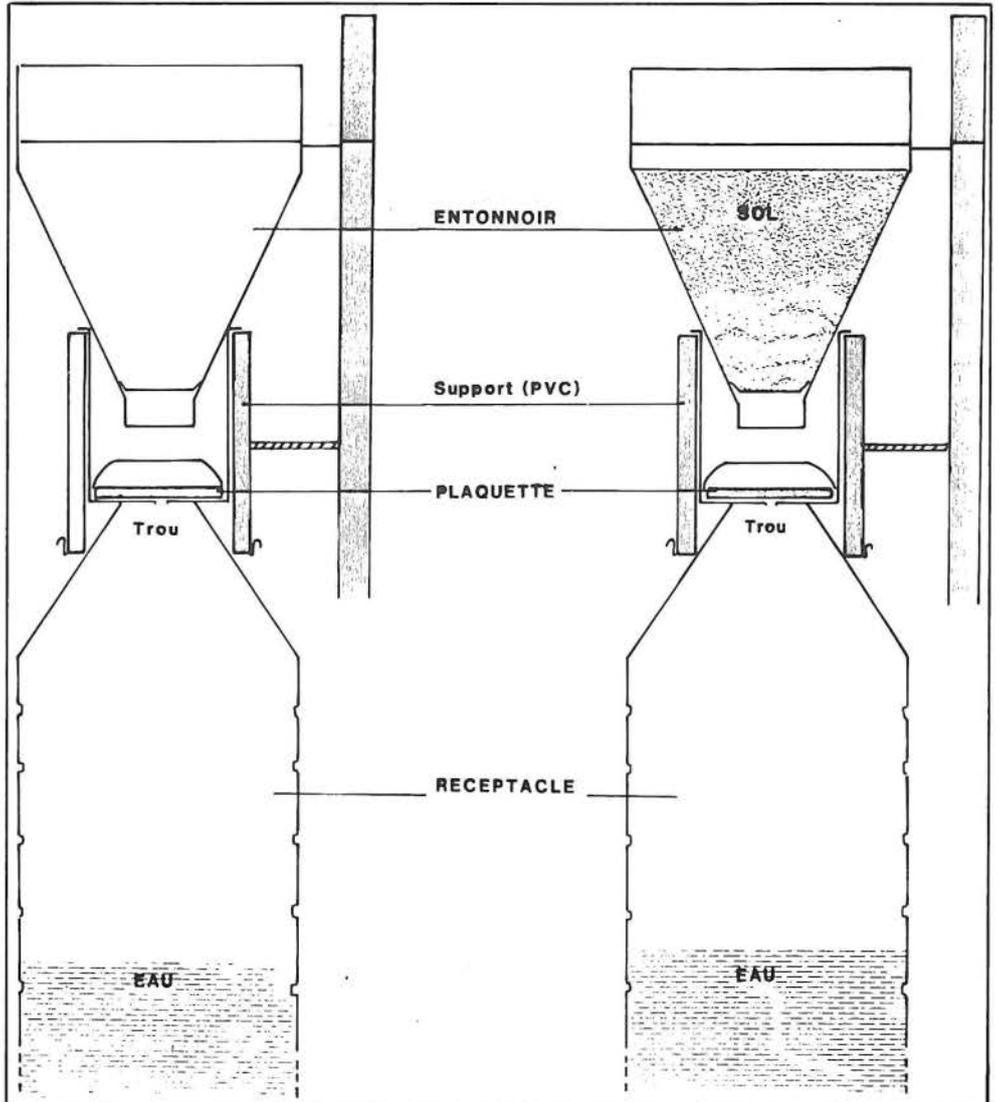
heure le nombre de gouttes par capteur. Les cinq capteurs ont été placés sous cinq concrétions de morphologie différente et présentant des comportements hydrologiques différenciés (observations oculaires). L'ensemble de ces informations est entré dans un fichier informatique à partir duquel sont sorties, dans un premier temps, les courbes de débit.

Les installations et les dépouillements sont trop récents pour donner des résultats porteurs d'hypothèse sur l'hydrologie fissurale.

Néanmoins, on observe déjà :

— l'existence d'un régime dans le débit des concrétions dont les variations ne sont pas

Fig. 6. Conception des micro-stations à plaquette calcaire standard.



aléatoires mais au contraire caractéristiques des conditions d'écoulement de chacune des concrétions étudiées : régime régulier (C1), régime accidenté de crues et décrues brutales et possédant des seuils intermédiaires ou maximaux qui semblent traduire la capacité maximale d'évacuation des eaux par le drain de la concrétion (C2 et C4...) (fig. 7);

— des comportements globaux similaires sur de grandes périodes (un à deux mois). Cependant, les temps de réponse aux épisodes climatiques majeurs peuvent être très différents d'un capteur à l'autre : temps de réponse d'un mois et demi à deux mois pour le C1 : de deux à trois jours pour C3 et C5...;

— des oscillations périodiques diurnes, durant le printemps, correspondant aux fontes nivales quotidiennes;

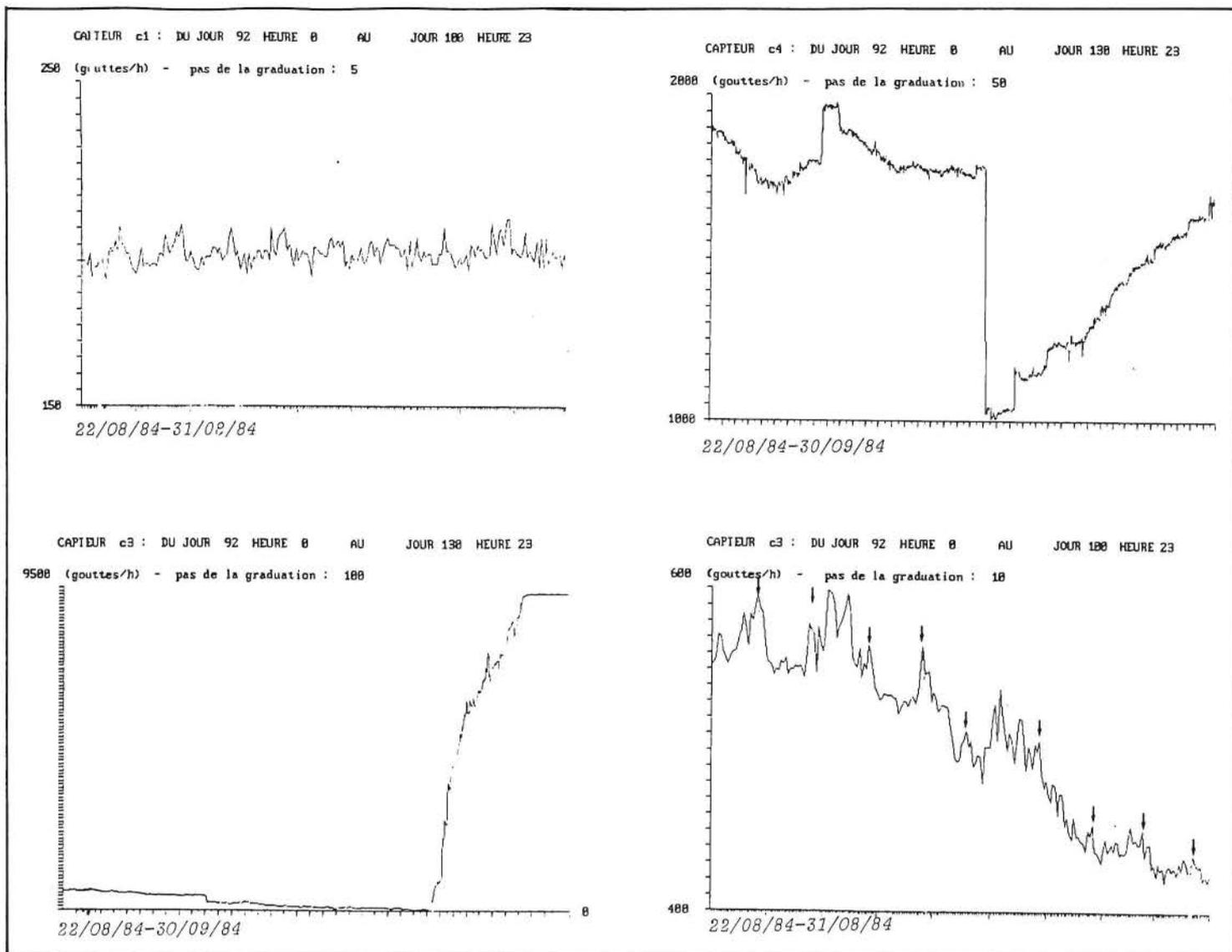


Fig. 7. Courbes de débit des concrétions.

— des oscillations périodiques diurnes ou semi-diurnes en toute saison...

Ce ne sont que des observations très ponctuelles et partielles qui ont le mérite de guider nos futures investigations et interprétations. Une fois, si cela est possible et significatif, les traits hydrologiques des cinq concrétions définis, la seconde étape de l'expérimentation pourra débiter: étude des paramètres physico-chimiques des eaux fissurales.

L'ensemble de ces installations devraient nous permettre de mener une étude systématique sérieuse du karst en prenant en compte aussi bien les caractères hydrodynamiques, les conditions bio-climatiques que le cadre morpho-structural.

En conclusion, nos remerciements pour le déroulement de cette expérimentation vont:

- aux conseils scientifiques de l'Institut de Géographie Alpine et de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble qui m'ont attribué des crédits de recherche;
- au Centre d'Etude de la Neige de Saint-Martin d'Hères, pour son aide matérielle;
- à Monsieur A. Thomas pour son aide critique, à Monsieur R. Seassau de la société A.T.E.I.S. qui a toujours été disponible et ouvert à nos projets, à Monsieur G. Mantovani qui m'a permis de travailler dans la grotte de Coufin, à Monsieur G. Clot, Monsieur M. Milesi et M. J. Sentis qui prélèvent quotidiennement les échantillons d'eau, à Monsieur Penom qui s'occupe du pluviographe de Presles, à Messieurs F. Bocquet et A. Gelat pour leur aide dans la conception des programmes informatiques.

Jean-Jacques DELANNOY

BIBLIOGRAPHIE

- BAKALOWICZ (M.) - 1979 - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse de Doctorat d'Etat*. P. M. CURIE. PARIS 269 p.
- BOCQUET (F.) - 1985 - Dynamique karstique d'un haut massif alpin: la chaîne des Aravis. Méthodologie et comparaison avec d'autres massifs montagneux. Colloque international de Karstologie appliquée, Liège, Belgique. *Ann. Soc. Géol. Belgique*.
- BOTTNER (P.) - 1972 - Evaluation des sols en milieu carbonaté dans une séquence bio-climatique méditerranéenne alpine du Sud de la France. *Soc. Géol. Mémoires* n° 37.
- DAVIS (S.N.) et MOORE (G.W.) - 1965 - Semi-diurnal movement along a bedro joint in Wool Hollow Cave, California. *Bull. Nat. Speleological Society, USA*, t. 27, Fasc. 4, p. 133.
- DELANNOY (J.-J.) - 1981 - Le Vercors septentrional: le karst de surface et le karst souterrain. *Thèse de 3^e cycle*. Grenoble. *Inst. Géogr. Alp.*
- DESTOMBES (J.-L.) - 1970 - Inédit.
- MANGIN (A.) - 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères. *Thèse Doct. d'Etat*. Dijon. *Annales de Spéléologie* 29-3; 30-1.
- MUXART (T.) - 1978 - Note sur l'agressivité potentielle des eaux de percolation de différents sols dans le Vercors en fonction de la nature de la couverture végétale. *G.A.* N° 23, p. 173-182.
- PALOC (H.), BONIN (H.), BONNET (M.), THIERY (D.) - 1979 - Etude par modèles mathématiques des écoulements en milieux karstiques. Application au karst de l'Hortus. *B.R.G.M. Départ. Hydrogéologie*.
- ROQUES (H.) - 1963 - Observations physico-chimiques sur les eaux d'alimentation de quelques concrétions. *Ann. Spéol.* t. 18, fasc. 4, p. 337-404.

Question de R. LAURENT: quelle est la fréquence des relevés pluviométriques sur le plateau de Coulmes? Ne craignez-vous pas qu'en période estivale l'évapotranspiration ait une influence sur la dissolution des plaquettes?

Réponse: les appareils installés depuis 1 mois sont relevés une fois par semaine. Dans les secteurs moins accessibles, les réceptacles seront reliés par un tuyau à des bouteilles enterrées afin d'éviter les pertes par évapotranspiration.

Question de A. WEISROCK: y a-t-il corrélation entre les débits mesurés et l'accroissement des concrétions?

Réponse: la mesure de l'accroissement des concrétions est l'objet de la 2^e phase de l'expérimentation. Néanmoins, il semble qu'elle soit de l'ordre de 1 mm/an (différence de couleur entre concrétions anciennes noyées par les eaux du lac de Coufin et concrétions nouvelles formées depuis sa vidange).

Question de R. MAIRE: la vitesse de transfert des eaux fissurales est-elle la même que celle des grands drains en période de fusion nivale (observation d'une pointe de crue en milieu de nuit)?

Réponse: un phénomène de temporisation est réalisé au niveau des fissures en corrélation avec la transmission des pressions.

MESURE DE LA DECARBONATATION DANS LES SOLS FERSIALLITIQUES DU MASSIF DE LA SAINTE-BAUME BOUCHES-DU-RHONE - VAR

Jean MAZET
UA 903 CNRS

29, rue Robert Schuman 13621 AIX-EN-PROVENCE

Nous avons réalisé à l'UA 903 du CNRS, à Aix-en-Provence des mesures de dissolution dans le karst superficiel du massif de la Sainte-Baume (BdR-Var), au moyen de la méthode des plaquettes.

40 plaquettes ont été réparties sur 5 stations expérimentales, dans des sols fersiallitiques recouvrant différents substrats carbonatés.

DESCRIPTION ET CARACTERISTIQUES DES PLAQUETTES

Les plaquettes ont été taillées dans une carotte de forage en calcaire urgonien. De ce fait elles ont la forme d'une demi-lune de 9,5 cm de diamètre et de 1 cm d'épaisseur environ.

Le calcaire urgonien a une teneur en CaCO₃ de 99,9% et une porosité de 2,9%.

CONDITIONS DE L'EXPERIENCE

Ce calcaire dur nous place dans les conditions d'une dissolution pelliculaire. Par conséquent nous avons respecté le temps nécessaire au déroulement complet du processus en adoptant des temps d'exposition qui soient des entiers du cycle climatique.

C'est ainsi qu'une première série de plaquettes a été exposée un an et une seconde série deux ans.

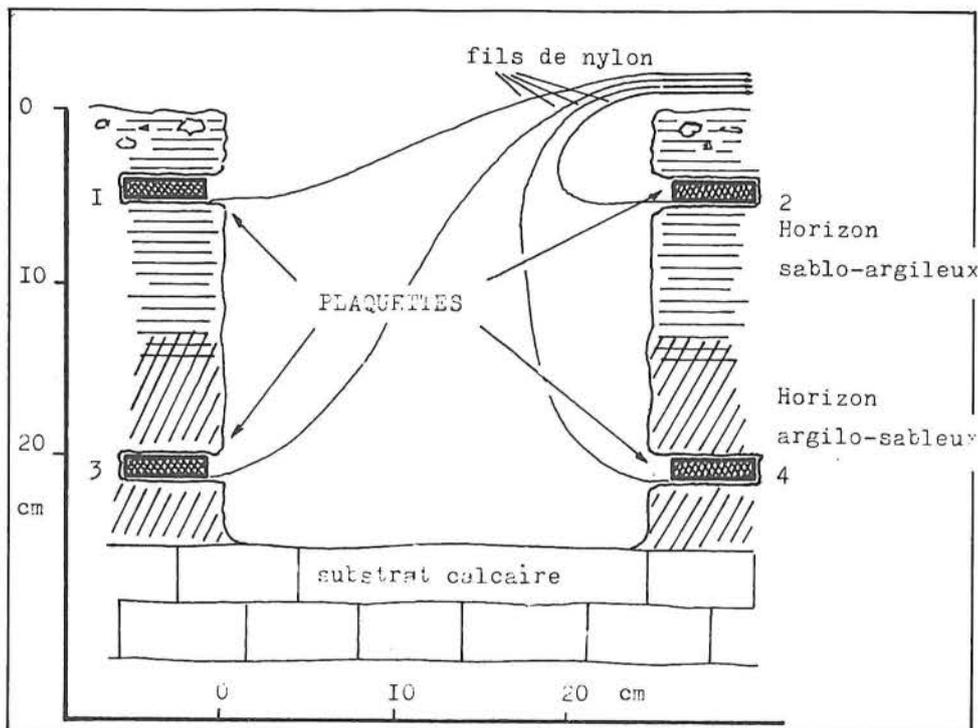


Fig. 1. Installation des plaquettes de calcaire dans un sol fersiallitique du massif de la Ste Baume (BdR-Var).

Tableau 1. Perte de poids des plaquettes en % de leur poids initial.

SÉRIE I (exposition : 1 an)						
Profil	Stations					
	Citerne I	Citerne II	Lare	Hôtellerie	Béguines	
Haut	2,0 - 2,6	1,6 - 1,5	1,2 - 1,3	0,7 - 1,0	0,9 - 1,0	
Bas	0,6 - 1,1	1,8 - 2,2	1,8 - 2,3	2,1 - 2,0	0,5 - 1,4	
	2,3	1,5	1,2	0,8	0,9	
	0,8	2,0	2,0	2,0	0,9	
	1,5	1,7	2,6	1,4	0,9	

SÉRIE II (exposition : 2 ans)						
Profil	Stations					
	Citerne I	Citerne II	Lare	Hôtellerie	Béguines	
Haut	3,8 - 3,7	5,3 - 4,9	1,0 - 1,6	1,3 - 1,2	1,3 - 1,0	
Bas	4,0 - 3,1	3,5 - 4,5	1,0 - 0,5	1,7 - 1,2	1,2 - 0,6	
	3,7	5,1	1,3	1,2	1,1	
	3,5	4,0	0,7	1,4	0,9	
	3,6	4,5	1,0	1,3	1,0	

INSTALLATION DES PLAQUETTES

(fig. 1)

Sur chaque station, les deux séries sont placées à quelques mètres de distance l'une de l'autre.

Nous avons mis les plaquettes dans des logements horizontaux creusés dans le profil pédologique à partir d'un petit puits qui est ensuite rebouché.

Les plaquettes sont placées à chaque extrémité du profil pour tenir compte des caractéristiques de chaque horizon.

A chaque niveau, les plaquettes sont doublées pour améliorer la précision de la mesure.

Les plaquettes sont reliées à l'extérieur par un fil nylon pour faciliter leur repérage à l'extraction.

Toutes ces opérations ne peuvent se faire dans de bonnes conditions qu'avec un sol humide et souple, ce qui en région méditerranéenne exclut la saison sèche estivale et éventuellement l'hiver aux altitudes élevées, les jours de gel.

	Citerne II	Citerne I	Hôtellerie	Lare	Béguines
Composition des litières	Résineux		Chenaie		
pH/eau litière	4,55	5,25	5,85	5,45	6,60
pH/eau sol	6,70	7,00	7,35	7,37	7,40
érosion 2 ^e série	4,5	3,6	1,3	1,0	1,0

Tableau 2. Corrélation perte de poids en % pH eau du sol et des litières.

DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE

Les mesures ont été faites entre mai 1981 et juin 1983, malheureusement sous une pluviosité anormalement faible pour la région : de l'ordre de 700 mm/an, alors que la moyenne est de 900 mm/an.

ETAT DES PLAQUETTES A L'EXTRACTION

A l'extraction, les plaquettes présentaient des plages discontinues de couleur rouge, correspondant aux zones où le sol avait adhéré. Par conséquent le processus pelliculaire ne s'est pas exercé sur la totalité de la surface des plaquettes.

A la loupe binoculaire (grossissement de 30), nous n'avons pas observé de modification notable de l'état de surface des plaquettes.

LES RESULTATS

Les pertes de poids des plaquettes sont exprimées dans le tableau 1 en % de leur poids initial. Nous avons donc dans chaque station 4 valeurs de dissolution par série. Sur le tableau, nous avons porté dans une colonne supplémentaire, la moyenne des dissolutions dans chaque horizon pédologique et la moyenne générale de la station.

L'examen du tableau nous permet 4 remarques :

1. Il y a d'abord des différences de valeurs entre plaquettes situées dans le même horizon pédologique d'un même emplacement. C'est à notre avis la conséquence du contact plus ou moins parfait du sol avec la plaquette. Cette différence représente donc la précision de la mesure.

2. Le profil de la décarbonatation n'est pas net. Si dans certains profils la dissolution est un peu plus forte en profondeur, c'est l'inverse dans d'autres. On pourrait penser que la rétention d'eau étant plus forte dans l'horizon inférieur argileux, la dissolution serait plus importante, mais cela n'apparaît pas ici.

3. Si l'on compare les deux séries de mesures, on remarque que la dissolution n'est pas proportionnelle au temps d'exposition sur

toutes les stations. En fait les deux séries de mesures ne sont pas rigoureusement comparables car elles ne sont pas situées exactement aux mêmes endroits et il est possible que les conditions de dissolution soient différentes. Ce qui montre bien l'hétérogénéité de la décarbonatation dans les sols.

4. Nous ferons enfin une dernière remarque qui est propre au massif de la Ste Baume : la décarbonatation varie fortement à l'échelle régionale. Dans les deux séries, elle est plus forte sur le site de la Citerne, à 400 m d'altitude que sur le plateau des Béguines à 700 m. Traduite en millimètres par millénaire cela représente à la Citerne une dissolution de 7,9 mm/millénaire pour 1,6 mm/millénaire aux Béguines.

CORRELATION DECARBONATATION/ MILIEU PHYSICO-CHIMIQUE

Nous avons essayé de corrélérer les résultats de la décarbonatation à quelques paramètres physico-chimiques mesurés sur chaque station.

C'est avec le pH des sols que la corrélation est la plus nette comme le montre le tableau 2. Mais on remarque que le pH des sols est aussi en rapport avec le pH des litières dont la composition varie.

CONCLUSION

Sur le plan méthodologique, nous avons retenu deux règles essentielles :

1. Il faut éviter au maximum de perturber le sol lors de la mise en place des plaquettes car la corrélation obtenue avec les pH montre que la décarbonatation est surtout sensible aux caractères physico-chimiques du milieu. Notre technique de pose représente un bon compromis qui n'est toutefois pas applicable dans des sols profonds.

2. Le contact plaquette-sol doit être aussi parfait que possible pour que la dissolution pelliculaire puisse s'exercer pleinement. Il faut donc disposer d'un appareillage aux dimensions des plaquettes pour creuser les logements et adopter un temps d'exposition qui soit suffisamment long pour que le plasma du sol puisse adhérer aux plaquettes. C'est pour cette raison que la méthode des plaquettes ne nous paraît pas indiquée pour des mesures de courte durée.

Jean MAZET

Remarque de J. NICOD : cette expérience aboutit à une conclusion quasi négative, mais elle a été menée pendant une série d'années hydrologiquement déficitaires et dans le cadre de recherches universitaires de durée obligatoirement limitée. Par ailleurs, je voudrais rappeler que la vitesse de l'ablation karstique s'exprime en mm/1000 ans ou en m³/km - /an. Il s'agit soit de l'ablation totale mesurée aux résurgences, soit de l'ablation partielle en différents points du karst. C'est la méthode des plaquettes qui a justifié (à l'instigation du Professeur Gams) pour objet de mesurer l'ablation ponctuelle, en surface ou en subsurface. Il est évident qu'il ne faut pas confondre les résultats obtenus par les 2 méthodes de mesures.

Question de C. DROGUE : quelle dispersion des résultats obtient-on lorsqu'on augmente dans un même sol (avec les mêmes conditions d'humidité) le nombre de plaquettes ? Peut-on alors espérer exprimer les résultats en termes de probabilités ?

Réponse : la dispersion est très variable. Elle est liée au contact sol/plaquette. Pour une plus grande représentativité des résultats il faudrait augmenter le nombre de plaquettes ; cela devient alors une question d'expérimentation.

Remarque de P. RENAULT : l'intérêt des études de plaquettes est d'apporter des données statistiquement analysables. Un minimum de 5 plaquettes mises en rapport avec les données pédologiques locales paraît nécessaire.

Remarque de J. VAUDOUR : les fosses pédologiques de M. Mazet correspondent à différents profils de sols rouges fersiallitiques ou de lithosols calciques, dont la texture a été analysée en laboratoire. Leur structure est caractéristique d'une dessiccation intense (observations réalisées pendant une sécheresse de 3-4 ans). On peut différencier 2 types de profils :

— les sols à smectite prédominante, fortement fissurés et craquelés, dans les sites les plus élevés (700 m), où il ne s'est rien passé ;
— les sols à kaolinite, à fraction fine abondante, où le pH acide a entraîné une dissolution relativement forte.

Ces résultats seraient probablement différents pour une période humide (avec gonflement des argiles).

Remarque de C. EK : les mesures d'ablation des plaquettes calcaires sont beaucoup plus difficiles à interpréter dans le sol que dans l'atmosphère libre ou en rivière, à cause de la grande variabilité des conditions locales (racines, terriers, tassements locaux...). D'où le grand mérite des mesures de J. Mazet. On trouvera des réponses à la question de M. Drogue au sujet de la signification statistique des mesures dans divers travaux de M. Kupper (1975, 1979).

MESURES DE DEGRADATION DE ROCHES CARBONATEES ET D'ACCROISSEMENT DE STALAGMITES

F. CUCCHI*
F. FORTI**
S. STEFANINI*
F. ULCIGRAI*

*Institut de géologie et paléontologie, Université de Trieste
Piazzale Europa 1, 34127 TRIESTE ITALIA

**Commission Grottes E. Boegan, Soc. alpina Giulie
Via Macchiavelli 17, 34100 TRIESTE ITALIA

Afin d'obtenir des mesures quantitatives et réelles de la vitesse de la dégradation superficielle de roches carbonatées, on a installé de nombreuses stations de mesure situées dans différentes localités du Karst (Carso) de Trieste et de la région Frioul-Vénétie Julienne.

La méthodologie, déjà décrite dans des travaux précédents (Forti F., Stefanini S., 1981; Forti F., 1983), consiste, en résumé, à mesurer par un instrument spécial (micromètre à friction monté sur trépied), l'abaissement des surfaces. Dans le but d'exécuter des mesures périodiques avec la plus grande précision, l'instrument a été posé dans chaque station, sur 3 clous en acier inoxydable polis, disposés en triangle équilatéral, plantés et cimentés dans la roche (2 clous sont à tête hémisphérique et le troisième est à tête plate). Toutes les pièces ont été construites au tour de précision, étalonnées et contrôlées. Les mesures ont toujours été exécutées par le même technicien (F. Forti), de façon à éviter, vu leur extrême délicatesse, des erreurs d'évaluation subjective.

Les stations ont été rationnellement situées, de façon à obtenir un ensemble de données pour l'analyse de calcaires lithologiquement différents ou semblables, mais dans différentes situations géomorphologiques.

Quelques stations ont été installées dès 1979, d'autres l'ont été par la suite; actuellement, il y a 21 stations opérationnelles, dont 12 sur le Karst Triestin (8 dès 1979 et 4 dès 1984; fig. 1); les autres se trouvent dans plusieurs localités de la région Frioul-Vénétie Julienne.

En moyenne, les mesures ont été effectuées tous les six mois et quelques résultats préliminaires ont déjà fait l'objet d'une communication (Forti F., 1984).

Dans ce travail, nous nous sommes fixé le but de tirer quelques conclusions, aussi bien sur la base des mesures exécutées pendant 6 années que d'après les données des analyses chimiques et pétrographiques des lithotypes étudiés.

Dans le même contexte, nous illustrerons aussi les résultats obtenus jusqu'à présent par la même méthodologie et concernant l'accroissement de 4 stalagmites de la Grotta Gigante (Grotte Géante), la plus grande cavité du Karst Triestin (Forti F., 1982); ces stalagmites ont été soumises à un égouttement continu avec différentes fréquences et hauteurs de chute des gouttes.

LES MESURES DE DEGRADATION SUR LE KARST DE TRIESTE.

On décrit les caractéristiques et on analyse les résultats des mesures exécutées dès 1979 uniquement sur le karst triestin, puisque les données ne sont pas encore très significati-

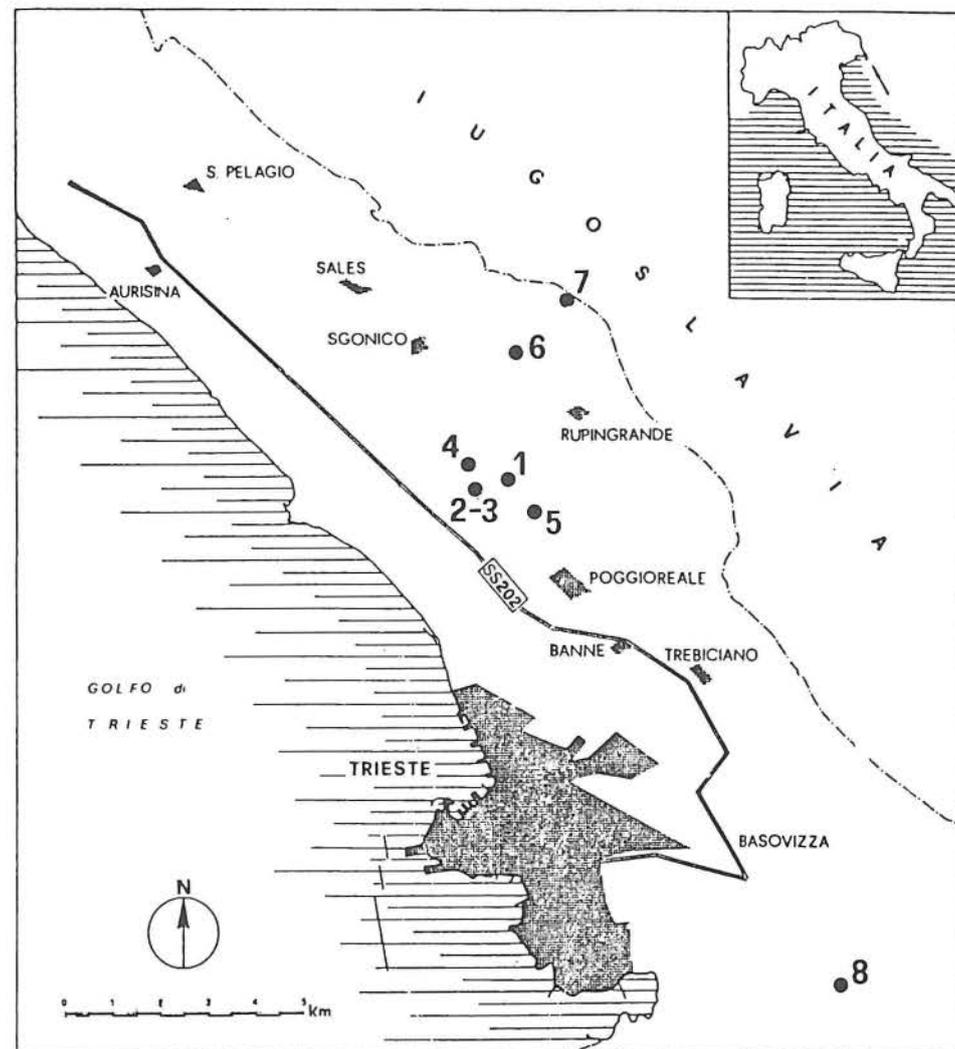


Fig. 1. Position des huit stations de mesure sur le karst de Trieste examinées

ves en ce qui concerne les autres stations.

Le tableau 1 illustre les paramètres chimiques, pétrographiques ainsi que les données d'abaissement enregistrées.

Station n°1. Cette station est située près de la Grotta Gigante, 255 m au-dessus du niveau de la mer, à côté d'une station météorologique; elle se trouve sur un affleurement incliné de 15° vers le Sud, entouré par une végétation clairsemée et en général arbustive.

La roche (calcaires à Rudistes du Crétacé sup.) est caractérisée pétrographiquement par une mosaïque de fond micritique avec des bioclastes sparitiques de dimensions considérables (wakestone selon Dunham; biomicrocrite selon Flok).

D'après l'analyse chimique, la roche est composée pour 92,53% de calcite, pour 2,38% de dolomie et pour 5,09% de résidu insoluble (en HCl 4%).

Il faut signaler que les pourcentages de calcite et de dolomie ont été obtenus des quantités de Ca et de Mg, calculées par spectrophotométrie en AA; cela n'empêche donc pas que ces éléments soient présents aussi sous forme d'autres minéraux, surtout en ce qui concerne le Mg quand il est présent en quantités si modestes comme celles révélées dans les échantillons calcaires.

La station a été installée le 7 janvier 1979 et d'après la dernière mesure, exécutée le 21 avril 1985, on a enregistré un abaissement global de 0,175 mm, qui correspond à un

STAZIONE	PETROGRAFIA	CHIMISMO			PERIODO DI MISURA	PRECIPITAZIONI COMPLESSIVE (mm)	ABBASSAMENTO COMPLESSIVO (mm)	ABBASSAMENTO ANNUALE (mm)	ABBASSAMENTO UNITARIO (mm / 1000mm)
		% CALCITE	% DOLOMITE	RESIDUO % INSOLUB.					
1	biomicrite	92.53	2.36	5.09	7.1.79 + 21.4.85	8525	0.175	0.028	0.020/1000mm
2	biomicrite	91.05	2.50	6.45	8.4.79 + 25.4.85	7960	0.160	0.028	0.020/1000mm
3	biomicrite	91.05	2.50	6.45	8.4.79 + 25.4.85	7960	0.080	0.013	0.010/1000mm
4	biomicrite	92.63	2.37	5.00	16.4.79 + 21.4.85	7920	0.205	0.034	0.025/1000mm
5	intrabio- micrite	91.95	2.85	5.20	25.4.79 + 25.4.85	7860	0.165	0.027	0.021/1000mm
6	dolomite	10.13	85.65	4.22	1.5.79 + 20.4.85	7820	0.130	0.013	0.010/1000mm
7	micrite fossilifera	91.70	2.82	5.48	25.3.79 + 20.4.85	7980	0.175	0.029	0.021/1000mm
8	biomicrite ricristall.	93.00	2.07	4.93	14.4.79 + 28.4.85	7920	0.100	0.016	0.012/1000mm

Tableau 1. Mesures de dégradation.

ANNO	precipitazioni in mm												TOTALE	temperature in °C		
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC		MEDIA	MIN	MAS
1979	226.6	120.7	218.4	138.3	21.6	147.6	76.7	113.3	101.5	126.2	144.8	99.6	1535.3	11.9	-13.3	+33.1
1980	60.0	27.2	113.8	79.6	49.2	167.2	105.2	138.0	128.8	250.4	257.6	117.2	1494.2	11.0	-9.5	+33.4
1981	46.8	29.0	112.8	67.8	145.4	99.8	63.4	52.4	217.4	183.4	32.2	273.4	1323.8	11.8	-7.7	+32.7
1982	42.2	18.8	94.4	21.2	206.0	181.0	41.2	125.2	112.8	276.6	141.2	154.6	1415.2	12.4	-8.3	+33.7
1983	37.8	80.2	97.0	62.0	173.6	85.4	55.8	40.6	62.6	140.6	24.4	171.0	1031.0	12.2	-7.7	+33.9
1984	173.0	114.8	66.6	66.4	108.2	115.4	63.4	161.4	181.0	130.4	84.2	149.4	1411.2			
1985	138.4	64.0	113.0													

Tableau 2. Observations météorologiques

abaissement moyen annuel de 0,028 mm. La pluviosité totale pendant ses six années est de 8525 mm, avec une moyenne annuelle de 1353 mm. L'abaissement peut donc être considéré égal à 0,020 mm pour 1000 mm de précipitation (0,020/1000 mm) si l'on admet des abaissements directement proportionnels aux précipitations.

Station n°2. Cette station est située aux alentours de Borgo Grotta Gigante, 260 m au-dessus du niveau de la mer et se trouve sur un affleurement incliné de 10° vers le SSE, entouré par une végétation arbustive assez épaisse.

Le rocher (calcaires à Rudistes du Crétacé sup.) est pétrographiquement caractérisé par une mosaïque de fond micritique avec plusieurs petits résidus organiques et rares vacuoles cimentées par de la sparite (wackestone selon Dunham; biomicrite selon Folk). D'après l'analyse chimique, la roche est composée pour 91,05% de calcite, pour 2,50% de dolomie et pour 6,45% de résidu insoluble.

La station a été installée le 8 avril 1979 et les mesures, dont la dernière a été exécutée le 25 avril 1985, ont montré un abaissement global de 0,160 mm, qui correspond à un abaissement moyen de 0,026 mm par an. La pluviosité totale a été de 7960 mm, avec une moyenne annuelle de 1327 mm; l'abaissement est donc égal à 0,020/1000 mm.

Station n°3. Cette station est très proche de

la station n°2, sur le même lithotype; elle est cependant située au centre d'un petit bassin de corrosion avec un diamètre de 15 cm et a été installée dans le but de mesurer la différence de dégradation entre les deux situations morphologiquement différentes.

Les mesures, exécutées pendant la période du 8 avril 1979 au 25 avril 1985, mettent en évidence un abaissement global de 0,080 mm, c'est-à-dire une moyenne de 0,013 par an et de 0,010/1000 mm.

Station n°4. Cette station est située à 223 m au-dessus du niveau de la mer, sur le flanc d'une vaste doline près de l'agglomération de Borgo Grotta Gigante; elle se trouve sur un affleurement incliné de 17° vers le NE. La pente moyenne du flanc de la doline est de 40° et la végétation (haute futaie) est épaisse.

La roche, qui est identique, du point de vue pétrographique, à celle de la station 2 et 3, est cependant légèrement différente d'après l'analyse chimique, qui met en évidence 92,63% de calcite, 2,37% de dolomie et 5% de résidu insoluble.

Les mesures ont été entreprises le 16 avril 1979 et ont été terminées le 25 avril 1985; elles montrent un abaissement global de 0,205 mm, qui correspond à un abaissement moyen annuel de 0,034 mm, avec une pluviosité totale de 7920 mm pendant les six années (moyenne annuelle 1320 mm), c'est-à-dire 0,025/1000 mm.

Station n°5. Cette station se trouve à 295 m au-dessus du niveau de la mer et est située aux alentours de l'agglomération de Opicina sur un affleurement rocheux incliné de 15° vers le WSW; la végétation présente une densité moyenne.

La roche (faciès hétéropique des «calcaires à Rudistes» du Crétacé sup.), est caractérisée par une mosaïque de fond micritique-microsparitique, avec intraclastes micritiques et résidus organiques (algues), en général spathisés (wackestone selon Dunham; intrabio-micrite selon Folk).

D'après l'analyse chimique, la roche est composée pour 91,95% de calcite, pour 2,85% de dolomie et 5,20% d'insoluble.

Les mesures, qui ont commencé le 25 avril 1979, montrent au 25 avril 1985 un abaissement global de 0,165 mm, qui correspond à un abaissement moyen annuel de 0,027 mm. La pluviosité totale dans cette zone est de 7860 mm (moyenne annuelle 1310 mm); l'abaissement est donc de 0,020/1000 mm.

Station n°6. Cette station est située à 390 m au-dessus du niveau de la mer, dans une petite vallée orientée NS et se trouve sur un affleurement rocheux avec une inclinaison de 25° vers l'Ouest, à l'abri des vents et entouré par une végétation haute et épaisse.

La roche (ensemble dolomitique du Crétacé sup.) est une dolomie anédrale, avec tendance à la subeudralité (?N.D.L.R.) et avec un grain moyen-gros, avec de rares veinures

STALAGMITE	SPESORE VOLTA IN METRI	ALTEZZA CADUTA IN METRI	STILLICIDIO ANNUALE IN LITRI	ACCRESIMENTO COMPLESSIVO IN mm	ACCRESIMENTO ANNUALE IN mm	ACCRESIMENTO/ STILLICIDIO UNITARIO
S 1	45	49	2.500	0.820	0.126	0.050/1000mm
S 2	46	44	2.000	0.570	0.087	0.043/1000mm
S 3	45	51	3.400	0.990	0.152	0.044/1000mm
S 4	65	26	28.500	1.230	0.198	0.006/1000mm

Tableau 3. Mesures d'accroissement.

calcitiques, de faibles rassemblements dolomitrifères et des porosités intergranulaires cimentées par la calcite.

D'après l'analyse chimique, il y a 10,13% de calcite, 85,65% de dolomie et 4,22% de résidu insoluble. La station, qui a été installée le 1 mai 1979 a montré, jusqu'au 20 avril 1985, un abaissement global de 0,080 mm, ce qui correspond à un abaissement moyen annuel de 0,013 mm. La pluviosité totale pendant les six années a été de 7820 mm (moyenne annuelle 1300 mm); l'abaissement est donc de 0,010/1000 mm.

Station n°7. Cette station se trouve à 520 m au-dessus du niveau de la mer et est située sur la pente NE du Mont Lanaro et sur un affleurement avec une inclinaison de 11° vers le NE, dans une zone sans végétation et très venteuse.

La roche (calcaires ichtyolytiques de Comeno du Crétacé sup.) est caractérisée par une mosaïque de fond micritique avec de rares zones sparitiques et de bioclastes spathiques, avec un pourcentage de sparite total

de moins de 15% (mudstone selon Dunham; micrite fossilifère selon Folk).

D'après l'analyse chimique, la roche est composée de 91,95% de calcite, pour 2,85% de dolomie et pour 5,20% de résidu insoluble.

La station a été installée le 25 mars 1979 et le 20 avril 1985 on a un abaissement de 0,175 mm, ce qui correspond à un abaissement moyen annuel de 0,029 mm. La pluviosité totale pendant les six années a été de 7980 mm (moyenne annuelle 1310 mm); l'abaissement est donc de 0,021/1000 mm.

Station n°8. Cette station se trouve à 370 m au-dessus du niveau de la mer sur le flanc nord du Mont Carso, près de la Val Rosandra, et est située sur un affleurement subhorizontal, très venteux et sans végétation.

La roche (calcaires à alvéolines et nummulites de l'Eocène) est caractérisée par une mosaïque de fond microsparitique avec des zones micritiques résiduelles; des gros restes organiques micritiques ou spathisés avec remplissage microsparitique et des bioclastes spathiques font que la sparite est prédominante sur l'élément micritique (packstone selon Folk; biomicroite recristallisée selon Flok).

La roche, du point de vue minéralogique, est composée pour 93,00% de calcite, pour 2,07% de dolomie et pour 4,93% de résidu insoluble.

La station a été installée le 14 avril 1979 et la dernière mesure, exécutée le 28 avril 1985, a mis en évidence un abaissement global de 0,100 mm, correspondant à un abaissement annuel de 0,016 mm. La pluviosité totale a été de 7920 mm (moyenne annuelle 1320 mm), l'abaissement est donc de 0,012/1000 mm.

CONCLUSIONS

Les mesures exécutées confirment que l'abaissement causé par dégradation des roches calcaires (stations 1, 2, 4, 5, 7, 8) est en moyenne supérieur à celui des roches dolomitiques (station 6) avec un rapport égal à 2/1 environ.

En ce qui concerne le domaine plus limité des calcaires, si ceux-ci sont constitués par de la calcite à gros grains (sparite et bioclastes), l'abaissement est beaucoup plus faible que celui des calcaires micritiques, avec un rapport égal à 3/2 environ. Enfin, l'eau stagnante (petit bassin de corrosion, station 3) donne lieu à des abaissements de calcaire qui, pratiquement, correspondent à ceux des dolomies où il y a également dissolution dynamique.

La comparaison entre les valeurs de l'abaissement et les hauteurs des précipitations (fig. 2) met en évidence un rapport de proportionnalité directe selon une droite d'équation:

$$y = 2,62x + 0,52$$

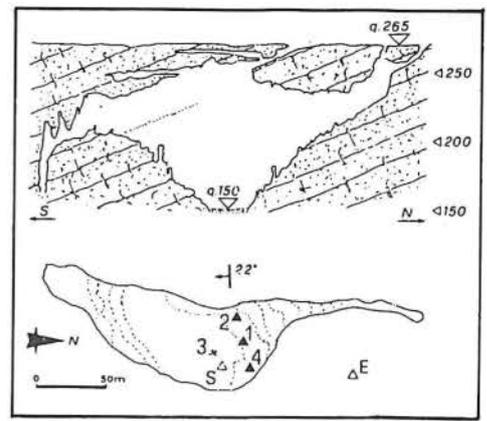


Fig. 3. Coupe et plan de la Grotta Gigante (VG2). Stations de mesure Δ Stations météorologiques \square (E = extérieure, S = souterraine).

soit un abaissement de 0,005 mm pour une pluviosité de 100 mm.

L'équation détermine aussi la précision de cette méthode, puisqu'elle indique des abaissements qu'on ne peut pas relever (0) correspondant à des pluviosités totales de 52 mm. Si les mesures exécutées jusqu'à maintenant sont significatives, on peut dire que dans un climat méditerranéen comme celui du Karst Triestin, avec une pluviosité moyenne annuelle de 1350 mm et avec des températures moyennes annuelles de 12°C, la valeur moyenne d'abaissement des surfaces calcaires exposées aux conditions atmosphériques est égale à 0,027 mm/an : cette valeur se réduit de moitié dans les roches dolomitiques ou en conditions de dissolution uniquement statique.

On peut remarquer que pour cette valeur d'abaissement, on devrait avoir une valeur indicative de perte de poids de 650 mg environ par dmc/an. Cette valeur est cependant 4-5 fois plus grande que la valeur expérimentale obtenue au moyen d'analyses sur des tablettes de roche exposées aux conditions atmosphériques. La raison de cette différence est imputable à la dégradation statique et statique-dynamique différente sur les tablettes et sur les stations de mesure.

Fig. 4. Rapports entre accroissement et stillicidie pour la station 3.

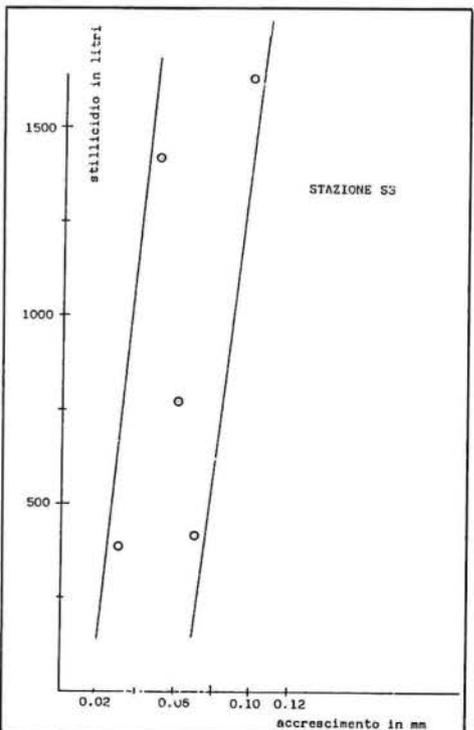
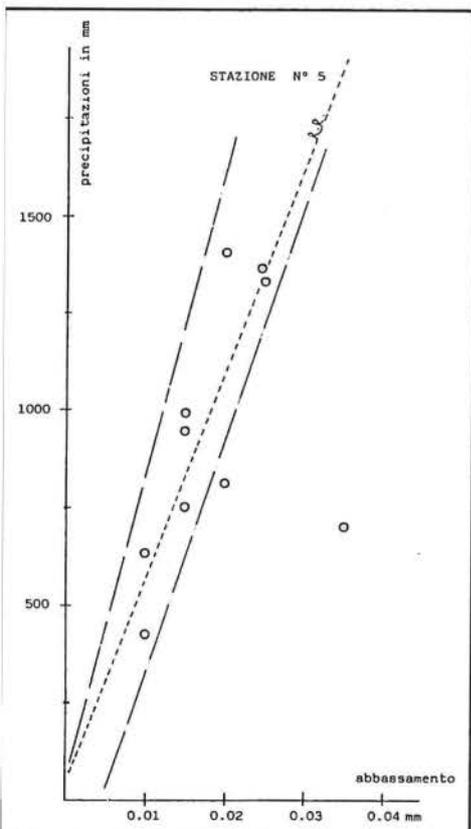


Fig. 2. Rapports entre abaissements et précipitations dans la station n°5.



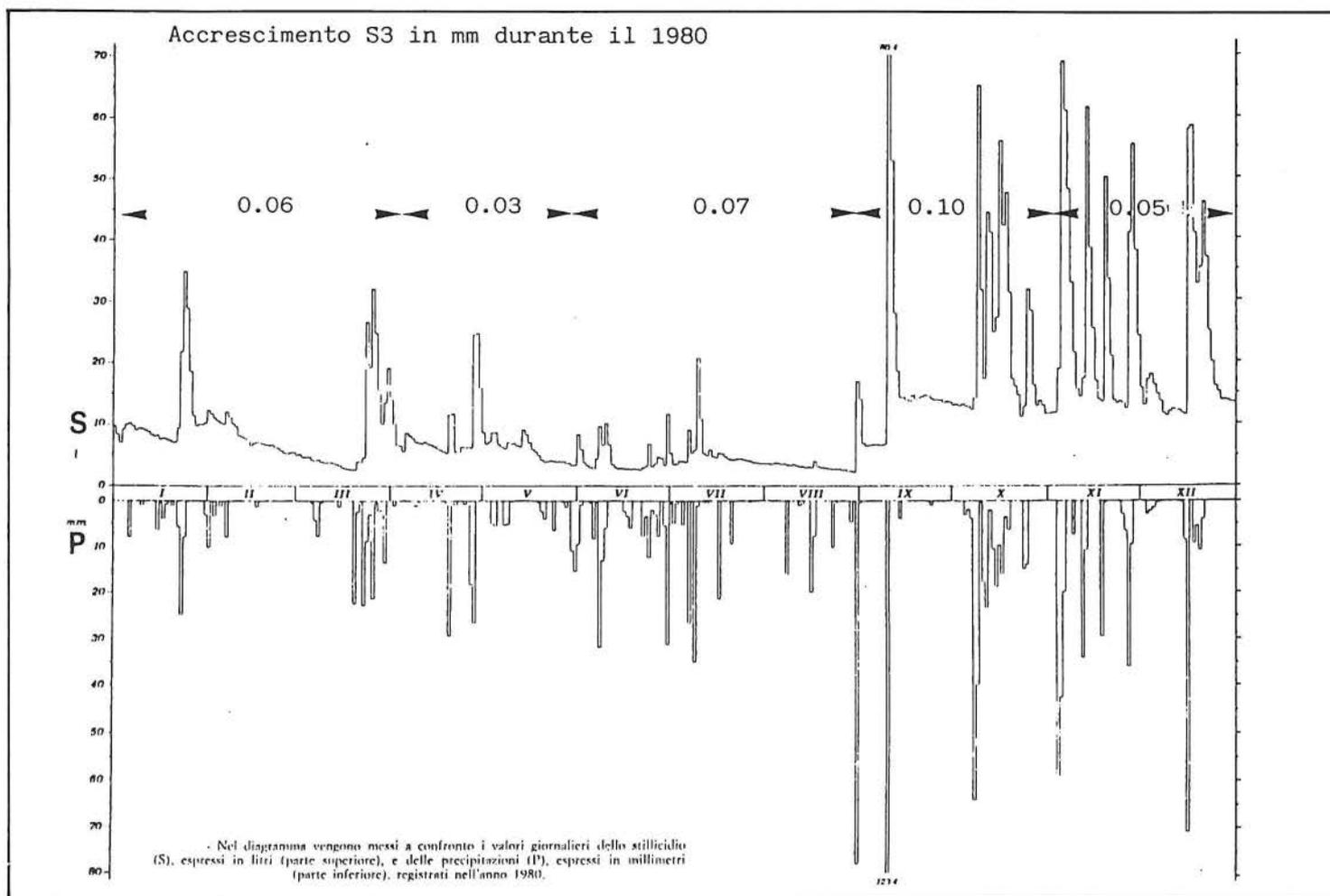


Fig. 5. Comparaison entre les valeurs de la stillation et des précipitations extérieures et les valeurs d'accroissement de la stalagmite de la station 3.

MESURES D'ACCROISSEMENT DES STALAGMITES

Comme nous l'avons brièvement exposé dans l'avant-propos, on a exécuté des mesures d'accroissement sur 4 stalagmites de la Grotta Gigante (fig. 3) au moyen des instruments micrométriques décrits auparavant.

La Grotta Gigante est une cavité très bien connue et amplement étudiée; c'est pratiquement un laboratoire souterrain qui fournit des données à la géophysique, à la météorologie et à la spéléogénèse.

Sur la base de mesures mensuelles exécutées pendant 23 années dans plusieurs endroits à l'intérieur de la cavité, la température moyenne a été de 11,57°C avec une amplitude moyenne annuelle de 0,37°C; l'humidité moyenne a été de 99,7% avec une amplitude moyenne annuelle de 0,7% (Tommasini T., 1974).

A l'extérieur, il y a une station météorologique complète et officielle; sur la base des données météorologiques concernant la période de 6 ans pendant laquelle on a exécuté les mesures (1979-1985), on obtient une pluviosité moyenne annuelle, pour cette période, de 1350 mm, avec un maximum journalier de 105 mm. La température moyenne annuelle extérieure est de 12°C, avec une température minimale de -15°C et maximale de 34°C (voir tableau 2).

A l'intérieur de la grotte, en outre, il y a une station qui mesure continuellement la valeur de l'égouttement sur un point déterminé.

Une étude sur les rapports entre précipitations extérieures et stillation, a déjà clairement montré qu'il y a une bonne corrélation, et même dans le temps, entre intensité des pluies et fréquence de la stillation, avec une

assez bonne capacité de rétention de la roche (épaisseur moyenne égale à 50 m) de la voûte de la cavité (Forti F., Gasparo F., 1983).

L'on a considéré 4 stations de mesure; les mesures (semestrielles pendant les deux premières années et annuelles ensuite) se rapportent à une période de 6 ans et 5 mois (du 8 décembre 1978 au 5 mai 1985).

On a ainsi obtenu (voir tableau 3) un accroissement moyen, pour cette période, égal à 0,79 mm. Il faut tenir compte du fait que, dans le calcul des moyennes, on n'a pas considéré les valeurs concernant la St. 4, puisque la cristallisation, très intense en ce point là, ne peut pas être comparée avec celle des autres stations.

Des données obtenues, on peut donc observer un accroissement moyen annuel de 0,12 mm, avec une stillation moyenne annuelle de 2600 litres environ.

A titre d'exemple en ce qui concerne l'accroissement, on peut se référer au graphique de la figure 4; la figure 5 présente par contre les valeurs de stillation par rapport à la pluviosité extérieure.

La figure 4 montre un bon rapport linéaire, mais très incliné, ce qui prouve la nécessité de stillations très intenses pour avoir des accroissements minimaux.

Des analyses exécutées en 1982 et actuellement en cours d'élaboration, on peut voir que les eaux de stillation ont une température moyenne de 10,5°C, un pli entre 7,8 et 8,1 et une dureté (EDTA) moyenne de 250 ppm.

En conclusion donc, l'étude réalisée montre que les vitesses d'accroissement de chaque stalagmite sont variables au cours du temps et qu'elles ne sont pas toujours proportionnelles à la quantité de la stillation. Pour la poursuite des mesures, nous avons l'intention de définir de façon optimale le rapport entre pluviosité extérieure et stillation pour tous les points de mesure d'accroissement: c'est la seule façon d'analyser les croissances au

cours du temps en fonction de l'apport hydrique et des autres paramètres qui ont une influence sur le concrétionnement.

BIBLIOGRAPHIE

GASPARO (F.) (1979 à 1984 en cours d'impression 1985 communication personnelle). Osservazioni meteoriche. *Supplementi a Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, Trieste.

FORTI (F.), STEFANINI (S.), ULCIGRAI (F.) - 1975 - Relazioni tra solubilità e carsificabilità nelle rocce carbonatiche del Carso triestino. *Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, vol. XIV, Trieste.

FORTI (F.) - 1979 - Misure della dissoluzione carsica e dell'accroissement delle stalagmiti. *Atti del IV Convegno di speleologia del F.-V.G.*, Pordenone.

FORTI (F.) - 1981 - Metodologie per lo studio della dissoluzione con il sistema della misura col micrometro. *Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, vol. XX, Trieste.

FORTI (F.), GASPARO (F.) - 1981 - Rapporti fra precipitazioni meteoriche e stillicidio della Grotta Gigante sul Carso Triestino. *Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, vol. XX, Trieste.

FORTI (F.), STEFANINI (S.) - 1981 - Modalità di una prova sperimentale eseguita per la definizione del grado di solubilità dei principali litotipi del Carso triestino sotto l'azione degli agenti esterni. *Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, vol. XX, Trieste.

FORTI (F.) - 1982 - Risultati preliminari sull'accroissement delle stalagmiti nella Grotta Gigante (Carso Triestino). *Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, vol. XXI, Trieste.

FORTI (F.) - 1984 - Misure sulla dissoluzione carsica e dell'accroissement delle stalagmiti. *Atti IV Convegno di speleologia*, Vicenza, ott. 1984 (in corso di stampa)

TOMMASINI (T.) - 1975 - Ventitre anni di termogrammetria alla Grotta Gigante nel Carso Triestino. *Atti e Memorie Comm. Grotte «E. Boegan»*, vol. XIV, Trieste.

RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR LA DEGRADATION DES PRINCIPAUX LITHOTYPES DU KARST DE TRIESTE

S. STEFANINI* F. ULCIGRAI*
F. FORTI** F. CUCCHI*

*Institut de géologie et paléontologie, Université de Trieste
Piazzale Europa 1 34127 TRIESTE ITALIA

**Commission Grottes E. Boegan, Soc. alpina delle Giulie
Via Machiavelli 17 34100 TRIESTE ITALIA

En 1980 on a entrepris un test expérimental pour étudier la dégradation des roches carbonatées en exposant «directement» aux conditions atmosphériques 40 échantillons rocheux choisis parmi les lithotypes les plus significatifs affleurant sur le karst triestin (fig. 1) et en mesurant les pertes de poids à intervalles réguliers.

Les échantillons ont été exposés pendant 5 années, du 31.03.1980 au 20.03.1985.

Le rapport a un caractère préliminaire : il contient les données relatives aux pertes pondérales et illustre quelques considérations obtenues après une analyse préalable des résultats.

MODALITES DU TEST

Les caractéristiques du test ont déjà été illustrées en détail dans un travail précédent (Forti F., Stefanini S., 1980) et, par conséquent, on se bornera ici à en citer les données essentielles.

Les 40 échantillons rocheux, en forme de parallélépipèdes de 6 x 1 x 3 cm environ, ont été mesurés au moyen d'un calibre (0,1 mm), desséchés à 110° C et pesés avec une précision de 0,1 mg. Ils ont été ensuite exposés aux agents atmosphériques aux alentours de la grotta Gigante (grotte Géant) (1)

FIG. 2. Variation des dégradations saisonnières. Le champ des dolomies est marqué en gris et celui des calcaires en blanc.

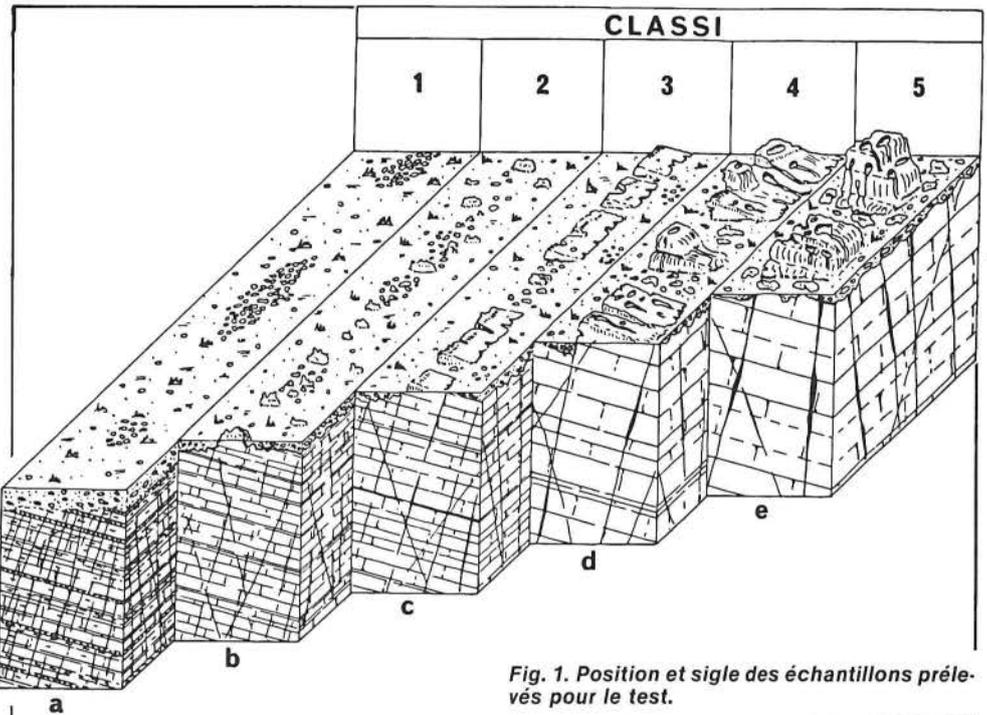
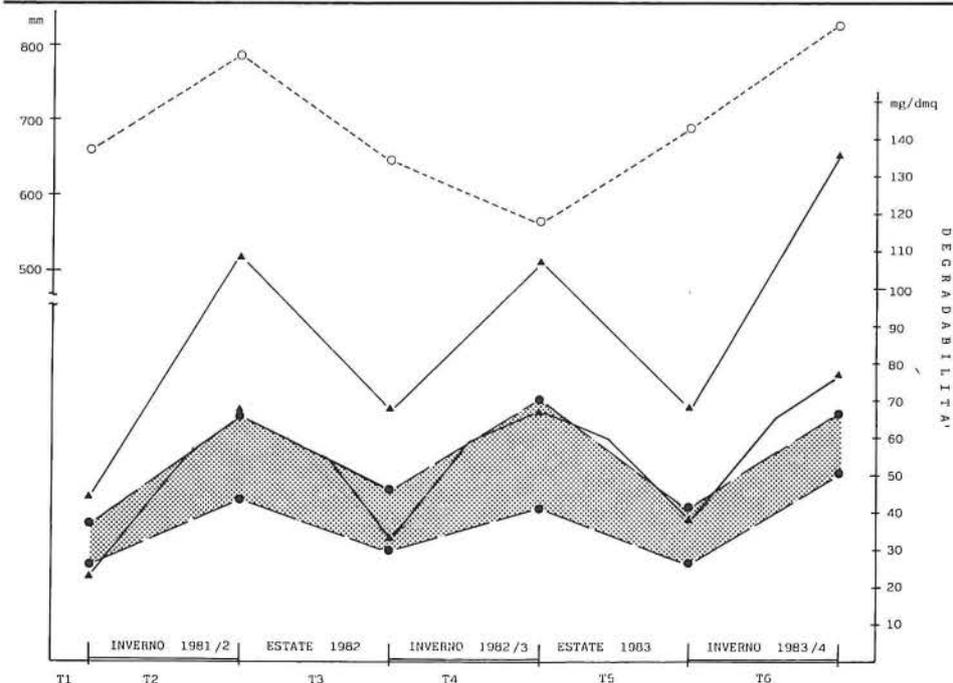


Fig. 1. Position et sigle des échantillons prélevés pour le test.

FIG. 1 — Morfologie carsiche ordinata secondo le «classi di Carsismo» (da F. Forti, 1972); 1 - «morfologia a Carso coperto», 2 - «morfologia a denti», 3 - «morfologia a strati», 4 - «morfologia a strati e blocchi», 5 - «morfologia a banchi e blocchi»; a - calcari scarsamente carsificabili, b - calcari poco carsificabili, c - calcari mediamente carsificabili, d - calcari molto carsificabili, e - calcari carsificabili in massimo grado.



sur le karst triestin, après avoir été suspendus à un câble de nylon au moyen d'un fil de nylon d'un diamètre de 0,3 mm et avec une poulie en laiton.

Pendant les trois premières années d'exposition (avril 1980 - mars 1983), les échantillons ont été retirés à la fin des semestres d'été et d'hiver (2) et pesés sec en laboratoire. Pendant les 2 années suivantes (1983-1985), ils ont été au contraire exposés durant un an. Les pertes de poids (P1, P2... P8), relatives à chaque période d'exposition (T1, T2... T8), ont été exprimées en mg/dmc.

Pour toutes les opérations comportant une manipulation des échantillons (liage, transport, pesage, etc.), on a pris nos précautions pour ne pas changer leur poids naturel (gants de fil, pince recouverte en plastique, récipient rembourré, etc.).

(1) La localité est située à 275 m au-dessus du niveau de la mer et à une distance de 2800 m de la mer.

(2) Les semestres d'été et d'hiver n'ont pas toujours correspondu aux semestres astronomiques; on a en effet choisi de laisser les échantillons exposés jusqu'au premier jour non pluvieux si le terme de la période coïncidait avec une journée pluvieuse.

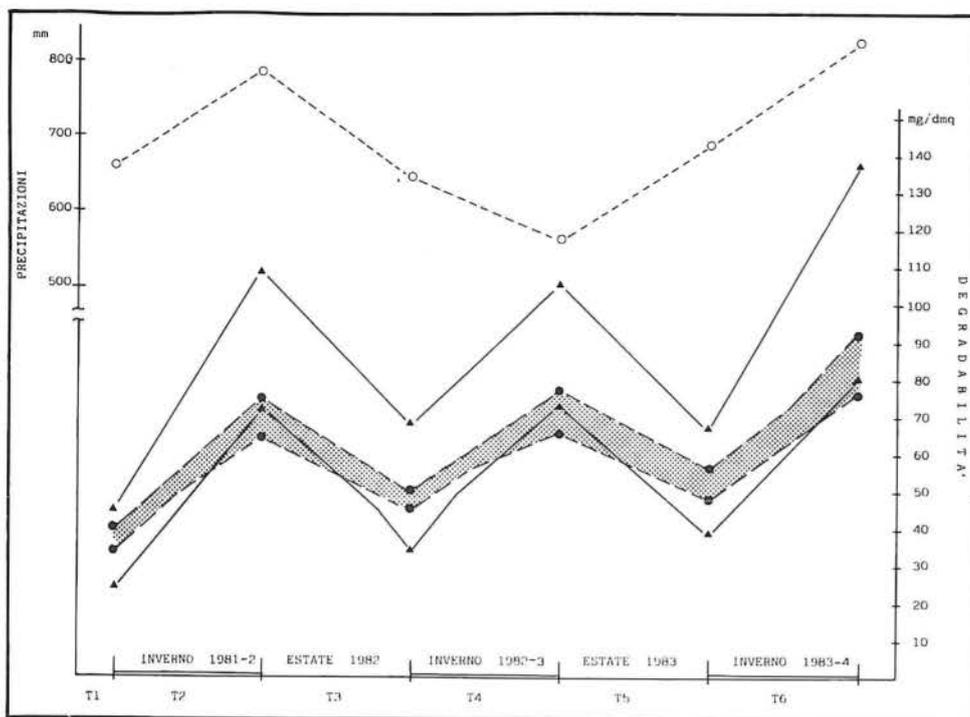


Fig. 3. Champ de gégradation des calcaires. La zone en gris se réfère aux échantillons 11, 12, 21, 30, 32, à variation faible.

Le lieu de l'exposition a été délibérément choisi aux alentours de la grotta Gigante puisqu'en cet endroit il y a une station météorologique; par conséquent on connaît les valeurs des précipitations qui ont intéressé les échantillons (Gasparo F., 1981, 1982, 1983 et données inédites jusqu'à présent).

Les périodes d'exposition et les précipitations relatives ont été les suivantes :

T1. Du 31.03.80 au 22.09.80	667,0 mm
T2. Du 25.09.80 au 22.03.81	788,8 mm
T3. Du 01.04.81 au 30.09.81	646,2 mm
T4. Du 05.10.81 au 22.03.82	561,8 mm
T5. Du 31.03.82 au 23.09.82	687,4 mm
T6. Du 26.09.82 au 08.04.83	852,2 mm
T7. Du 09.04.83 au 08.04.84	1182,2 mm
T8. Du 09.04.84 au 20.03.85	1270,0 mm

On a aussi analysé des fragments, obtenus après coupe des échantillons, pour déterminer les concentrations de calcite, dolomite et résidu insoluble en HCl (à 4%).

Les déterminations de Ca et Mg ont été exécutées au moyen de la spectrophotométrie en absorption atomique après adjonction de lanthane pour éviter des interférences; les teneurs en Ca et Mg ainsi obtenues ont été transformées en pourcentages de calcite et dolomite et le résidu insoluble a été obtenu en calculant la différence.

Les résultats numériques des pertes de poids et des analyses chimiques sont rapportées en appendice.

Pendant la période d'exposition, on a perdu, à cause du thermoclastisme, les échantillons Nr.1 (après l'été de 1982), Nr.17 et Nr.18 (après l'hiver de 1984), qui ont enregistré des ébrèchures et donc des pertes de poids non imputables à l'action des eaux pluviales.

CARACTÉRISTIQUES PETROGRAPHIQUES DES ÉCHANTILLONS

Comme on disait dans l'avant-propos, les 40 échantillons considérés ont été choisis en se proposant comme but d'étudier l'altération des lithofaciès correspondant aux plus vastes affleurements du karst triestin, pour mieux connaître en «primis» la dégradation et, ensuite, le processus karstique et ses influences sur l'évolution morphologique du territoire.

On a donc échantillonné les principales formations de la succession stratigraphique

locale; il s'agit de micrites (dismicrites, micrites fossilifères, micrites interclastiques), de rochers micro-allochimiques (biomicrites, intramicrites, biointra et intrabiomicrites), spathiques-allochimiques (intrasparites), bioclastites à mosaïque de fond micritique ou sparitique, dolomites secondaires, brèches calcaires.

Vu le but spécifique de notre étude, et en tenant compte des notions déjà obtenues sur la différence de solubilité entre micrite et sparite (Forti F. et al., 1974), l'examen pétrographique a été organisé tout particulièrement en fonction de l'analyse des rapports entre micrite et sparite; cela non seulement dans le contexte traditionnel de la fraction orthochimique, mais aussi dans un contexte plus général, comprenant également tous les allochimiques.

Les calcaires ont été ainsi divisés en 3 groupes fondamentaux : roches à dominante micritique, roches «mixtes», caractérisées par un mélange de micrite et de sparite, roches à dominante sparitique. Dans les roches «mixtes» et dans celles à dominante sparitique, la calcite spathique a été évaluée globalement : on a en effet associé le ciment spathique, la sparite de recristallisation, les fossiles à coquille spathique ou spathisés et les bioclastes sparitiques.

Les échantillons pour lesquels l'analyse chimique a fait apparaître du Mg en quantités qui laissent raisonnablement supposer la présence de dolomite, ont été soumis à un essai colorimétrique (Alizarine rouge S), pour évaluer les rapports minéralogiques et structuraux entre calcite et dolomite.

RESULTATS

1. PERTES DE POIDS SAISONNIÈRES DEGRADATION SAISONNIÈRE

La fig. 2 montre les pertes de poids saisonnières (mg/dmq) pendant les 3 premières années d'exposition et, dans la partie supérieure, les précipitations correspondantes (3). De l'examen de la fig. 2, l'on peut déduire les premières observations significatives qui peuvent être ainsi résumées :

a). Les précipitations en période hivernales ont été supérieures à celles des semestres d'été, exception faite pour le semestre hivernal de 1982/1983 (T4), au terme duquel on a

enregistré la pluviosité minimale absolue (561,8 mm). Ces variations diffèrent de la norme selon laquelle, du moins sur la base des données décennales 1957-1976 (Tommasini T., 1979), il y a des précipitations en été légèrement plus abondantes (693 mm) qu'en hiver (655 mm).

La plus grande pluviosité de l'hiver nous a donc empêché d'évaluer la part de l'altération par les pluies de périodes froides (qui sont théoriquement plus riches en CO₂ et de ce fait, plus agressives) par rapport à celles des périodes chaudes, ce qui était un des objectifs du test.

b). La dégradation des échantillons montre, au cours du temps, une allure générale en «dents de scie», avec des valeurs maximales au terme des périodes hivernales et des valeurs minimales au terme des périodes estivales. Cette variation peut être parfaitement mise en relation, il va sans dire, avec la valeur des précipitations. Il y a cependant l'exception de la période T4 qui, même avec des pluviosités très réduites, a enregistré une forte dégradation.

La cause de cette contradiction apparente réside dans la nature même des pluies qui, comme on sait, ne se caractérisent pas par une agressivité constante.

Dans le cas du karst de Trieste, l'on a déjà déterminé des valeurs variables de pH de l'eau pluviale (4,55-6,03); Forti et al., 1974). Cela peut arriver aussi bien à la suite de causes naturelles qu'à celle de phénomènes de pollution atmosphérique (pluies acides). Il est donc très probable que quelques pluies particulièrement acides soient survenues au cours de l'hiver 1982-1983 (T4) et aient provoqué des dégradations fortes, hors du commun.

En observant plus particulièrement la variation des dégradations, on a pu révéler que, pour les échantillons calcaires, uniquement celle-ci est différente à l'intérieur de 2 groupes. Le premier, constitué des échantillons Nr. 11, 12, 21, 30, 32, montre une variation plus faible par rapport à celle de l'autre groupe, comprenant les autres échantillons (fig. 3).

La faiblesse du premier groupe (parmi les moins dégradables en absolu, puisqu'ils se trouvent dans la partie inférieure du champ de la fig. 3) présentent l'étrange phénomène de se dégrader plus que d'autres, dans l'autre groupe, au terme des périodes d'été (pluviosité réduite), tandis qu'au terme des périodes d'hiver (pluviosité plus intense), leur dégradation est moins forte.

Étant donné que la dégradation dépend directement de la pluviosité, la variation du champ des échantillons du premier groupe est très anormale, puisqu'elle devrait être, grosso modo, parallèle à celle de l'autre groupe; tous les échantillons, en effet, ont été exposés de la même façon aux précipitations et devraient donc avoir réagi selon les mêmes modalités, indépendamment de la valeur absolue des pertes de poids.

L'examen en section fine des échantillons étudiés a montré qu'il s'agit de bioclastites caractérisées par la présence d'une très grande fraction allochimique formée de gros bioclastes spathiques (jusqu'à 3-4 cm), associées à des fragments minuscules avec très peu de micrite interstitielle.

La calcite spathique est sans aucun doute prédominante et cela explique pourquoi ces lithotypes, parmi les échantillons calcaires

(3) Le graphique ne tient pas compte de l'échantillon Nr. 4, avec un faciès tout à fait particulier (calcaire limonitique concrétionné), puisqu'il n'était pas compris parmi les lithotypes les plus significatifs. Cet échantillon a montré des valeurs de dégradation maximales, sans doute à cause de la haute teneur en résidu insoluble (19,8%).

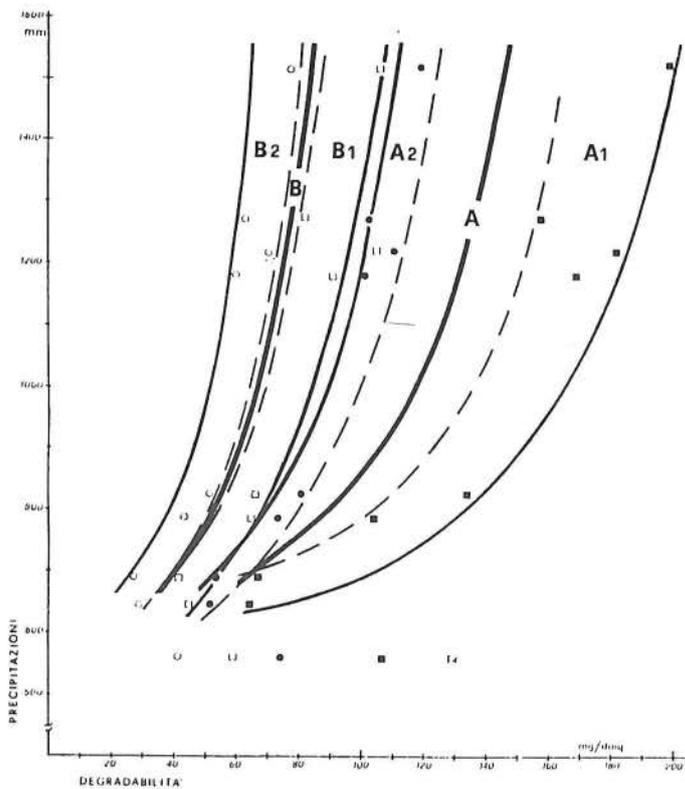


Fig. 4. Champs de dégradation des calcaires (A) et des dolomies (B) en fonction de la pluviométrie. Les sous-champs A1, A2, B1, B2 se réfèrent aux échantillons respectivement plus ou moins dégradables à l'intérieur de chaque champ. Les lignes plus épaisses indiquent les variations des dégradations moyennes des calcaires et des dolomies.

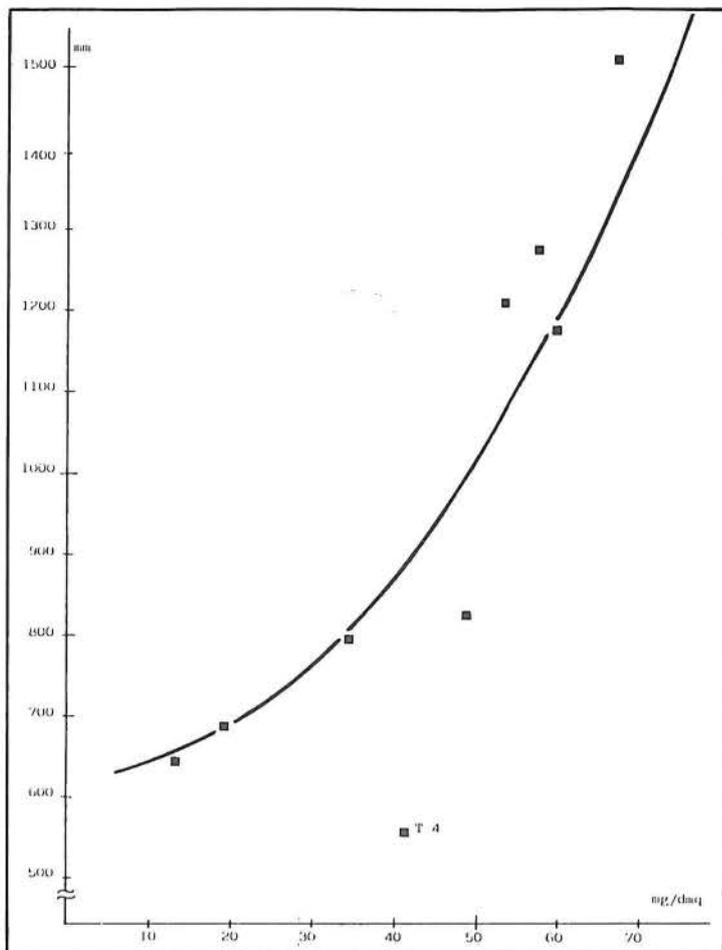


Fig. 5. Différences entre dégradations moyennes des calcaires et des dolomies, en fonction de la pluviométrie, avec la courbe d'interpolation.

2. PERTES DE PONDUS GÉNÉRALES (DEGRADATION GÉNÉRALE)

Pour mettre en évidence la valeur des pertes de poids en fonction des pluviométries, aussi bien saisonnières (1980-1983) qu'annuelles (1983-1985), on a réalisé le graphique en figure 4 (4). Ce graphique montre les variations de la dégradation des calcaires (champ A) et des dolomites (champ B) avec, en particulier, celles qui concernent les échantillons qui ont enregistré les valeurs maximales et minimales dans les deux champs (sous-champs A1, A2; B1, B2). Le graphique ne représente pas les points concernant la dégradation du premier semestre d'exposition, et donc celle de la première année, puisque les données ont démontré, pour cette période, une dégradation réduite par rapport aux précipitations. Cela est peut-être dû à une certaine «inertie» des échantillons à enregistrer les effets de la dégradation météorique. Ceci pourrait être dû à la coupe récente de leurs faces.

De l'examen de la fig. 4, l'on peut tirer aussi des conclusions significatives :

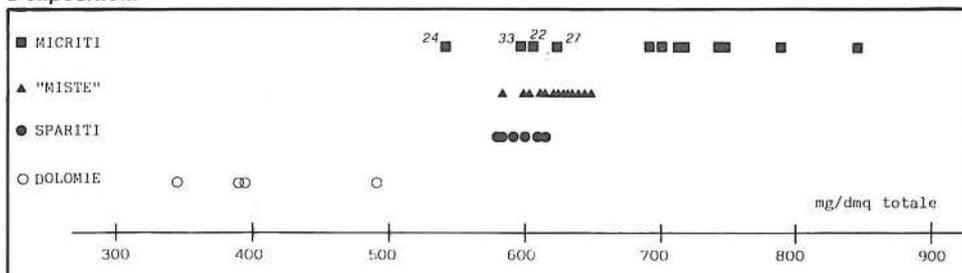
a). Dans le cas de précipitations limitées (650-700 mm), on a un certain degré de super-

position des champs, ce qui était déjà prévisible sur la base de ce que nous avons décrit au point 1; cette superposition disparaît ensuite dans le cas de précipitations plus intenses. Les calcaires et les dolomites présentent donc, dans le cas de pluviométries réduites, presque les mêmes dégradations. Elles coïncident pratiquement si l'on compare les échantillons de dolomites plus dégradables avec les échantillons de calcaires moins dégradables. Quand la pluviométrie augmente, il y a aussi une augmentation moyenne de la différence entre les dégradations des calcaires et des dolomites.

b). La fonction pluviométrie-dégradation pour tous les champs, est concave vers le haut, avec tendance à recouper l'axe de la pluviométrie pour des valeurs de 650 mm environ.

Mais cela n'est pas proposable, étant donné que la dégradation serait nulle pour des pluviométries de 650 mm. Pour des dégradations inférieures à 20-25 mg/dmq, l'allure des courbes doit être nécessairement différente (probablement rectiligne). Elles doivent passer près de l'origine des axes et, plus précisément, par l'axe des abscisses, non loin de zéro. Il est évident, en effet, qu'avec des pluviométries nulles pendant une certaine période,

Fig. 6. Champs de dégradation des roches carbonatées en fonction de leurs caractéristiques pétrologiques à la fin des 5 années d'exposition.



étudiés, sont les moins dégradables en absolu, conformément à ce qui a déjà été affirmé à ce propos (Forti F. et al., 1974).

Par contre, à l'heure actuelle, l'on ne peut pas expliquer le fait que leur dégradation s'accroît durant la période estivale.

c). Les valeurs de dégradation (fig. 2) montrent que les échantillons dolomitiques, dont les points significatifs se trouvent dans la partie inférieure du graphique (zone grise), sont plus résistants par rapport aux échantillons calcaires, ce qui s'accorde parfaitement avec la solubilité plus réduite des dolomites par rapport aux calcaires, que l'on a déjà démontré.

Même l'abondance relative de résidu insoluble présent dans les dolomites, qui pourrait faire augmenter les valeurs de dégradation malgré la solubilité réduite, n'influe pas de façon à changer les termes de leur comportement général.

La dégradation des calcaires, au terme de toutes les périodes hivernales, a toujours été supérieure à celle des dolomites, tandis qu'à la fin des périodes estivales, certains d'entre eux (Nr. 8, 24, 37), se sont révélés plus résistants. La fig. 2 montre en effet qu'au terme des périodes estivales il y a une superposition des valeurs de dégradation des dolomites et des calcaires, due aux susdits échantillons. Dans ce cas aussi, la cause du phénomène est encore à déterminer.

4) Dans ce cas non plus, on n'a pas pris en considération l'échantillon Nr. 4. La figure montre en outre la position tout à fait anormale du point concernant la période T4 (qui ne sera pas examinée), peut-être imputable aux pluies acides.

RAPPORTS ENTRE CARACTERES PETROGRAPHIQUES ET DEGRADATIONS

Campione	Petrografia	Composizione			Perdite in peso (mg/dmq)									
		Calcite	Dolomite	Residuo insolub.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Totale	
1	micrite	58.96	24.07	16.97	26.24	86.90	43.93	73.21	44.50					
2	micrite	93.35	2.04	4.61	34.45	88.35	54.64	87.24	49.45	81.13	104.47	109.65	609.38	
3	dolomicrite	55.11	40.60	4.29	31.35	79.69	49.25	81.16	52.02	95.55	122.11	124.18	635.31	
4	concrezione	79.12	1.06	19.82	47.66	115.15	62.24	114.59	62.43	149.17	171.42	184.31	906.97	
5	dolomia	12.66	81.76	5.58	26.38	46.73	34.67	47.10	28.82	56.52	70.28	72.35	382.85	
6	dolomia	11.76	82.37	5.87	26.01	43.78	29.31	41.03	26.74	50.74	59.72	63.20	340.53	
7	dolomia	13.31	82.82	3.87	32.49	50.44	34.76	47.22	31.36	58.08	68.38	64.79	387.52	
8	mista	92.15	2.17	5.68	24.79	74.94	38.90	77.04	38.14	87.72	119.95	117.66	579.14	
9	micrite	91.93	1.79	6.28	33.91	97.58	62.35	93.63	53.50	98.15	127.16	120.94	687.22	
10	dolomia	15.18	81.07	3.75	36.59	64.83	45.50	59.72	40.76	66.16	91.76	82.09	487.41	
11	sparite	93.18	1.04	5.78	38.85	76.94	48.89	70.31	47.75	87.74	114.28	118.07	602.83	
12	sparite	94.90	1.59	3.51	39.40	75.04	50.15	67.68	49.20	77.67	106.71	113.31	579.16	
13	micrite	92.98	2.01	5.01	33.68	100.09	62.50	101.26	57.25	113.91	164.54	145.46	778.69	
14	mista	94.50	2.43	3.07	26.70	77.99	43.79	85.67	45.72	106.61	123.52	140.04	650.04	
15	breccia	93.00	1.31	5.69	39.21	100.36	60.96	91.81	52.04	111.51	139.39	141.62	736.90	
16	micrite	91.03	2.34	6.63	23.24	83.21	43.66	96.52	51.54	106.00	148.25	148.81	701.23	
17	micrite	95.25	1.66	3.09										
18	sparite	95.62	1.02	3.36	44.44	109.97	67.41	104.70	67.79	136.34	151.40			
19	mista	95.17	1.45	3.36	33.52	78.10	47.94	76.98	48.51	102.64	124.18	131.29	643.16	
20	mista	93.30	2.71	3.99	27.39	73.48	42.31	77.06	41.93	96.90	120.89	132.22	612.18	
21	mista	97.47	0.87	1.66	41.36	72.30	48.63	77.70	52.92	92.23	121.68	124.66	631.48	
22	micrite	95.70	1.79	2.51	28.82	77.67	40.80	88.71	44.16	96.38	114.91	127.64	619.09	
23	micrite	96.25	0.88	2.87	33.21	97.60	54.49	102.83	56.54	107.86	132.87	129.33	714.73	
24	micrite	96.22	1.78	2.00	28.84	72.68	37.65	73.81	39.15	80.55	100.59	107.28	540.55	
25	mista	97.20	1.25	1.55	30.87	89.26	49.40	92.82	44.53	102.36	111.34	121.64	642.22	
26	mista	94.95	2.20	2.85	27.91	81.83	42.91	83.73	46.70	95.50	119.24	125.69	623.51	
27	micrite	94.63	1.16	4.21	29.14	80.47	45.31	79.16	44.18	96.65	119.59	130.68	625.10	
28	micrite	95.97	1.69	2.34	35.40	86.37	57.27	88.60	54.12	115.85	151.40	151.62	740.63	
29	mista	96.27	0.40	3.33	36.36	73.29	47.48	84.60	47.48	100.81	129.26	126.81	646.09	
30	sparite	94.45	1.00	4.55	37.83	65.36	46.26	70.61	49.63	83.72	115.94	122.68	592.03	
31	micrite	95.30	0.78	3.92	32.29	92.57	58.40	100.65	62.72	113.42	125.06	134.45	719.56	
32	mista	94.88	tracce	5.12	34.64	70.82	51.02	77.67	56.16	87.76	99.75	102.80	580.62	
33	micrite	92.83	2.70	4.47	30.56	71.30	44.70	78.09	46.21	92.61	119.02	110.34	592.83	
34	micrite	93.88	1.72	4.40	31.09	90.47	62.94	100.03	60.50	116.51	137.87	141.05	740.46	
35	mista	92.83	2.22	4.95	31.66	73.31	46.73	76.32	50.50	94.79	122.31	111.37	606.99	
36	mista	94.15	2.76	3.09	28.10	73.68	47.47	82.41	49.94	110.90	127.99	130.08	650.57	
37	sparite	95.17	1.63	3.20	25.66	87.25	34.59	83.64	44.48	112.53	125.27	102.84	616.26	
38	mista	94.80	1.57	3.63	36.92	85.97	41.96	77.02	53.15	102.76	121.97	124.76	644.51	
39	micrite	92.90	2.98	4.12	40.00	104.23	64.44	107.78	66.68	133.37	169.04	167.84	853.38	
40	sparite	75.74	20.69	3.57	29.70	76.40	35.68	84.43	42.59	103.30	120.11	123.10	615.31	

il y aura de toute façon un certain degré de dégradation, même extrêmement réduit et peut-être non quantifiable au niveau expérimental, dû essentiellement à l'action éolienne.

La fig. 4 permet d'effectuer une autre élaboration pour détecter la dégradation moyenne (conçue comme moyenne arithmétique) dans les deux champs A et B.

Les courbes ainsi obtenues nous permettent, en dernière analyse, de quantifier non seulement les dégradations «moyennes» des calcaires et des dolomites, mais aussi leur différente dégradation.

La courbe ainsi obtenue est représentée sur la fig. 5, qui montre les points distribués selon une fonction bien définie qui, avec une bonne approximation, est une parabole d'équation :

$$y = 0,08 x^2 + 12,5$$

Il faut souligner que cette équation peut être appliquée quand, comme unité de mesure sur l'axe des abscisses, on prend des dégradations de 5 mg/dmc et, comme unité de mesure sur l'axe de l'ordonnée, des précipitations égales à 50 mm.

Le graphique de la fig. 6 illustre les champs de dégradation (durant les 5 années et exprimé comme perte de poids en mg/dmc) pour les groupes de roches précédemment décrits. D'après l'examen du graphique, l'on peut voir la confirmation d'une dégradation plus intense pour les calcaires par rapport aux dolomites et, dans le cas des calcaires, une dégradation plus accentuée dans les lithotypes à prédominance micritique par rapport à ceux qui comportent une certaine teneur en calcite spathique (roches «mixtes») et à ceux qui sont à prédominance sparitique. Entre ces lithotypes et des roches définies «mixtes» il y a une modeste superposition de champ, qui est probablement due au fait que les évaluations en pourcentage de la micrite et de la sparite dans les roches «mixtes» ont été exécutées exclusivement d'après les tableaux de comparaison; nous avons en effet l'intention d'effectuer une mesure plus soignée au cours de nos enquêtes.

Il faut aussi remarquer que les échantillons 22, 24, 27 et 33, à prédominance micritique, se trouvent en dehors du champ de dégradation qui serait de leur ressort étant donné leurs caractéristiques pétrographiques, pour justifier cette anomalie en ce qui concerne les champs 27 et 33, on peut dès maintenant avancer des hypothèses: dans le cas du champ 27, la présence de bioclastes sparitiques avec des volumes assez supérieurs par rapport à ceux qui pourraient être déduits des sections transversales observées sur le plan de la section fine et, dans le cas du champ 33, la présence d'une vaste pigmentation limonitique. En ce qui concerne les deux autres échantillons, à l'heure actuelle il n'y a pas de justification pour la modeste dégradation révélée par l'échantillon 22 à la limite du champ des roches à prédominance spathique et par l'échantillon 24 même au-dessous de ce champ et légèrement au-dessus de celui des dolomites.

S. STEFANINI F. ULCIGRAI
F. FORTI F. CUCCHI

BIBLIOGRAPHIE

GASPARO (F.) - 1981, 1982, 1983, 1984 - In corso di stampa dati 1984 e 1985. Osservazioni meteoriche. **Supplemento a Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan, Trieste.**

FORTI (F.), STEFANINI (S.), ULCIGRAI (F.) - 1974 - Relazioni tra solubilità e carsificabilità nelle rocce carbonatiche del Carso triestino. **Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan, vol. XIV, Trieste.**

FORTI (F.), STEFANINI (S.) - 1980 - Modalità di una prova sperimentale eseguita per la definizione del grado di solubilità dei principali litotipi del Carso triestino sotto l'azione degli agenti esterni. **Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan, vol. XX, Trieste.**

TOMMASINI (T.) - 1979 - Dieci anni di osservazioni meteorologiche a Borgo Grotta Gigante sul Carso triestino (1967-1976). **Supplemento a Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan, Trieste.**

Question de J. Nicod: aviez-vous des formes de plaquettes particulières?

Réponse: oui, nous les avons taillées pour éviter le plus possible que les manipulations ne les détériorent. Après expérimentation, lors du 1^{er} semestre, la perte de poids sur plaquettes polies a été minime.

LA RECHERCHE SUR L'ÉROSION KARSTIQUE EN ITALIE

Ugo SAURO

Dipartimento di geografia, via del Santo 26
35123 PADOVA ITALIA

L'érosion karstique peut être étudiée selon différentes méthodes parmi lesquelles :

- la méthode hydrogéologique-hydrochimique, basée sur l'analyse des solutions naturelles et sur l'évaluation du bilan hydrologique d'où il est possible de calculer la quantité de roche érodée par solution, exprimée en $m^3/km^2/an$;
- la méthode des expériences de laboratoire qui tend à établir la solubilité des différents types de calcaires sur la base des vitesses, dans des conditions expérimentales définies, du passage en solution du carbonate de calcium (Gerstenhauer et Pfeffer, 1966);
- la méthode de la perte de poids des tablettes standard de roche, mises en des milieux naturels différents pour de longs intervalles de temps (Trugdill, 1975);
- la méthode de la mesure de l'abaissement de points définis de la surface rocheuse par les micromètres de précision (HIGH et MANNA, 1970);
- la méthode de l'analyse morphométrique de quelques-unes des formes particulières de la corrosion et du relief des nodules de silice et de fossiles silicifiés.

Dans cette note nous examinerons brièvement la contribution scientifique à l'étude de l'érosion karstique en Italie, en excluant les méthodes géomorphologiques. Les publications sur l'érosion karstique qui concernent le territoire de l'Italie sont peu nombreuses; celles qui affrontent ce thème d'une manière spécifique ne sont qu'une dizaine tandis qu'à peu près autant de publications fournissent les données utiles pour des tentatives de calcul.

La première donnée significative nous est fournie par Corbel (1959) : elle concerne l'éro-

sion karstique dans le bassin de Timavo, près de la frontière italo-yougoslave. Dans les dix années suivantes ne paraissent que quatre publications dues à des géographes étrangers (Gerstenhauer et Pfeffer, 1966; Ek, 1966; Demangeot, 1967; Pfeffer, 1967). De 1969 à nos jours paraissent 15 publications environ d'hydrogéologues et de géomorphologues italiens; toutefois dans beaucoup de celles-ci on étudie les caractères des aquifères karstiques sans affronter d'une manière spécifique le problème de l'érosion karstique. Digne de considération est le travail de recherche exécuté à l'intérieur du Carso de Trieste par l'Institut de Géologie de l'Université de Trieste, en collaboration avec la Commission Grotte «E. Boegan», C.A.I.

RESULTATS OBTENUS PAR LA METHODE HYDROGEOLOGIQUE-HYDROCHIMIQUE

Les résultats obtenus par la méthode hydrologique-hydrochimique se trouvent dans le tableau : ceux qui n'ont aucune indication sont fournis par les auteurs, tandis que ceux marqués par l'astérisque, je les ai calculés moi-même sur la base des valeurs de dureté moyenne et de surplus d'eau (précipitation-évapotranspiration).

Intéressant pour la formulation de ce problème est le travail de Demangeot (1967) qui divise en des intervalles altimétriques le bassin de l'Aterno (Apennin Central) et qui tient compte des diverses valeurs de l'érosion chimique sur la base des surplus d'eau; la valeur minimum qui en résulte est de $53 m^3/km^2/an$ relative à l'intervalle altimétrique 230-500 m s.n.m.; le maximum de $130 m^3/km^2/an$ pour

l'intervalle entre 2500 et 2900 m; la dissolution moyenne du bassin entier serait de $81 m^3/km^2/an$.

Pour le bassin du fleuve Liri, toujours dans l'Apennin Central, la valeur moyenne de l'érosion karstique est considérablement plus basse : $58,8 m^3/km^2/an$, (Accordi et al., 1969).

Particulièrement bien documenté se présente l'ouvrage de Dal Pra (1974) qui se base sur des données déjà connues (Dal Pra et Stevan, 1969) concernant quatre grosses sources au pied de l'Altopiano dei Sette Comuni (Prealpi Venete). Sur chacune de ces sources, on a exécuté plus de 50 déterminations de température, débit et dureté; leur température moyenne est de $8,9^\circ C$, La dureté moyenne de $139 mg/litre$ et le débit total moyen de $14,5 m^3/seconde$. L'auteur estime que ces sources représentent à peu près l'entier écoulement du plateau qui les domine et dont l'expression est de $500 km^2$ environ (superficie de la zone altimétrique comprise entre 800 et 2300 m d'altitude); il en résulte une érosion moyenne de $50 m^3/km^2/an$ environ. Toutefois sur la base des considérations géographiques, les précipitations moyennes sur le plateau pourraient être supérieures aux 1600 mm et l'évapotranspiration moyenne inférieure aux 500 mm, par conséquent l'érosion karstique moyenne dépasserait $60 m^3/km^2/an$, en accord avec le fait qu'il existe d'autres voies d'écoulement superficiel et souterrain.

Des valeurs à peu près semblables d'érosion karstique peuvent être retenues pour les Alpes Maritimes (Guigo, 1973; Calandri, 1974; Bortolami et al., 1983).

Pour les Altopiani et Arcignazzo (Apennin Central) l'importance de l'érosion karstique estimée par les auteurs (Lupia Palmeri et Zuppi, 1976) s'écarte considérablement de la valeur déduite sur la base du surplus d'eau et de la dureté moyenne des eaux de source (respectivement 96 et 52,7). Dans ce cas, les duretés moyennes des différentes solutions ont permis d'évaluer que la dissolution superficielle représente 57% de l'érosion karstique totale; la dissolution dans la zone des fentes profonde enfin ne représente que 5%.

Des calculs du bilan hydrologique de plusieurs groupes de l'Apennin Central (Bini et Bono, 1979) permettent de tenter le calcul de l'érosion karstique. Les «minéralisations» des eaux varient entre 150 et 3300 mg/l à cause des apports thermominéraux profonds. Toutefois les sources karstiques qui ne sont pas influencées par de tels apports présentent des valeurs de dureté totale comprises entre 150 et 250 mg/l (ex. dans les Simbruini orientali et centrali); on peut donc prendre en considération une valeur moyenne de 200 mg/l à laquelle correspondraient des valeurs de l'érosion karstique comprises entre 60,8 et $72,8 m^3/km^2/an$.

Dans un ouvrage en voie de publication

Auteur et année	Région	Surplus d'eau (dm)	T° de l'eau en °C	Dureté moyen. (mg/l CaCO ₃)	Erosion karstique (m ³ /km ² /an)
CORBEL, 1959	Carso (Fiume Timavo)				64
DEMANGEOT, 1967	Apennino Centrale (Fiume Aterno)	73			81
ACCORDI et AL., 1969	Apennino Centrale (Fiume Liri e sorgenti)	84		175	58,8*
GUIGO, 1973	Alpi Marittime (sorgenti Marguareis)	110*	6-7,3	99	43,5*
DAL PRA, 1974	Prealpi Venete (sorgenti Altop. Sette Comuni)	110*	8,9	139,3	50,8-61,3*
CALANDRI, 1974	Alpi Marittime (sorgenti Val Tanaro)	110*	6-11	108-175	47,5*-77*
LUPIA PALMIERI et ZUPPI, 1977	Apennino Centrale (Altopiani di Arcignazzo) (sorgenti)	69		191	96, 52,7*
BOBI et BONO, 1979	Apennino Centrale (sorgenti di vari gruppi montuosi)	76-91		200	60,8*-72,8*
BORTOLAMI et AL., 1983	Alpi Marittime (sorgenti di Bossea)	125		125	62,5*
CICALI et PRANZANI, 1984	Apennino Toscano (sorgenti Monti Calvana)	70		115	32,2*
MENEGHEL et AL., 1985	Prealpi Venete (sorgenti varie)	15-140	9-13	139-255	15,3-83

leurs de l'érosion karstique (les astérisques indiquent les valeurs qui n'ont pas été fournies par les auteurs).

(Meneghel, Sauro, Baciga, Fileccia, Frigo, Toniello, Zampieri, 1985), sont présentés les résultats d'une recherche relative à 20 sources karstiques situées à des altitudes comprises entre 100 et 600 mètres à l'intérieur des Prealpi Venete, pour lesquelles on a effectué au total plus de 600 déterminations de dureté. Parmi les paramètres envisagés figurent l'altitude moyenne du bassin d'alimentation, la température moyenne de l'eau, le surplus hydrique à l'intérieur du bassin, la dureté moyenne et l'anhydride carbonique en solution. Ces paramètres varient avec l'altitude. Dans les sources qui possèdent des bassins à basse altitude (200-300 m s.n.m.), la température a des valeurs autour de 13° C, le surplus hydrique (P-E) de 150-200 mm seulement, l'anhydride carbonique est relativement abondante (20-30 mg/l), la dureté moyenne est d'environ 250 mg/l (l'érosion karstique qui en résulte sera donc de 15-20 m³/km²/an environ). Les eaux des sources qui ont des bassins à des altitudes élevées (1500 m environ) présentent au contraire des températures autour de 9° C, surplus même de 1400 mm, peu de milligrammes d'anhydride carbonique par litre, des duretés autour de 140 mg/l; elles expriment donc une érosion karstique de 70-80 m³/km²/an.

Des données sur les caractères chimiques des eaux de sources karstiques dans le territoire du Monte Velino (Apennin Central), où les duretés varient entre les 100 et 200 mg/l, sont fournies par Pfeffer (1967), et dans l'Apennin Umbro-Marchigiano, où les duretés varient entre 100 et 500 mg/l, par Dramis (1973); Nicod (1976) fait allusion à quelques eaux des Dolomites du Brenta.

Particulièrement intéressant parce qu'il approfondit des aspects particuliers, est l'ouvrage de Ek (1966), où l'on démontre la faible agressivité des eaux du glacier de la Marmolada. La dureté n'est que de 36 mg/l tout de suite en aval du glacier, de 61 mg/l deux cents mètres plus bas, de 85 mg/l dans le torrent qui se trouve 5 km en aval; les valeurs du pH varient entre 8,10 et 8,80.

Des aspects particuliers du chimisme des eaux sont traités aussi dans les œuvres de Gemiti et Merlak (1976) sur les eaux du Carso de Trieste et de Casati et al., (1983) sur les eaux d'un territoire des Dolomites.

EXPERIENCES SUR LA SOLUBILITE

Des expériences sur la solubilité ont été effectuées par Gerstenhauer et Pfeffer (1966) en plongeant différents échantillons de roche dans des solutions naturelles. Des 46 échantillons de roche utilisés, 30 provenaient de l'Italie (Prealpi Friulane et Apennin Central). Après 28 heures dans ces solutions, il y avait une dissolution entre 12 et 40 mg/l de CaCO₃.

Des expériences analogues sur des calcaires du Carso de Trieste ont été effectuées par Forti, Stefanini et Ulcigrai (1975) en utilisant des échantillons cubiques de 5 cm de côté, plongés dans 250 cm³ d'eau de pluie de pH 4,55 ou de pH 6. Dans l'eau la plus acide après 24 heures ont été dissous en moyenne 23 mg/l, après 72 heures 38 mg/l; dans l'autre solution respectivement 10 mg/l et 25 mg/l. Il n'a pas été facile d'établir l'influence des différents caractères micropétrographiques des échantillons sur la vitesse de la corrosion; toutefois, dans l'ensemble, on a trouvé une bonne correspondance entre les résultats et les «classes de karstification» précédemment définies par les auteurs sur des bases morphologiques.

UTILISATION DES TABLETTES DE CALCAIRES

Un programme basé sur l'utilisation de tablettes standard a été commencé et coordonné par I. Gams au niveau international,

après le congrès sur la «dénudation karstique» de Ljubljana. Cette méthode se base sur la perte de poids par unité de surface des tablettes placées dans des situations et des milieux différents pendant une ou plusieurs années. Les résultats obtenus sont l'objet d'une communication de la part de I. Gams.

Les résultats des expériences effectuées en Italie sur le M. Marguareis (Alpi Marittime), sur le M. Baldo et le M. Lessini (Prealpi Venete) ont indiqué des valeurs de corrosion très basses (moyennes entre 0,7 et 12,7 mm pour 1000 ans) et variables selon les situations où se trouvaient les tablettes.

Analogues sous certains aspects, des expériences sont en cours par Forti et Stefanini (1980) qui dans le Carso de Trieste ont suspendu dans l'air des tablettes plates de calcaire de diverses formations; après 5 ans, la vitesse de la corrosion montre des valeurs comprises entre 0,8 et 7,2 mm/1000 ans (Gucchi, Forti, Stefanini et Ulcigrai: communication dans ce Colloque).

LES MESURES AVEC LES MICROMETRES

En Italie les micromètres ont été jusqu'à présent peu utilisés pour effectuer les mesures de l'érosion. Les seules données obtenues par cette méthode ont été fournies par Forti (1980, 1983, 1985) relativement à quelques surfaces de lapiès du Carso de Trieste. Des mesures effectuées sur dix stations indiquent une érosion moyenne de 0,0224 mm/an.

CONSIDERATIONS FINALES

Sur la base des expériences effectuées en Italie, la meilleure méthode pour évaluer l'érosion karstique dans son ensemble reste sans aucun doute celle hydrologique-hydrochimique. Les eaux des bassins karstiques des régions montagneuses italiennes ayant des altitudes moyennes autour de 1000-1500 m, présentent des duretés totales entre 100 et 200 mg/l et sont responsables d'une érosion karstique entre 50 et 80 m³/km²/an.

Nettement inférieure est la vitesse d'érosion par des bassins d'altitude plus basse bien que, dans ce cas, il y ait une augmentation des valeurs de la dureté des eaux.

Les valeurs très basses, bien éloignées de celles qui viennent d'être citées et qui ont été obtenues par la méthode des tablettes standard, s'expliquent peut-être par la variabilité des micromilieux examinés, mais surtout par le fait que les surfaces des tablettes sont privées de n'importe quelle forme d'attaque biologique.

Enfin les valeurs obtenues par la méthode du micromètre expriment les valeurs réelles de la corrosion sur des surfaces de roche nue à l'intérieur des lapiès.

Ces dernières années les recherches sur l'érosion karstique en Italie semblent prendre un nouvel essor, grâce à la possibilité d'installer de nouvelles stations automatiques qui relèvent continuellement certains caractères physiques et chimiques des eaux. Une station de ce genre fonctionne déjà dans la grotte de Bossea (Alpi Marittime). De plus, on constate dans l'utilisation des autres méthodes un perfectionnement continu.

Ugo SAURO

BIBLIOGRAPHIE

ACCORDI (B.), ANGELUCCI (A.), AVENA (G.C.), BERNARDINI (F.), BONI (C.F.), BRUNO (F.), CERCATO (M.), COPPOLA (B.), FIORE (G.), FUNICELLO (R.), CIGLIO (G.) LA MONICA (G.B.), LUPA PALMIERI (E.), MATTIOLI (B.), PAROTTO (M.) - 1969 - Idrogeologia dell'alto bacino del Liri (Apennin Centrale), *Geologica Romana*, 8, p. 177-599.

BONI (C.F.), BONO (P.) - 1979 - Essai de bilan hydrogéologique dans une région karstique de l'Italie Centrale, *Douzième Monographie Hydrogeol. Karst., A.I.H., UNESCO*, 1979, 29 p.

BORTOLAMI (G.), RICCI (B.), SUSELLA (G.), ZUPPI (G.M.) - 1983 - Idrogeologia del sistema carsico di Bossea (Val Corsaglia, Alpi Marittime, Italia), *Atti Conv. Int. Carso alta montagna*, Imperia 1983, p. 37-52.

CALANDRI (G.) - 1974 - Le sorgenti carsiche dell'alta Val Tanaro in Provincia di Imperia, *Atti 12° Congr. Naz. Speleol.*, Mem 12, *Rass. Speleol. It.*, Como, p. 217-231.

CASATI (P.), CAVALLIN (A.), CORTECCI (G.), FARINI (A.), PACE (F.), VIGANO (P.) - 1982 - L'acqua nel Gruppo del Monte Popera (Dolomiti nord-orientali), *Studi Trentini Sc. Nat.*, A.G., V. 59 (1982), p. 33-75.

CICALI (F.) et PRANZINI (G.) - 1984 - *Idrogeologia e carsismo dei Monti della Calvana (Firenze)*, *Boll. Soc. Geol. It.*, v. 103 (1984), p. 3-50.

CORBEL (J.) - 1959 - Erosion en terrain calcaire, *Ann. de Geogr.*, 1959, p. 97-120.

DAL PRA (A.) et STEVAN (L.) - 1969 - Ricerche idrogeologiche sulle sorgenti carsiche della zona di Valstagna, in destra Brenta, al piedi dell'Altipiano dei Sette Comuni (Prealpi Venete), *Tecnica Italiana*, a.34, n.10, 13 p., 5 tav.

DAL PRA (A.) - 1974 - Dimensioni dell'attività solvente della circolazione carsica sull'Altipiano dei Sette Comuni (Prealpi Venete), *Atti Ist. Veneto Sc. Lett., Arti*, t. 132, p. 1-10.

DEMANGEOT (J.) - 1967 - Sur une courbe de dissolution des calcaires en montagne méditerranéenne, *Mém. et Doc. CNRS*, 4, p. 185-191.

DRAMIS (F.) - 1973 - Caratteristiche idrochimiche delle sorgenti dell'Appennino Marchigiano, *Atti 2° Conv. Intern. Acque Sotteranee*, Palermo, *Ist. Geol.* 1973, p. 3-12.

EK (C.) - 1966 - Faible agressivité des eaux de fonte des glaciers: l'exemple de la Marmolada (Dolomites), *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 89 (1965-1966), *bull.* 5-10, p. 177-188.

FORTI (F.) - 1980 - Metodologia per lo studio della dissoluzione con il sistema della misura con micrometro, *Atti e Mem. Comm. Grotte E. Boegan, Trieste*, v. 20, p. 75-82.

FORTI (F.) - 1983 - Misure della dissoluzione carsica e dell'accrescimento delle stalagmiti (nota preliminare), *Atti 4° Convegno Speleol. Friuli*, Venezia Giulia, Pordenone, 1979, 193-198.

FORTI (F.) - 1985 - Misure sulla dissoluzione delle rocce carbonatiche nella Regione Friuli, Venezia Giulia, *Atti 3° Convegno Triveneto di Speleol.*, Vicenza, 1984, in stampa.

FORTI (F.) et STEFANINI (S.) - 1980 - Modalità di una prova sperimentale eseguita per la definizione del grado di solubilità dei principali litotipi del Carso Triestino, sotto l'azione degli agenti esterni, *Atti e Mem. Comm. Grotte E. Boegan, Trieste*, v. 20, p. 1-11.

FORTI (F.), STEFANINI (S.) et ULCIGRAI (F.) - 1975 - Relazioni tra solubilità e carsificabilità nelle rocce carbonatiche del Carso Triestino, *Atti e Mem. Comm. Grotte E. Boegan, Trieste*, v. 14, p. 19-49.

GEMITI (F.) et MERLAK (E.) - 1976 - The influence of the surface ground on the chemical characteristic of the percolation water in karst soil, *Karst Processes and relevant Landforms, U.I.S., Ljubljana*, 1976, p. 61-70.

GERSTENHAUER (A.) et PFEFFER (K.H.) - 1966 - Beitrage zur Frage der Loesungsfreudigkeit von Kalkgesteinen, *Abhandl. zur Karst und Hoehlenkunde, R.A.H.*, 2, 1966, 6 p.

GUIGO (M.) - 1973 - Le Massif du Marguareis et ses prolongements vers Ormea: précipitations et écoulement, *Revue Géogr. Alpine*, v. 61 (3), p. 391-409.

HIGH (C.) et HANNA (F.K.) - 1970 - A method for the direct measurement of erosion on rock surfaces, *Brit. Geomorph. Res. Group. Tech.*, *Bull.* 5.

LUPA PALMIERI (E.) et ZUPPI (G.M.) - 1977 - Il carsismo degli Altopiani di Arcignazzo, *Geologica Romana*, v. 16, p. 309-390.

MENEGHEL (M.), SAURO (U.), BACIGA (M.L.), FILECCIA (A.), TONIELLO (V.), ZAMPIERI (D.) - 1985 - L'erosione carsica nelle Prealpi Venete: nota preliminare, in corso di stampa.

NICOD (J.) - 1976 - Les Dolomites de la Brenta (Italie), Karst haut-alpin typique et le problème des cuvettes glacio-karstiques, *Zeit. fur Geomorph.*, S.B. 26, p. 35-37.

PFEFFER (K.H.) - 1967 - Beitrage zur Geomorphologie des Karstbecken im Bereiche des Monte Velino (Zentralapennin), *Frankfurter Geograph.*, Hefte 42, 86 p.

RAFFY (J.) - 1967 - Le karst d'Italie Centrale, *Norois* 95 bis, 1977, p. 133-147.

TRUDGILL (S.T.) - 1975 - Measurement of erosion weight loss of rock tablets, *Brit. Geomorph. Res. Group. Tech. Bull.* 17, p. 13-19.

ELEMENTS DE CLIMATOLOGIE DU MILIEU SOUTERRAIN MINIER D'AUTREFOIS

Pierre FLUCK*

Institut de géologie 1, rue Blessig
67084 STRASBOURG Cédex

Cette tentative de mise au point concerne les mines métalliques anciennes du massif cristallin des Vosges, plus particulièrement le district de Sainte-Marie-aux-Mines. Elle s'inscrit parmi les disciplines que nous souhaitons promouvoir dans le cadre de l'étude interdisciplinaire dont les mines anciennes constituent l'objet. Nous passerons en revue les principes de base, les premiers acquis de la méthode, et tenterons d'en saisir les prolongements possibles.

1. COUP D'OEIL COMPARATIF SUR LE MILIEU KARSTIQUE

A l'opposé des anciennes mines, le milieu souterrain naturel fait l'objet depuis un certain nombre d'années d'approches structurées en matière de climatologie. Il se trouve que plusieurs facteurs influencent la température de ce milieu, notamment :

- la circulation de l'air; dans un réseau à plusieurs entrées, il est aspiré l'hiver par les entrées inférieures
- les variations extérieures (ne sont plus ressenties au-delà de 20 à 30 m !)
- le flux dû au rayonnement solaire
- le flux dû à la chaleur interne de la terre. Le gradient géothermique moyen est de 3 degrés pour 100 m.

Ainsi lorsqu'on descend, la température devrait obligatoirement s'élever. Les mesures ont montré que ce n'est pas le cas. Pour expliquer ce phénomène, C. Andrieux (1979) a montré la nécessité de raisonner à l'échelle du karst tout entier, c'est-à-dire en tenant compte de la proportion énorme des vides non pénétrables par l'homme. En fait, ce sont les circulations d'eaux qui sont responsables des modifications du champ thermique d'un massif et de la mise en défaut du gradient géothermique. Ainsi, ce champ thermique peut être déformé même à grande profondeur.

Le milieu souterrain minier d'autrefois dans le massif des Vosges apparaît fondamentalement différent. Il s'adresse à des terrains imperméables (gneiss et granites des Vosges cristallines) et non solubles dans l'eau, et on notera que le vide creusé par l'homme est relativement beaucoup moins important que les cavités du milieu karstique. Ce réseau de fissures impénétrables existe certes (diaclasses ouvertes, géodes dans les filons...), mais son importance est pour nous insignifiante.

Les mines seront donc sujettes au flux de la chaleur de la terre, en conséquence de quoi on pourra tenter leur étude climatologique en vue de l'estimation du gradient géothermique. Ceci revêt un intérêt tout particulier dans une région au relief accidenté comme celle de Sainte-Marie-aux-Mines, où il doit être possible de confronter l'allure des surfaces isothermes à celle du relief topographique.

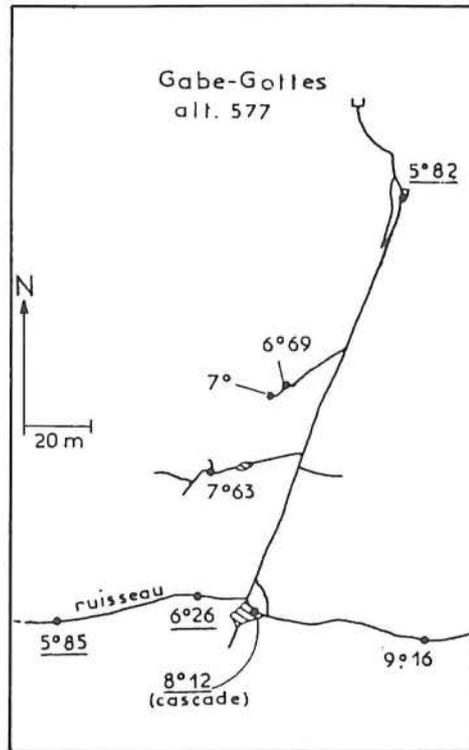


Fig. 1. Températures mesurées le 19.12.1981 dans la mine Gabe-Gottes, Neuenberg, altitude 580 m. Souligné = eaux courantes. Explications dans le texte.

On notera enfin que ce type de milieu n'offre par ailleurs rien de comparable aux mines modernes ou actuelles, dans lesquelles on crée des vides importants et un aérage continu souvent forcé.

2. LES MESURES

Les mesures sont pratiquées

— dans l'eau (flaques, ruissellements, puits inondés) à l'aide de thermistances couplées à un ohmètre Metrix Mx 737 A, prêté par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (J. Meunier), et offrant une précision de l'ordre du centième de degré;

— indifféremment dans l'air et dans l'eau à l'aide d'un thermomètre à affichage digital; sa précision est du dixième de degré seulement, mais cet appareillage beaucoup plus maniable et d'utilisation rapide est très apprécié dans les réseaux difficiles d'accès. Cette recherche n'ayant encore bénéficié d'aucun moyen financier, nous n'avons à ce jour engagé aucun enregistrement en continu dans le temps.

3. LES FACTEURS DE PERTURBATIONS

Les circulations d'air et d'eau constituent des facteurs de perturbation des températures idéales des masses rocheuses. Contrairement aux réseaux karstiques cependant, ces circulations offrent l'avantage d'être simples et sont donc susceptibles d'être chiffrées mathématiquement.

3.1. Les circulations d'air

Un réseau souterrain à plusieurs orifices est en théorie parcouru par un courant d'air. Celui-ci, s'inversant au gré des saisons, voire même journalièrement durant la saison chaude, a pour effet de rompre l'équilibre thermique entre l'air et la roche, en un point donné, pour faire tendre la température de l'air vers celle de la moyenne annuelle du lieu. Les parties proches des orifices sont encore en déséquilibre par rapport à ces moyennes, d'autant plus que le courant d'air est fort : elles se réchauffent l'été, s'il s'agit d'un orifice supérieur, ou se refroidissent l'hiver, s'il s'agit d'un orifice inférieur.

3.2. Les circulations d'eau

Certes, les circulations d'eau, par leur débit limité, n'ont qu'une influence restreinte sur la température de l'air dans les conduits, et ne modifient celle des masses rocheuses que sur une faible épaisseur. Nous illustrerons cependant l'intérêt de leur étude sur deux exemples. Le premier concerne la mine Gabe-Gottes en hiver. Les mesures ayant été prises par une température extérieure de -5° (fig. 1). Cette mine est parcourue de circulations hydrologiques abondantes en cette saison.

Le point de mesure le plus occidental concerne une eau courante à $5^{\circ} 85$, donc froide par rapport au milieu rocheux ambiant (cf. mesures de $7^{\circ} 63$ et $9^{\circ} 16$ prises dans les galeries à l'écart des circulations d'air et d'eau, dans des flaques d'eau calme). Cette eau est celle d'un petit torrent qui se déverse dans un puits comblé au jour dont l'orifice est à la cote +27, et se réchauffe progressivement contre les parois des conduits. En revanche, la cascade qui s'abat au carrefour central accuse $8^{\circ} 12$ alors que la surface n'est qu'à +30 : c'est une eau «chaude» qui a dû cheminer suffisamment pour se réchauffer, malgré le fort débit comparable au cours

*avec la collaboration pour les mesures de
Bruno ANCEL
Béatrice BABILON
Thierry VINCENT
Caroline HENRY
Philippe HENRY

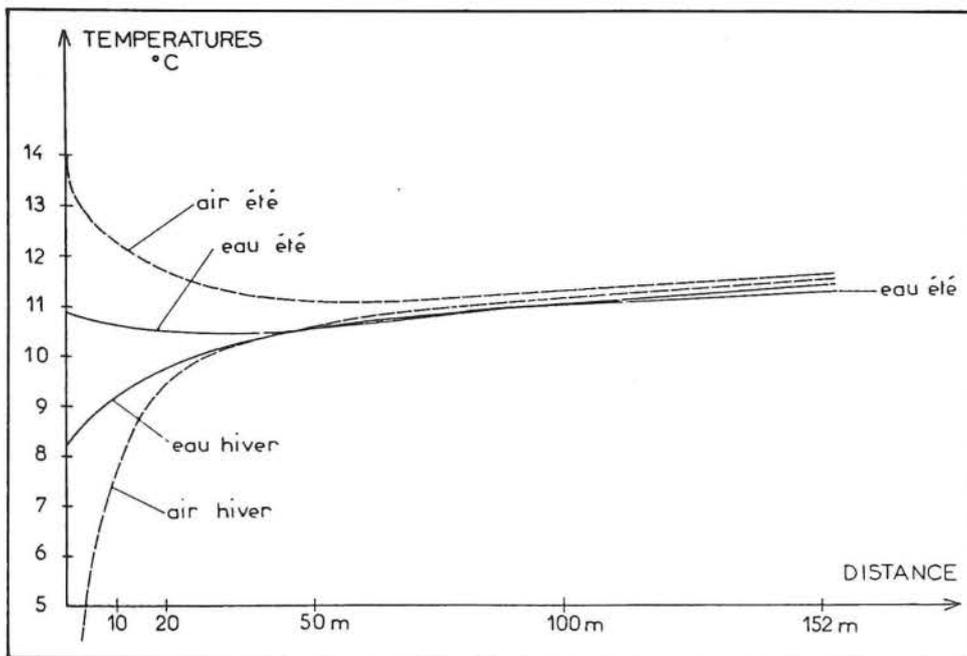


Fig. 2. Températures mesurées dans la mine Miésette, altitude 350 m.

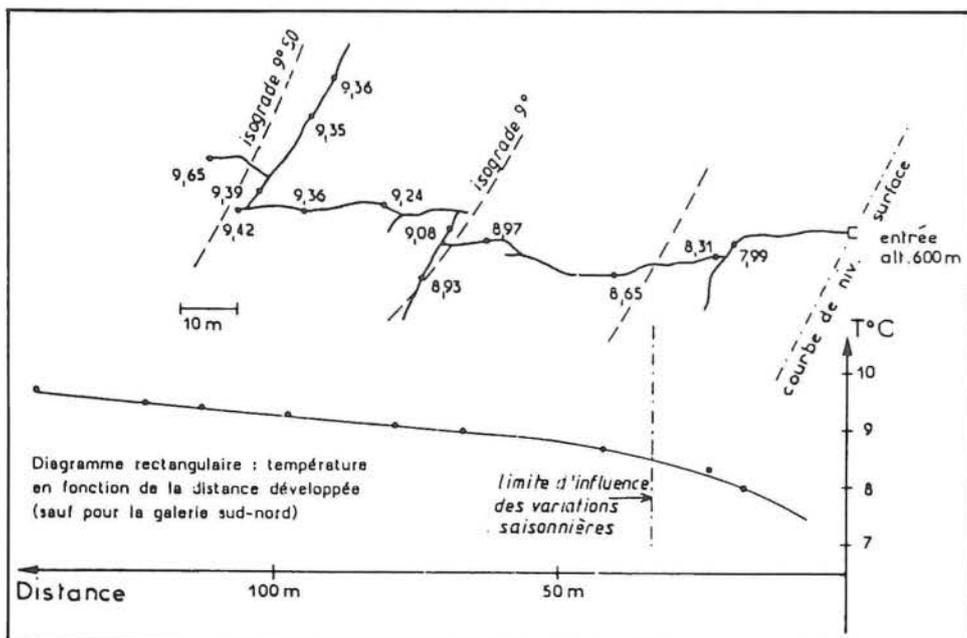
d'eau précédent. Ceci démontre l'existence d'une mine supérieure inconnue (car impénétrable).

Dans le cas d'un autre réseau, groupant les mines Saint-Louis et le Chêne, les mesures de températures des circulations d'eau, en hiver comme en été, ont permis la mise en évidence d'une jonction (impénétrable) entre les deux mines (Fluck, 1983). Voilà donc deux exemples d'impact des mesures d'ordre climatologique sur l'archéologie minière.

4. LA CHALEUR DE LA TERRE

Notre objectif principal est donc de préciser la configuration exacte du gradient géothermique. Afin d'éviter l'écueil des facteurs de perturbations, il conviendra d'effectuer des mesures dans des réseaux à une seule ouverture (pas de circulation d'air) ou dans des conduits latéraux (galeries ou puits), qui existent dans la quasi-totalité des réseaux miniers, se greffant sur le tracé principal parcouru par des mouvements d'air.

Fig. 3. Thermométrie de la mine Saint-Louis inférieure en hiver.



Trois questions se posent alors :
 — les températures de l'eau, de l'air et de la roche sont-elles en équilibre ?
 — quelle est la distance minimale pour atteindre la portion de la galerie à l'abri des variations de température qui affectent son débouché au jour ou dans un conduit à mouvement d'air ?
 — les galeries même sans courant d'air ne sont-elles pas sujettes à un rééquilibrage très lent avec les portions antérieures plus froides ?

L'étude de la mine Miésette (Sainte-Croix-aux-Mines), conduite par B. Babilon et Th. Vincent, apporte des éléments de réponse aux deux premières questions (fig. 2). On observe que les variations saisonnières affectant la galerie sur une distance d'environ 50 m, l'eau faisant office de «tampon» estompant ces variations. De la profondeur de 50 m jusqu'au front de taille à 152 m, l'augmentation de la température est continue, l'air et l'eau étant en équilibre à 1 à 3 dixièmes de degrés près.

Dans le cas de la mine Saint-Louis inférieure (fig. 3), les variations saisonnières

affectent une portion de 35 m à partir de l'entrée. Mais cette galerie apporte un enseignement supplémentaire qui répond à notre troisième question. La croissance des températures est régulière, à raison de 1 degré pour 75 m de distance horizontale en ligne droite, jusqu'à un virage à angle aigu situé à 105 m de l'entrée. Au-delà et sur 35 m, la galerie se parallélise aux courbes de niveau du versant. Cette portion accuse une température rigoureusement constante, qui est donc bien celle des masses rocheuses (la température se remet à croître dans la petite galerie qui s'embranché à nouveau vers l'ouest). Ainsi, le rééquilibrage supposé des températures est-il négligeable dans les galeries XVI^e siècle de faible gabarit (2 m x 0,60 m). Peut-être n'en est-il pas de même dans les galeries plus spacieuses du XIX^e siècle (2 m x 1,50 m).

Enfin, il est évident que la «distance minimale de sécurité» pour être à l'abri des variations climatiques doit être plus réduite pour les conduits latéraux intérieurs, qui se greffent sur des tracés principaux dans lesquels les variations sont bien moindres qu'à l'intérieur. Diverses mesures faites dans différents réseaux nous ont montré cependant qu'une distance de 20 m semble un minimum. Par exemple, à 13 m d'un carrefour dans la mine Eisenthür, la variation est encore de 0° 72, pour une variation saisonnière de 1° 58 au carrefour dans la galerie principale.

Nantis de ces enseignements, on pourra chercher à représenter, par une multiplication des mesures aux endroits judicieusement choisis, les isogrades du gradient géothermique dans les trois dimensions. Logiquement, les surfaces isothermes doivent se greffer en surface sur les courbes de températures moyennes annuelles, elles-mêmes fonction de l'altitude et l'exposition du versant concerné. Mais il est évidemment fortement présumable qu'elles épousent en les atténuant les irrégularités du relief.

Une première appréhension de ces surfaces peut se faire dans un plan vertical grossièrement perpendiculaire à l'allongement d'une crête montagneuse. Nous allons prendre l'exemple du réseau de la Fontaine des Chouettes (Saint-Pierremont, district de Sainte-Marie-aux-Mines). Ce réseau complexe (fig. 4) s'ouvre par deux entrées aux altitudes respectives de 430 m et 499 m. Un éboulement intérieur ancien produit un «bouchon» qui empêche la traversée et rend tout à fait négligeables les circulations d'air. Le seul facteur de perturbation des mesures est constitué par le courant d'eau (très faible à l'époque des mesures) qui parcourt la galerie inférieure. Nous avons donc fait un tri parmi les nombreuses mesures effectuées dans ce réseau (B. Ancel), en grande partie dans des conduits latéraux.

Il s'avère que :
 — dans l'axe de la montagne à l'aplomb sous la crête et dans la tranche altimétrique «explorée», le gradient est d'environ 2° 50 pour 100 m. Les surfaces isothermes se greffent sur les moyennes annuelles en surface. Celles-ci sont calculées en fonction de l'altitude sur la courbe de référence pour l'Alsace. Elles varient de plus ou moins 0° 25 en fonction de l'exposition ;
 — en direction du bas du versant, ces surfaces isothermes se rapprochent fortement ; une mesure de température de la roche effectuée au moment du percement du tunnel ferroviaire (vers 1935) permet de préciser le gradient à l'aplomb de l'entrée de la galerie inférieure, dans une tranche altimétrique de 70 m environ ; celui-ci est de l'ordre de 6° pour 100 m.

De telles approches ponctuelles du gradient géothermique ont été effectuées dans différents réseaux. Au Neuenberg à l'aplomb de la crête du Rain-de-l'Horloge, dans la tranche supérieure (en milieu gneissique), il n'est

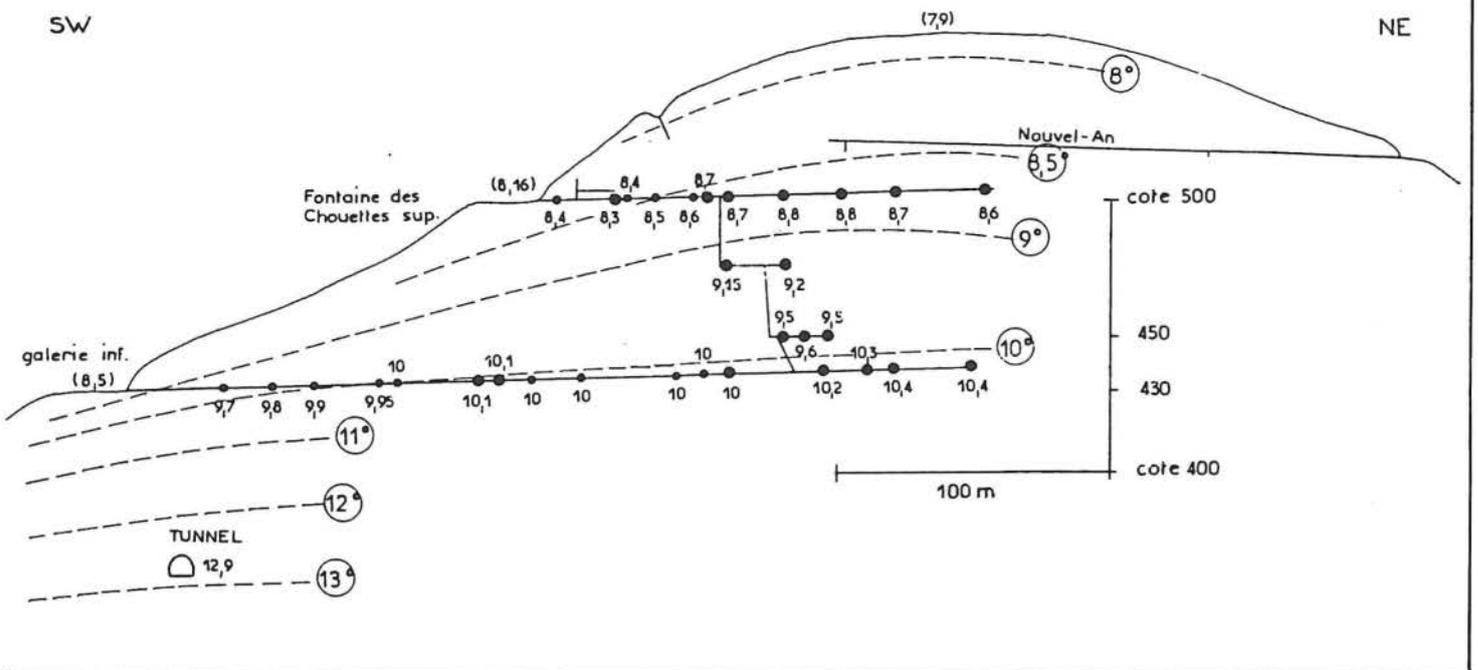


Fig. 4. Projection sur un plan SW-NE du système de la Fontaine des Chouettes et de la galerie du Nouvel-An.

Petits points : températures mesurées dans les flaques d'eau ou de boue, au long du parcours de la traversée.

Gros points : températures mesurées dans les galeries à l'écart de la traversée.

Entre parenthèses : températures moyennes annuelles virtuelles en surface.

Tirété : courbes d'égale température du gradient géothermique.

La galerie du Nouvel-An (actuellement éboulée) n'a pas encore fait l'objet d'investigations.

On n'a pas indiqué les températures des eaux courantes.

L'axe du thalweg est à 125 m à l'ouest de l'entrée inférieure.

des surfaces isothermes du gradient géothermique. De plus, les moyennes annuelles en surface étant fonction de l'altitude et de l'exposition, il sera possible, plutôt que de calquer les surfaces isothermes sur ces moyennes annuelles calculées virtuellement, de préciser en divers points les moyennes annuelles en surface réelles et de mieux chiffrer ainsi l'influence de l'exposition.

CONCLUSION

Par manque de moyens, les mesures de températures n'ont été jusqu'à présent que ponctuelles, l'approche somme toute encore empirique. Nous espérons pour l'avenir multiplier les mesures, notamment dans le réseau souterrain du Neuenberg : celui-ci totalise en effet 29 km de conduits rendus accessibles à ce jour grâce à la spéléologie minière, et s'inscrivant dans un rectangle de 1,3 x 2,2 km. Une telle densité de réseaux répartis également dans les trois dimensions de l'espace en milieu minier ancien et en terrain accidenté, ne se rencontre nulle part ailleurs en France. C'est dire que le Neuenberg est le lieu tout privilégié pour cette recherche originale sur la connaissance du gradient géothermique. A la suite d'appréhensions linéaires (galerie comprise dans un plan vertical) et planaires (galeries d'orientations variées dans un plan horizontal, et systèmes de galeries superposées dans un plan vertical) exposées dans cet article, il sera désormais possible de tenter en bloc-diagramme des représentations des surfaces isothermes.

En fonction des moyens obtenus, nous nous efforcerons également de mettre en place des systèmes d'enregistrement continu afin de mieux tester les variations saisonnières

ou journalières. Car si l'objectif principal reste la connaissance du gradient géothermique en fonction du relief, les facteurs de perturbations qui sont notamment les circulations d'air constituent un sujet de recherche intéressant en soi. Entre autres, ils ont déjà permis la mise en évidence de réseaux inconnus ou de communications souterraines, démontrant ainsi l'apport de la climatologie à l'archéologie minière.

Pierre FLUCK

BIBLIOGRAPHIE

ANDRIEUX (C.) - 1979 - Problèmes soulevés par l'action des circulations d'eau et d'air sur le climat des cavités souterraines dans les massifs karstiques. Coll. Intern. CNRS 271, «La fin des temps glaciaires en Europe».

FLUCK (P.) - 1983 - Climatologie du filon Saint Louis. Pierres et Terre, Strasbourg, S 02, 1984, p. 125-130.

Intervention de Roger Laurent : vous soulignez l'intérêt d'étudier les circulations souterraines dans les galeries de mines et la faune de ces eaux. Je vous signale que des travaux existent déjà : Graff et Husson pour les mines d'Ougney (Jura); Cuenot et Mercier pour la Lorraine notamment. D'autre part, s'il y a fissuration et circulation d'eau, ces milieux peuvent être colonisés comme les réseaux karstiques.

L'ELARGISSEMENT DES CONDUITS KARSTIQUES SOUS L'ACTION D'EAUX SATUREES

Camille EK*
Albert BRIFFOZ**
Michel GEWELT***

*Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire
Université de Liège Place du 20 août, 7 LIEGE BELGIQUE

**Club de recherches spéléologiques Ourthe-Ambève
Rue de Dolembreux, 7, 4050 ESNEUX BELGIQUE

***Aspirant FNRS. Université de Liège et Centre d'étude de
l'énergie nucléaire. Boeretang, 200, MOL BELGIQUE

1. LES DONNEES DU PROBLEME

Le processus de karstification implique la mise en œuvre d'énergie, potentielle et cinétique, mécanique et chimique. Les types d'énergie et leurs modalités d'action ont été récemment cadrés dans une nouvelle approche thermodynamique par Y. Quinif (1983) et A. Briffoz (1985). C'est aussi dans une optique thermodynamique que nous voulons envisager ici un des problèmes-clés des paysages karstiques souterrains : l'étonnante régularité que présentent parfois certains conduits sur de longues distances.

Le paradoxe que ceci représente sur le plan chimique a été très bien exposé, et sa littérature minutieusement dépouillée, par M. Bakalowicz (1977, et surtout 1979, p. 209 à 234).

Les cavités karstiques se forment en général à partir de fissures préexistantes dans lesquelles la saturation de l'eau claire est souvent atteinte en peu de mètres. Les eaux disposent, dans ces crevasses — comme ailleurs —, de deux types d'énergie : l'énergie mécanique d'origine gravifique et l'énergie électrochimique. Mais leur action semble très limitée vu l'étroitesse des conduits et la lenteur des circulations. D'où la préoccupation de nombreux chercheurs de trouver les processus susceptibles d'expliquer la permanence et parfois le calibrage et la régularisation de conduits souterrains sur de longues distances. Nous ne ferons pas ici la revue bibliographique du problème, qui est très longue, et que l'on trouvera dans M. Bakalowicz (1979), Y. Quinif (1983) et A. Briffoz, C. Ek et M. Gewelt (1985).

A tous les processus déjà avancés pour expliquer la prolongation de l'action chimique de l'eau, nous proposons d'ajouter le travail chimique existant naturellement, même en solution saturée, du fait d'échanges ioniques.

2. CONDUITS NON REGULARISES ET REACTIONS EN MILIEU SATURE

La saturation d'une eau n'implique pas la cessation de toute réaction, mais un bilan nul des réactions en sens opposés. Des phénomènes de dissolution restent donc possibles s'ils sont compensés par une précipitation simultanée dans le même milieu.

On va voir que ceci peut expliquer une régularisation et un calibrage progressifs de certains conduits.

Les fissures, au départ, n'ont pas une épaisseur parfaitement constante et il y a donc nécessairement des endroits où l'eau circule plus vite qu'à d'autres.

Si nous considérons une section transversale dans une fissure (c'est-à-dire une section perpendiculaire à la direction générale de l'écoulement de l'eau), il peut se produire une précipitation de calcaire dans les endroits où

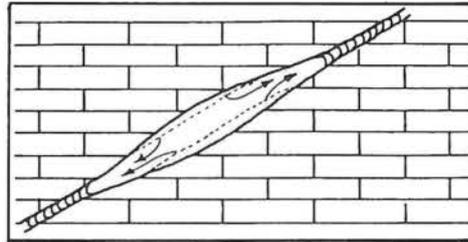
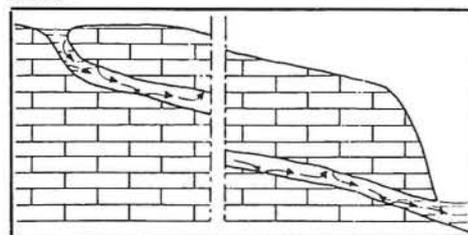


Fig. 1. Fissure remplie d'eau, vue en section transversale. La dissolution dans la partie la plus large de la fissure est compensée par de la précipitation simultanée dans les parties plus étroites.

la circulation est la plus lente, qui sont ceux où la fissure est la plus étroite, tandis que de la matière peut être simultanément enlevée par dissolution aux endroits où, du fait de la plus grande épaisseur de la fissure, l'eau circule plus rapidement (fig. 1). La conséquence est le comblement progressif des endroits où la fissure est la plus mince et l'élargissement corrélatif des endroits où la circulation est la plus rapide. La section transversale tendant ainsi vers une plus grande «isotropie», la vitesse pourra s'y accroître. La tendance à une meilleure «isotropie» est l'effet direct des actions électromagnétiques (entre atomes ou molécules), qui tendent à une uniformisation des distributions spatiales. Ceci est illustré par les plafonds de grottes ornés de stalactites où l'eau des fissures circule en fait en canalicules espacés (cheminement linéaire) alimentant chacun une stalactite.

Si l'on considère, d'autre part, la fissure en coupe longitudinale, on peut observer que l'eau y est saturée après un parcours très bref. On connaît pourtant des circulations en fissure sur de très longues distances. Nous pensons que, dans certains cas, ceci est dû à des échanges locaux de matière, l'eau précipitant du carbonate de calcium dans certains endroits où les conduits sont larges et la circulation lente, et dissolvant simultanément

Fig. 2. Fissure remplie d'eau, en section longitudinale. Dans la zone d'enfouissement des eaux, celles-ci sont agressives et enlèvent du calcaire; plus en aval, l'eau précipite du calcaire par endroits et enlève simultanément.



les zones d'étranglement où la vitesse et la perte de charge sont les plus fortes (fig. 2). D'où la régularisation de la forme du conduit. Ainsi, à la résurgence, dans l'eau saturée, on retrouvera éventuellement la même teneur en calcaire que celle qu'on aurait mesurée non loin de l'entrée; mais, par le jeu des petits déplacements liés aux réactions locales de dépôt et de dissolution, une partie du calcaire exporté proviendra du conduit parcouru par l'eau déjà saturée.

3. L'ABOUTISSEMENT: LA REGULARISATION DES CONDUITS ET L'EXTENSION DES RESEAUX KARSTIQUES

Les fissures tendant progressivement vers une forme cylindrique, calibrée, hydrauliquement plus favorable, peuvent donner naissance à des réseaux longs et développés. Ceci s'explique par le fait que l'équilibre de saturation n'implique pas l'arrêt de toute réaction mais l'égalité des réactions chimiques dans les deux sens. Nous avons récemment montré que l'existence de ces réactions ne peut être mise en doute dans certains cas où elle est révélée par des échanges isotopiques observables entre phases dans un même milieu (A. Briffoz, C. Ek et M. Gewelt, 1985).

Le résultat morphologique est la naissance de conduits plus «isotropes» et comportant des pertes de charge moindres.

OUVRAGES CITES

BAKALOWICZ (M.) - 1977 - Relations entre la dynamique des eaux du karst et la karstification. Proceedings of the 7th International Speleological Congress, Sheffield, p. 10-12.

BAKALOWICZ (M.) - 1979 - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 269 p.

BRIFFOZ (A.) - 1985 - Des influences possibles de la thermodynamique sur la forme des conduits karstiques originels. Ann. Soc. Géol. Belgique, vol. 108, p. 255-259.

BRIFFOZ (A.), EK (C.) et GEWELT (M.) - 1985 - Karstification souterraine en milieu saturé. Ann. Soc. Géol. Belgique, vol. 108, p. 251-254.

QUINIF (Y.) - 1983 - Eléments d'une approche énergétique du karst. Application à quelques exemples réels de karsts. Karstologia, vol. 1, p. 47-53.

Question de J. NICOD : votre schéma reste-t-il valable pour un état de sursaturation ?
Réponse : les phénomènes deviennent alors de moins en moins probables.

Question de R. Maire : que se passe-t-il dans le cas de recoupement de fissures ?
Réponse : on peut alors assister à un mélange des eaux et à une modification des conditions physico-chimiques et hydrologiques.

DIFFERENTES FORMES DE CONCRETIONNEMENT CARBONATE D'ORIGINE BIOGENIQUE AU MAROC ATLANTIQUE ET LEUR LOGIQUE DE DEVELOPPEMENT

J.-P. ADOLPHE*
A. WEISROCK**

*Maître de conférences à l'université de Paris VI et UA 722
4, place Jussieu 75230 PARIS Cédex 05

**Professeur à l'université du Maine et UA 722
BP 535 72017 LE MANS Cédex

1. DIFFERENTES FORMES DE CONCRETIONNEMENT CALCAIRE AU MAROC ATLANTIQUE.

Les observations de terrain ont été effectuées d'abord par A. Weisrock dans le cadre de ses recherches pour le Doctorat d'Etat de Géomorphologie sur l'Atlas atlantique, c'est à dire essentiellement entre Safi et Agadir et dans leurs arrière-pays, de 1972 à 1978 (fig. 1). Elles ont été complétées par deux missions de terrain de l'U.A. 722 du CNRS, la première en 1981, à Agadir, Imouzzer des Ida Ou Tanane et Essaouira (A. Weisrock, J.-P. Adolphe, G. Coude-Gaussen, P. Rognon et Th. Vogt) et la seconde entre El Jadida et Agadir, en 1984 (A. Weisrock, J.-P. Adolphe, A. Chahjoun, A. Hourimeche et T. Hssaïda).

Nous remercions P. Rognon, responsable

de l'U.A. 722 du CNRS, ainsi que MM.M. Bensaïd et M. Dahmani, directeurs des Services géologiques du Maroc, pour toutes les facilités qui nous ont été accordées au cours de ces missions.

Le Maroc Atlantique moyen et méridional est connu depuis longtemps pour être une région particulièrement riche en dépôts carbonatés, liés à des substrats mésozoïques calcaires et à une nuance climatique semi-aride humidifiée par l'Océan. On peut y observer les différentes formes de concrétionnements calcaires suivantes :

1. Les concrétionnements calcaires «fossiles».

Ce sont ceux qui s'imposent le plus largement dans le paysage, surtout sous forme

d'encroûtements de forte épaisseur, à tel point que l'on pourrait parler d'une «civilisation de la croûte» en pays Abda, Chiadma et Haha, c'est à dire sur les bas-plateaux proches de l'Océan. Dans l'arrière pays montagneux, on observe des formes d'encroûtement multiples, à plusieurs niveaux au sein des coupes, et aussi des concrétionnements plus ponctuels sous forme de travertins.

a) les croûtes calcaires. Bien qu'elles aient déjà fait l'objet de très nombreuses descrip-

Fig. 1. Carte de situation.

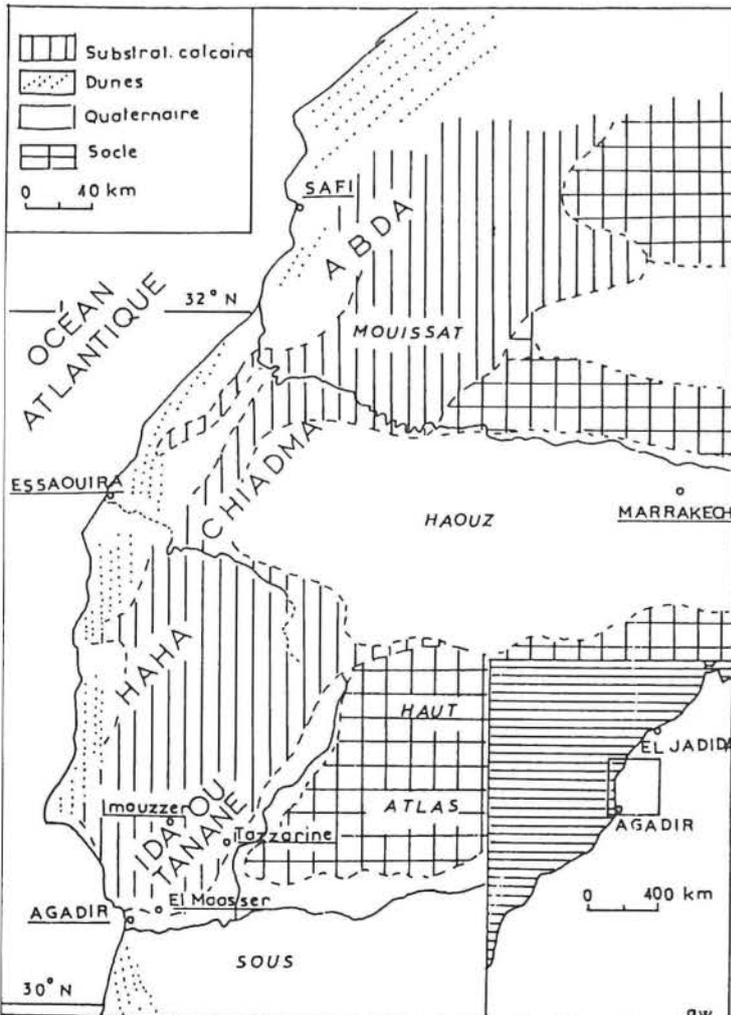
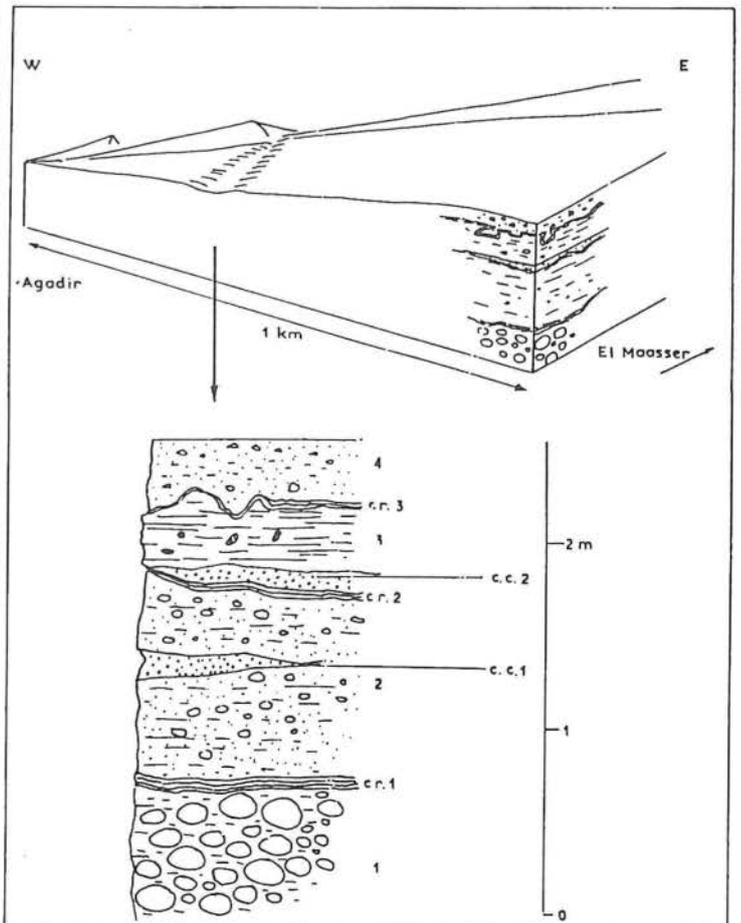


Fig. 2. Coupe d'une tranchée d'adduction d'eau à travers le glacis-cône d'El Maasser. 1 = conglomérat à galets calcaires cimentés 2 = conglomérat hétérométrique (galets, sables), plus ou moins lité. 3 = dalle calcaire conglomératique. 4 = sol brun graveleux sous Arganiers. Cr. 1, 2, 3 = croûtes zonales. c.c. 1, 2 = concrétionnements en cocons.



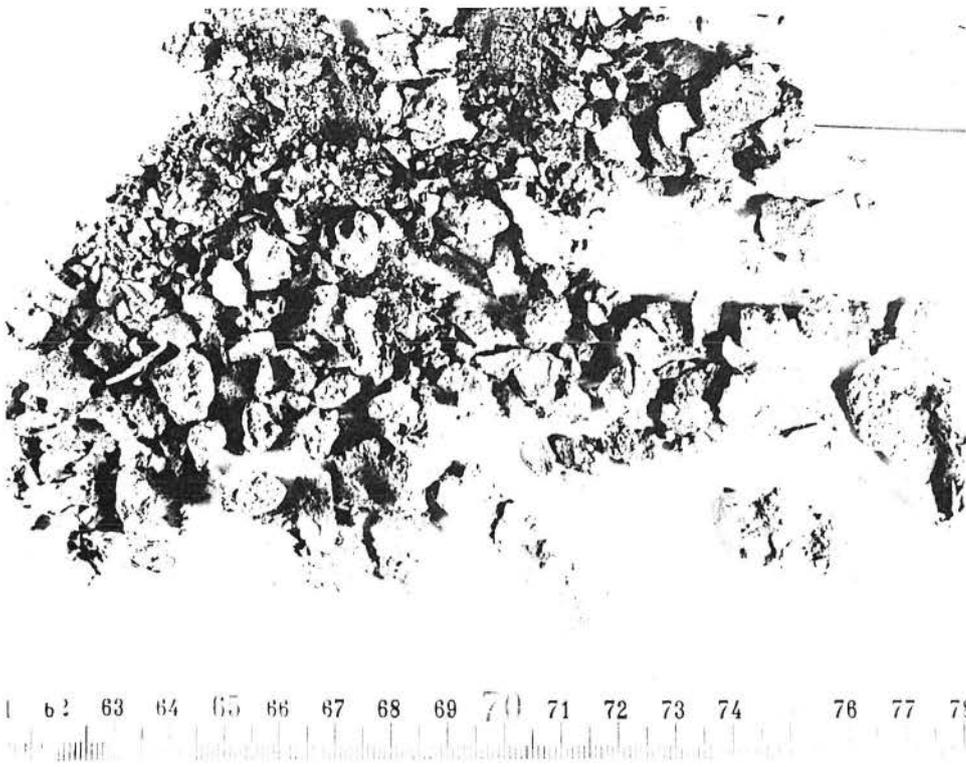


Photo 1. Pellicules organo-minérales actuelles récoltées autour des galets de l'Oued d'Imouzzer le 28 octobre 1981.

tions, on peut, dans ce cadre régional, rappeler qu'elles se présentent sous deux faciès fondamentaux, la croûte calcaire «conglomératique» et la croûte «zonaire» (J.P. Adolphe et A. Hourimeche, 1984).

La **croûte calcaire conglomératique**, extrêmement répandue, est constituée par des éléments détritiques hétérométriques autour desquels on observe une fine pellicule calcitique de couleur foncée, noirâtre ou parfois colorée en rouge par des concentrations ferrugineuses; le tout est enrobé dans un ciment calcaire à grains de quartz façonnés par l'eau essentiellement (émoussés luisants), seuls quelques grains ronds-mats attestant un transport par le vent.

Certaines croûtes de ce type à histoire complexe montrent qu'elles résultent de l'agglomération de fragments d'anciennes croûtes,

Photo 3. Voiles incrustants développés autour des bactéries réactivées d'un travertin fossile de Tazarine.

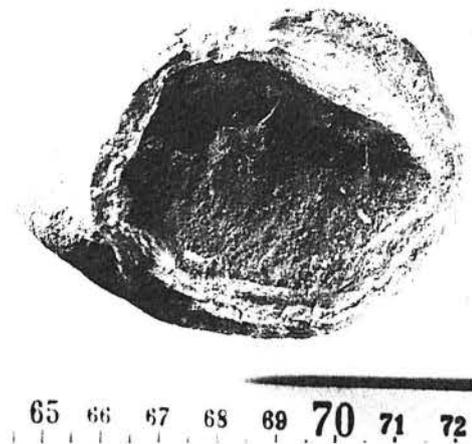
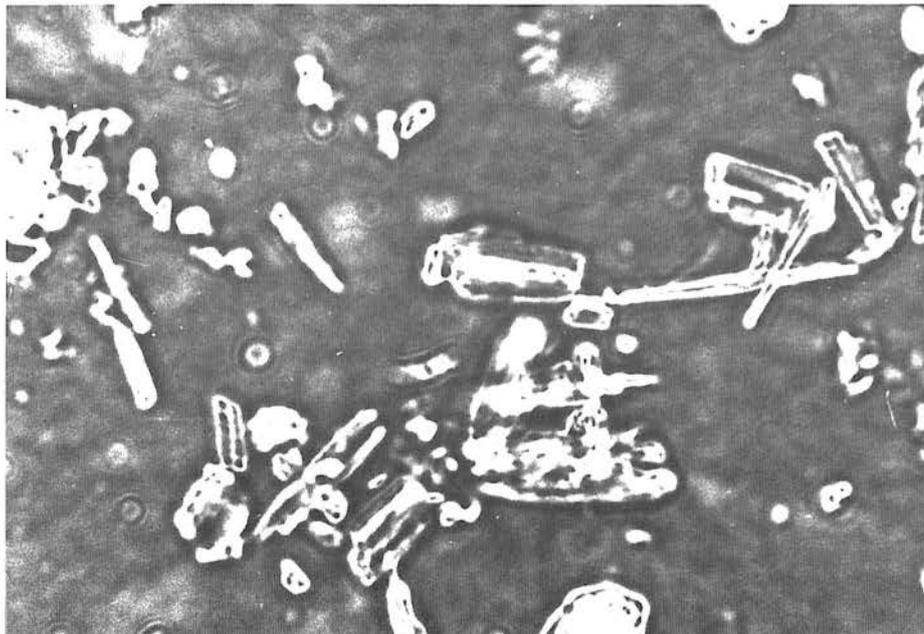


Photo 2. Accroissement des pellicules calcaires autour d'un galet (Tamghart, 10 km N d'Agadir).

constituant des noyaux, enveloppés de cortex zonés, le tout repris dans un nouveau ciment. La **croûte zonale** se présente sous forme de fines laminations; elle résulte d'une sédimentation de boue finement litée piégeant de petites particules sableuses dont les quartz subanguleux et brillants témoignent d'un bref transport aquatique. Elle constitue presque toujours le sommet des accumulations.

Ces deux types de croûtes se retrouvent constamment associés, la croûte zonale surmontant toujours la croûte calcaire conglomératique, en continuité ou non. On trouve ainsi sur certains sites une succession de croûtes alternativement conglomératiques et zonaires.

b) les encroûtements «pédo-karstiques». Si ces deux premiers types de croûtes jouent un rôle morphologique fondamental, surtout parce qu'ils recouvrent de vastes étendues de plateaux, de glacis et de terrasses alluviales, on s'aperçoit aussi que, dans les coupes de

terrain, il existe des encroûtements répétitifs, à divers niveaux. Certains de ces encroûtements peuvent prendre une forme tout à fait différente, de petits granules calcaires de quelques millimètres de diamètre, dits «concrétionnements en cocons». Contrairement aux deux premiers types de croûtes qui cimentent ou scellent les niveaux qu'ils affectent, les concrétionnements en cocons se trouvent dans des niveaux non consolidés, d'apparence terreuse, ou dans des fentes de karstification du matériel sédimentaire, très souvent empruntées par des racines.

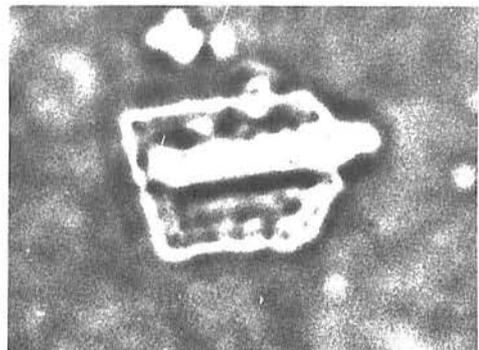
c) les travertins. Ils sont surtout bien représentés dans l'Atlas atlantique et à sa périphérie, liés à la fois à l'alimentation suffisante des oueds en eaux carbonatées et aux conditions topographiques favorables. Les cascades sont les sites de prédilection de vastes massifs travertineux, déjà décrits dans le détail à Imouzzer des Ida Ou Tanane (A. Weisrock, 1981). Souvent ces très vastes édifices, d'allure tabulaire, sont coupés aujourd'hui de toute source d'alimentation en eau et prennent l'allure de buttes-témoins isolées à l'avant des versants. Un grand nombre d'entre-eux a d'ailleurs servi jadis de greniers troglodytiques.

2. Observations sur les phénomènes actuels.

Dès 1941, J. Dresch avait fort justement remarqué que «la croûte est vive dans le domaine de l'Arganier». Une observation attentive des phénomènes actuels confirme tout à fait cette remarque.

a) les concrétionnements fluviaux. Après une pluie suffisante pour engendrer de forts écoulements, on remarque dans le lit des oueds à nouveau à sec, que les galets sont

Photo 4. Détail de la culture précédente. On distingue nettement le bâtonnet bactérien et sa gangue minérale.



enrobés d'une pellicule boueuse de couleur rose clair, d'abord humide durant quelques temps, puis qui sèche en se fendillant plus ou moins.

De la même manière, à la fin du printemps, en général après les pluies d'avril, les édifices travertineux d'Imouzzer encore parcourus par les eaux des cascades sont éclatantes de blancheur, alors que les portions d'édifices qui n'ont pas été recouverts d'eau ont une teinte rougeâtre. Sur les premiers s'est déposée une pellicule carbonatée blanche très continue.

b) autres encroûtements plus ponctuels. Lors des périodes sèches, tous les sentiers du Maroc Atlantique, parcourus par des multitudes de troupeaux, s'emplissent de poussières carbonatées qui se soulèvent en tourbillons au moindre passage; il en est de même le long des pistes où il n'est guère agréable de rouler en convoi. La moindre mare, zone humide ou couverte de végétation basse est alors un piège pour les poussières qui y retombent. De la même manière, toute averse assez forte plaque au sol la poussière qui donne alors une pellicule boueuse glissante.

Même les secteurs particulièrement secs, comme celui des dunes littorales d'Essaouira, voient se produire ce type de phénomène, à la fois dans les lettres interdunaires où stagne un peu d'eau après la pluie, et jusqu'à la crête des dunes, parcourue par des milliers de goélands: les déjections de ces oiseaux sont le point de départ d'un encroûtement pelliculaire très actif.

c) les concrétions en cocons. Un examen attentif permet de les retrouver dans les sols actuels. Prenons un exemple:

à quelques kilomètres d'Imouzzer des Ida Du Tanane, la route traverse une forêt claire de chênes-verts, à 1 100 m d'altitude. Cette illaie pousse sur un substratum de calcaires lutomitiques karstifiés. Dans le sol brun peu volé qui remplit partiellement les lapiès, on trouve des agrégats millimétriques blanchâtres ou de couleur brun-ocre, rappelant des cocons par leur forme.

Cet exemple n'est pas unique: on a retrouvé des cocons similaires chaque fois que l'on a examiné un sol peu épais, de type VC sur calcaire en voie de karstification: elle-ci est tributaire du réseau de fissures suivies et agrandies par les racines; les cocons se trouvent le long de ces fissures, surtout lorsqu'elles sont subhorizontales: c'est là qu'ils sont le mieux minéralisés.

Au vu de ces observations de terrain, trois problèmes principaux se posent:

- celui des mécanismes de genèse de ces divers types de concrétionnements;
- celui des rapports entre les formes actuelles et les formes «fossiles» ou supposées telles: la frontière entre les deux n'est pas évidente. Ceci pose la question du rôle chronologique des encroûtements;
- celui des rapports entre types de concrétionnements et micro-environnements, autrement dit du rôle des concrétionnements en tant qu'indicateurs de milieu.

LES LIENS GENETIQUES ENTRE LES DIFFERENTES FORMES DE CONCRETIONNEMENT CALCAIRES DU MAROC ATLANTIQUE.

1. Méthode d'étude expérimentale.

a) sur le terrain. Il a été procédé à une récolte systématique d'échantillons à la fois des phénomènes actifs à l'heure actuelle et d'échantillons voisins ayant une signification morphologique d'héritage indubitable (encroûtement de glaciais, de terrasse alluviale, massif travertineux...) Un fragment de chaque

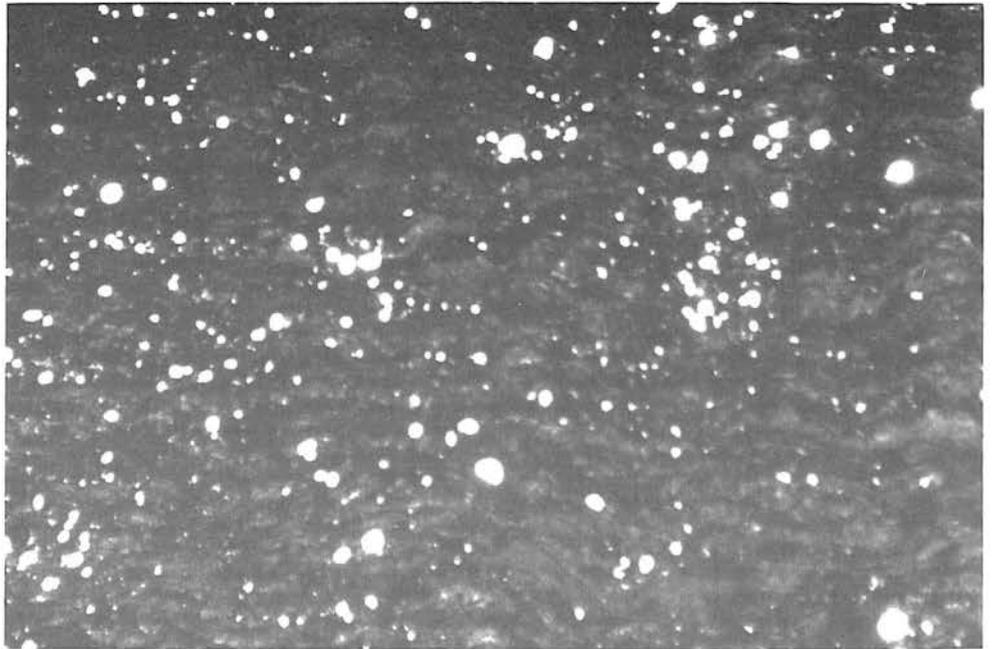


Photo 5. Croûte zonaire: filaments incrustés de calcium. X 40

échantillon a été placé immédiatement en tube à essai sur un milieu de culture synthétique stérile, tandis qu'un témoin était conservé à part.

b) en laboratoire, le suivi de ces cultures a été assuré depuis 1981, afin d'étudier de manière qualitative le rôle des micro-organismes sur le développement des cristallisations, parallèlement à une tentative de quantification du phénomène utilisant des éléments minéraux marqués dont on a pu suivre l'adsorption durant le développement des microbes (J.P. Adolphe et al., dans ce Colloque). Les productions carbonatées obtenues expérimentalement ont fait l'objet, comme les échantillons de terrain, d'observations classiques de pétrographie sédimentaire et d'étude au microscope à balayage.

2. Résumé des principales relations mises en évidence.

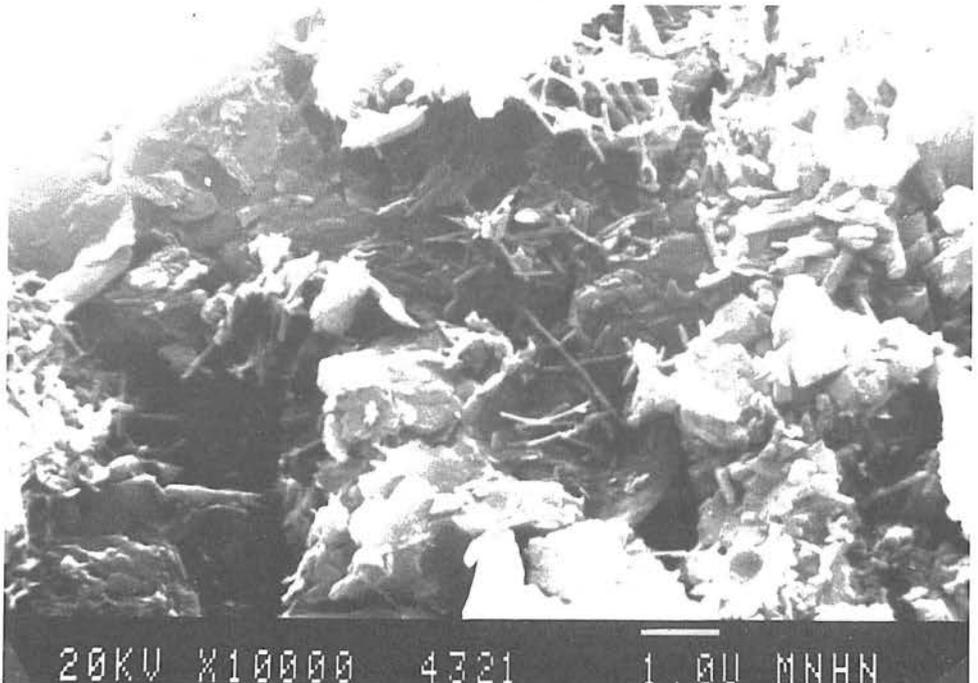
L'ensemble des expérimentations et observations micrographiques ayant porté sur un

grand nombre d'échantillons et étant relaté avec plus de détails par ailleurs, on ne retiendra ici que les principales conclusions.

a) les concrétionnements «fluviaux» élémentaires. Le type est à l'évidence fourni par les pellicules organo-minérales enrobant les galets des oueds après les crues. Au sein de ces pellicules calcaires fines, on observe des réseaux organiques avec toute une flore de champignons très abondants, associés à des bactéries. Ces pellicules sont donc des concrétionnements mycéliens originaux (photos 1 et 2). Il y a une analogie entre ces pellicules carbonatées formées actuellement et celle qui enrobent des galets, ou autres nuclei repris dans des formations plus anciennes et plus complexes, de même qu'avec celles des concrétionnements qui s'effectuent actuellement dans les rivières du Bassin Parisien (J.P. Adolphe et G. Rofes, 1973).

Les dépôts calcaires des travertins actifs montrent également des trames algues et bactériennes, ce qui dénote déjà une certaine parenté avec le phénomène précédent. Mais,

Photo 6. Croûte zonaire: voiles bactériens calcaires.



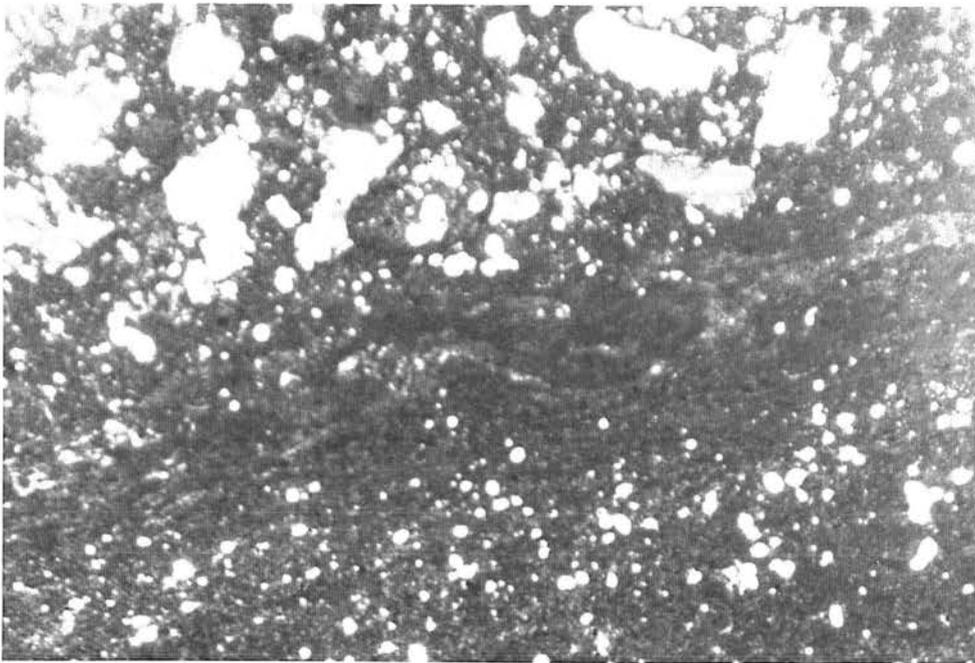


Photo 7. *Eléments détritiques à façonnement fluvial au sein d'une croûte zonaire. X40*

en ce qui concerne les travertins, un échantillon provenant du massif fossile de Tazzarine-Alemzi, aujourd'hui coupé de tout écoulement, et donc considéré comme «fossile», a pu être réactivé. Le bilan organique de cet échantillon se compose d'algues, de bactéries, de champignons et de pollens; ce sont les bactéries qui ont pu être réactivées en les plaçant dans un milieu de culture stérile: elles ont donné naissance à de nombreux voiles incrustants en utilisant les éléments minéraux prélevés dans le milieu de culture. Ceci démontre le rôle fondamental de la matière organique et notamment du D.N.A., tant qu'il reste en bon état, dans la genèse de la gangue cristalline: il reste donc, dans une construction morphologique apparemment fossile, la possibilité d'un développement nouveau pour peu que les conditions locales redeviennent favorables. Par ailleurs, si on a pu observer que les algues et leurs formes de croissance sont responsables de la structure d'ensemble des concrétionnements: colonies hémisphériques, coussinets, tapis — ce qui rejoint tout à fait les observations faites sur les constructions oncolithiques et stromatolithiques algaires d'eau douce (J.P. Adolphe et G. Rofes, 1973; J. Casanova, 1984) — force est de reconnaître aussi le rôle non négligeable, et même parfois primordial, des bactéries et des champignons (J.P. Adolphe, 1980).

Ce premier groupe d'expérimentations et d'observations montre enfin qu'en tout état de cause, ces mécanismes requièrent, pour se développer, de l'eau en grande abondance; c'est pourquoi nous regroupons les encroûtements pelliculaires sur galets et les revêtements travertineux sous le terme de concrétionnements «fluviaux».

b) croûtes zonaires et croûtes calcaires conglomératiques: deux «faciès fluviaux» complexes. Dans la plupart des croûtes zonaires, on reconnaît à la loupe, à un grossissement modeste, un amalgame de filaments incrustés de calcium. Ceci s'apparente tout à fait à ce que l'on observe sur les encroûtements oncolithiques et stromatolithiques classiques, actuels ou fossiles. L'existence de micro-organismes dans les croûtes est donc un fait bien établi. Comme dans le cas des travertins rubanés, le rôle des algues est essentiel en ce qui concerne l'organisation texturale du sédiment, mais on reconnaît aussi l'influence des bactéries, qui sont res-

toute vraisemblance, d'une genèse en milieu aquatique. Il est vraisemblable que le passage de la croûte conglomératique à la croûte zonaire traduit une modification du régime des eaux; les éléments détritiques de la croûte conglomératique se sont déposés en milieu plus agité et à plus fort courant que celui qui préside à la mise en place de la croûte zonaire, sans qu'il y ait eu nécessairement un grand bouleversement du contexte hydrographique. Un écoulement moins turbulent permet le dépôt de fines particules et le développement d'algues sous une lame d'eau de faible épaisseur, ce qui permet à la croûte zonaire de succéder à la croûte conglomératique. Ces alternances de sédimentation grossière granoclassée et de sédimentation finement litée se retrouvent d'ailleurs constamment, à d'autres échelles, dans les réseaux fluviaux: alternances sédimentaires «concrétions-boue» des rivières du Bassin de Paris; au Maroc atlantique, alternances lentilles conglomératiques-lentilles de limons fins dans toutes les terrasses alluviales (A. Weisrock, 1984).

Il apparaît donc tout à fait abusif de considérer les croûtes zonaires du Maroc atlantique comme des marqueurs spécifiques d'aridité, comme cela a été proposé à l'échelle nord-africaine (T. VOGT, 1983), en fonction, il est vrai d'exemples choisis dans des régions plus continentales et plus arides.

c) concrétionnements embryonnaires en cocons et paléosols à encroûtements multiples. Les concrétions en cocons renferment tous une microflore abondante constituée de bactéries et de mycélium. Ces bactéries sont actives, même lorsque les cocons proviennent de paléosols: tous les essais de reproductibilité effectués à partir de ces souches ont été positifs, et c'est un échantillon prélevé près d'Imouzer qui a servi à l'étude expérimentale de la redistribution du ⁴⁵Ca par intervention des microorganismes. Toutefois, sur le plan morphologique, il faut noter que l'on a obtenu des cristallisations et des constructions nouvelles de formes complexes, et non

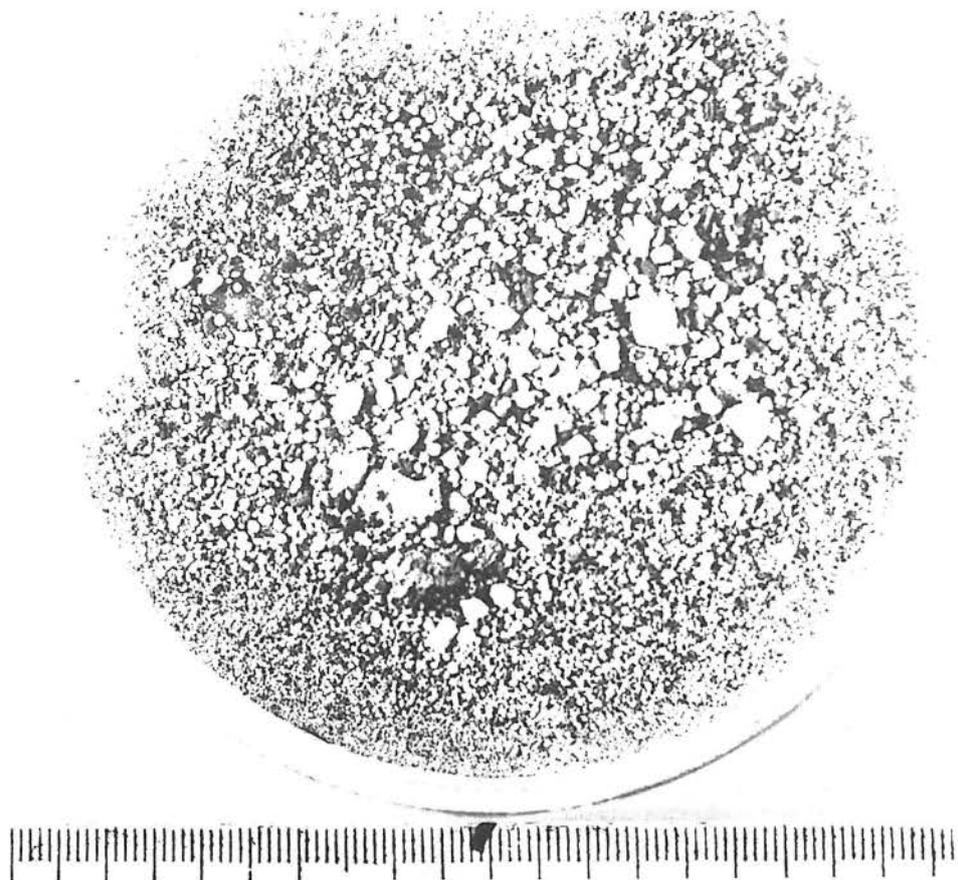
responsables de la constitution de «voiles bactériens», également calcifiants.

En ce qui concerne les éléments détritiques contenus dans les croûtes conglomératiques, leur observation morphoscopique montre le plus souvent qu'ils sont d'origine fluviale. Ce peut être aussi le cas dans les croûtes zonaires, même si certaines fines particules détritiques présentent un façonnement éolien.

Le ciment calcaire qui entoure les grains (croûtes conglomératiques) présente de grandes analogies avec ce qui a été décrit pour les pellicules enrobant les galets, ce qui montre ici le rôle prépondérant des bactéries et des champignons.

Ainsi, croûte zonaire et croûte calcaire conglomératique, au vu de leur contenu organique et sédimentologique, relèvent, selon

Photo 8. *Concrétionnements en cocons actuels, récoltés près d'Imouzer.*



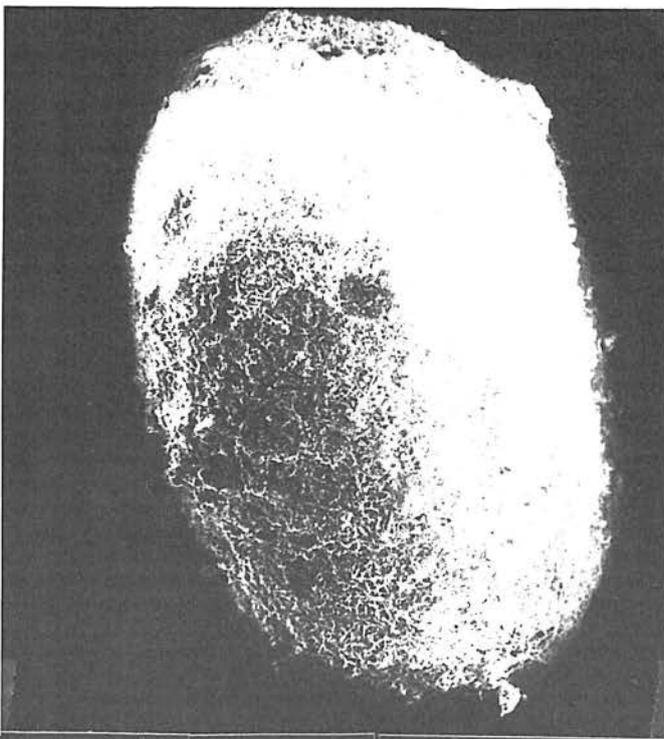


Photo 9. Détail d'un «cocon» à structure filamenteuse (bactéries et mycélium).

pas de cocons; ce phénomène est encore en cours d'étude.

Par rapport aux autres formes de concrétionnement, le fait original est que la minéralisation ne s'effectue plus ici en milieu aquatique, mais semble-t-il à l'air libre: les cocons actuels ont toujours été trouvés dans des sols peu évolués sur roche mère karstifiée; les cocons «anciens» dans des formations ayant subi une ou plusieurs phases de pédogenèse. Ainsi, à El Maasser, près d'Agadir, on a observé au sein d'une accumulation détritico-piémontaise, une coupe fraîche (tranchée d'adduction d'eau) où deux niveaux de paléosols à cocons pouvaient être distingués. Si cette forme de concrétionnement se révélait bien spécifique d'un type d'altération pédologique — ce que les observations effectuées jusqu'à présent ne contredisent pas, puisque certaines variétés de cocons résultent d'une désagrégation granulaire de la roche mère, l'autres ayant pour origine des boulettes, de déjections de vers et d'insectes — on disposerait là d'un bon repère pour une chronologie relative des phases de pédogenèse au sein d'une coupe donnée. Sur le piémont d'El Maasser, on peut ainsi penser que les deux derniers mètres de remblaiement ne se sont mis en place qu'au cours de phases détritico-alluviales interrompues au moins par leurs périodes d'évolution pédologique à l'air libre, sous couvert végétal.

II. CONCLUSIONS

Progrès dans la connaissance de la biolithogénèse.

Dans tous les échantillons, la présence de microorganismes est mise en évidence. Les déterminations de ces microorganismes (bactéries, algues, champignons) par cultures pures, car il y a nécessité de connaître leur

physiologie pour les déterminer exactement, sont encore en cours (J.P. Adolphe, en collaboration avec J. Paradis, de l'Institut Pasteur, et G. Amichot, de l'I.N.S.E.R.M.) La méthode expérimentale a permis la reproduction des mécanismes de la biolithogénèse, avec des résultats comparables à ceux du terrain dans certains cas (pellicule rubannée), des résultats différents dans d'autres cas (cocons). Les essais se poursuivent, avec des milieux de cultures sélectifs, pour essayer d'établir s'il y a bien un lien entre tel et tel microorganisme et tel ou tel faciès de cristallisation. Il est encore trop tôt pour donner des ordres de grandeur de la rapidité et de l'ampleur des phénomènes, qui semblent cependant obéir à des rythmes biologiques (phases de latence, de croissance exponentielle, stationnaire et de déclin) au cours de leur genèse.

2. Conséquences sur les interprétations géomorphologiques

Bien que l'on sache reconnaître les microorganismes anciens au sein des dépôts, la frontière devient floue entre les concrétionnements actuels et les concrétionnements fossiles, puisqu'il semble y avoir toujours une possibilité de réactivation de ces derniers. Des phases d'accroissement peuvent être ainsi interrompues par des phases de repos plus ou moins longues. Plus que jamais la prudence s'impose dans l'attribution d'une valeur chronologique aux croûtes calcaires et travertins.

Hormis pour les concrétionnements algaires d'eau douce et les travertins, où les conditions de l'accroissement, liées à des macroorganismes, sont bien nettes (J.P. Adolphe et G. Rofes, 1973; M.A. Geurts, 1975; A. Weisrock, 1980; J. Casanova, 1982), il n'est pas possible encore de quantifier la vitesse de l'accroissement des concrétionnements couvrant de vastes espaces comme les croûtes. Il est toutefois bien évident que la constitution de dalles calcaires — du type de la dalle rose saumon «villafanchienne», si courante en

Afrique du Nord — a requis de très longues durées.

En revanche, la mise en évidence du rôle capital des microorganismes dans la genèse des concrétionnements permet de démontrer des relations dynamiques et microclimatiques nettes entre certains faciès et leur environnement génétique: encroûtements «fluviaux» à forte ou faible énergie, témoins de phases pédo-karstiques... Mais il reste toujours très délicat de passer de l'observation de figures élémentaires aux constructions de la nature.

J.-P. ADOLPHE
A. WEISROCK

OUVRAGES CITES

ADOLPHE J.P. (1980) - Ecomorphologie des édifices carbonatés bactériens. Communication hors fascicule. Réunion «Carbonates», 17-18 novembre 1980, Université de Bordeaux III.

ADOLPHE J.P. (1981) - Observations et expérimentations géomicrobiologiques et physicochimiques des concrétionnements carbonatés continentaux actuels et fossiles. Thèse doct. d'Etat, Univ. Paris VI.

ADOLPHE J.P., AMICHOT G., DELMAS, M., PARADIS J., REVEL G., SIMONIN X., SOLEILHAVOU F. (1985) - Etude expérimentale de la redistribution du ⁴⁵Ca par intervention de micro-organismes. Journée internationale de Karstologie, Metz, 23-25 mai 1985.

ADOLPHE J.P., ROFES G. (1973) - Concrétionnements calcaires de la Lévière (affluent de l'Epte, département de l'Eure). Bull. de l'A.F.E.Q., 2, 79-87.

CASANOVA J. (1982) - Morphologie et biolithogénèse des barrages de travertins. In «Formations carbonatées externes, tufs et travertins», J. Nicod éd., Aix, 45-54.

CASANOVA J. (1984) - Genèse des carbonates d'un travertin pléistocène: interprétation paléocéologique du sondage Peyre I (Combrégnac, Aveyron). Géobios, 8, 219-225.

DRESCH J. (1941) - Recherches sur l'évolution du relief dans le massif central du Grand Atlas, le Haouz et le Sous. Thèse, Arrault, Tours, 712 p.

GEURTS M.A. (1975) - Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. Acta geographica Lovaniensia, 16, 66 p.

HOURIMECHE A. (1984) - Etude comparative de concrétionnements carbonatés continentaux quaternaires et actuels du Nord de la France et de l'Atlas atlantique (Maroc). Mémoire de D.E.A., sous la direction de J.P. Adolphe, Paris VI, 77p. dactyl.

VOGT T. (1983) - Types et genèse de croûtes calcaires (France méditerranéenne, Afrique du Nord). Thèse doct. d'Etat, Univ. Paris VI.

WEISROCK A. (1980) - Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas atlantique (Maroc). Thèse doct. d'Etat, Univ. Paris I, 931 p.

WEISROCK A. (1981) - Morphogénèse des édifices tuffeux d'Imouzzer Ida Ou Tanane (Maroc). In «Formations carbonatées externes, tufs et travertins», J. Nicod éd., Aix, 157-170.

WEISROCK A. (1984) - Nappes alluviales et basses terrasses du Maroc atlantique. Bull. de l'A.F.E.Q. 1/2/3, 181-185.

Question de R. Maire : a-t-on procédé à des datations radiométriques sur certaines croûtes massives?

Réponse : les essais de datation n'ont pas porté sur les croûtes massives mais sur certaines accumulations carbonatées: 18000 ans BP pour des concrétions contenues dans des limons, 16000 ans BP pour une croûte zonale (Mathieu). En règle générale, il est difficile d'établir une relation entre les phénomènes actuels et anciens (problème d'échelle) et donc de passer de la datation relative à la datation absolue.

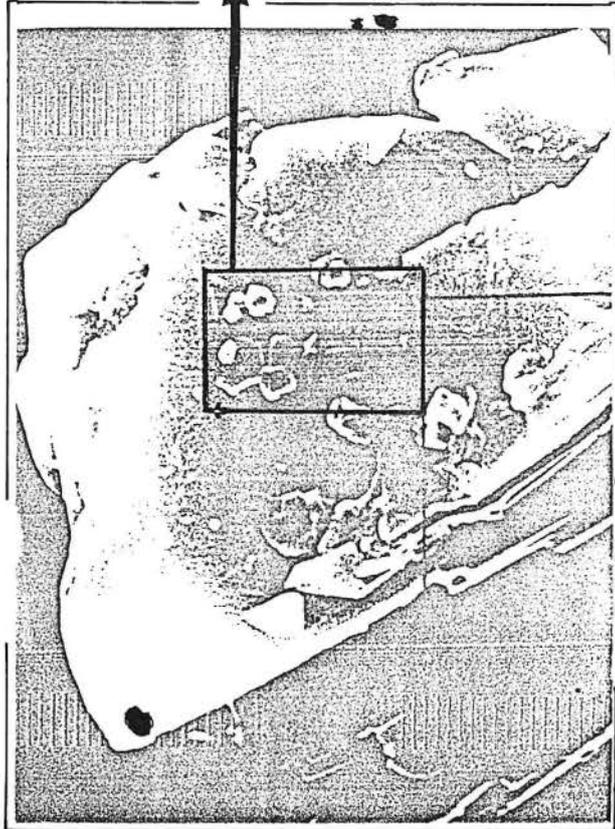


Fig. 3a. Culture âgée de 15 jours

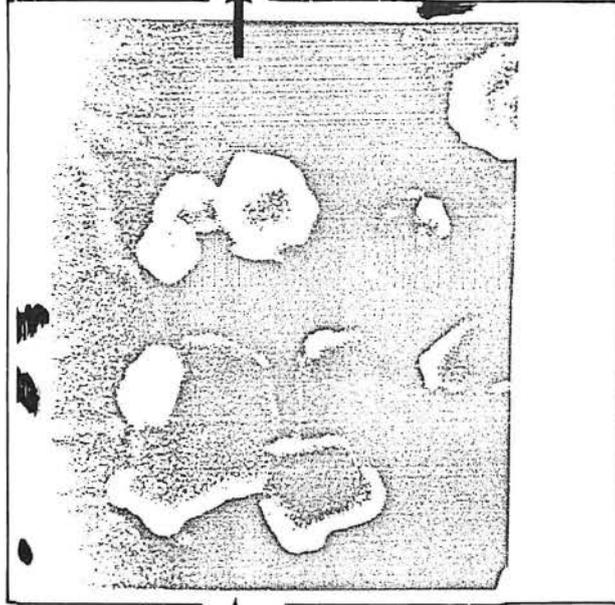


Fig. 3b

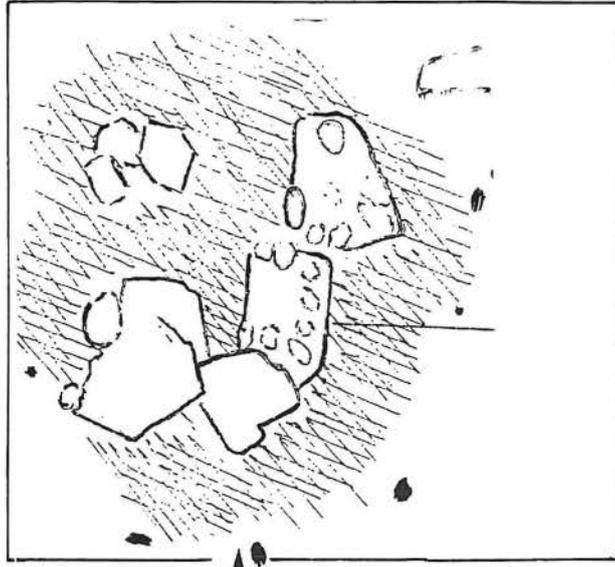


Fig. 3c. Individu cristallin micrométrique composé de microorganismes calcifiants

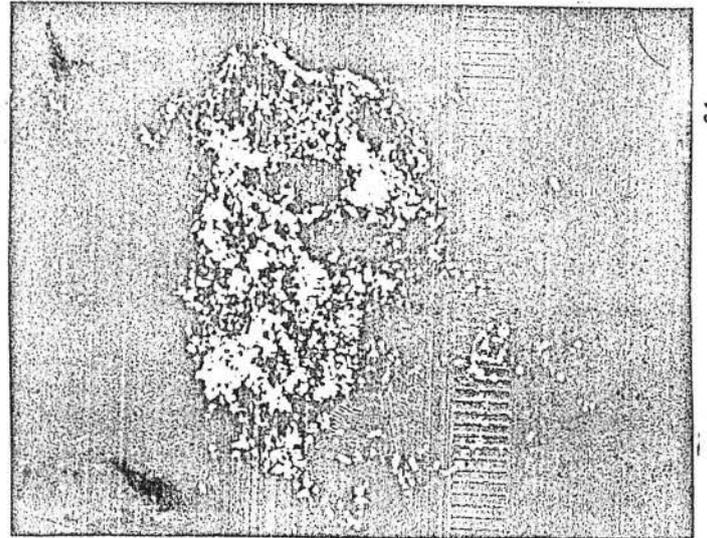


Fig. 4. Culture âgée d'un mois

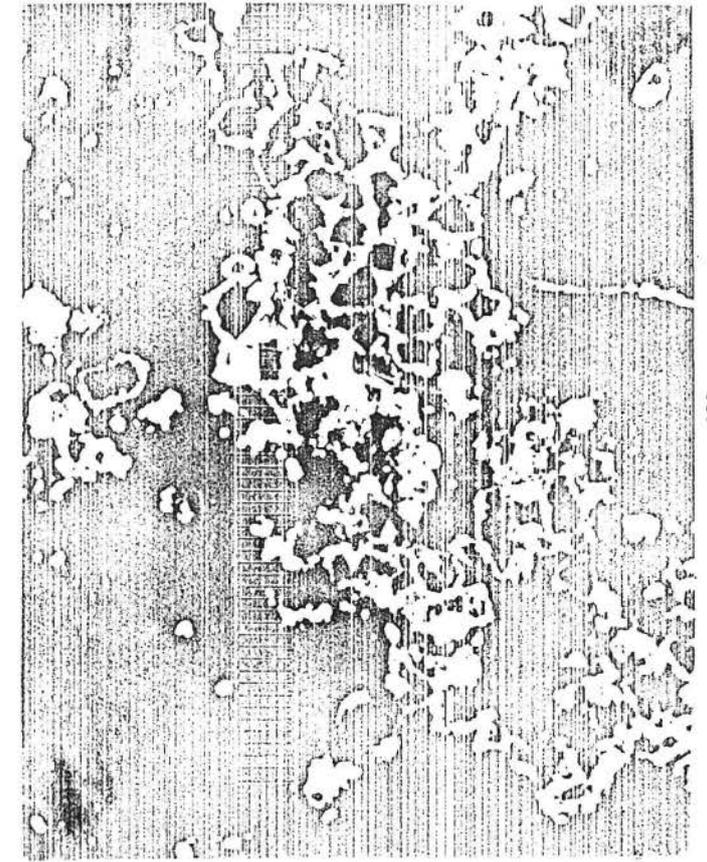


Fig. 5. Culture âgée de deux mois

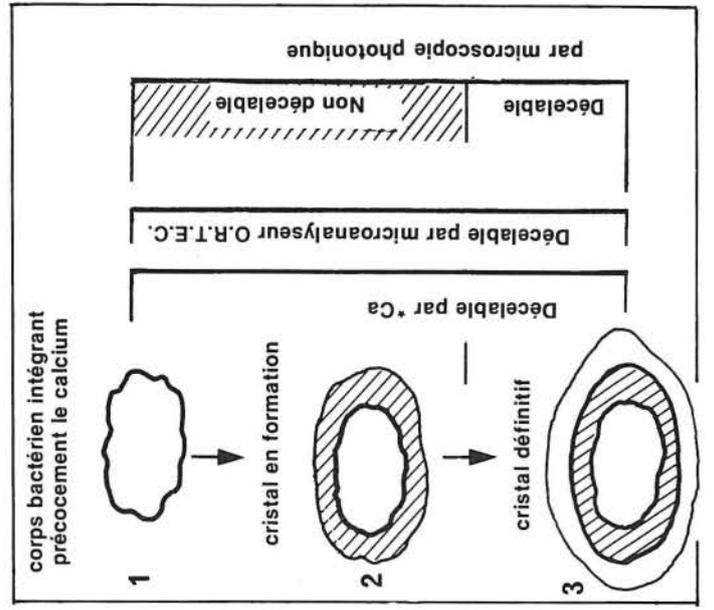


Fig. 6. Etapes de la cristallogenèse bactérienne

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA REDISTRIBUTION DU ^{45}Ca PAR INTERVENTION DE MICROORGANISMES

J.-P. ADOLPHE
G. AMICHOT
M. DELMAS
J. PARADAS
G. REVEL
X. SIMONIN
F. SOLEILHAVOUP

A partir d'une hypothèse émise par J.-P. Adolphe et C. Bayard, nous avons élaboré un protocole expérimental en collaboration avec le Laboratoire d'analyse par activation Pierre Curie du Commissariat à l'Energie Atomique de Saclay, pour suivre par radioactivité au cours du temps l'intégration du Calcium au sein de voiles bactériennes issues d'échantillons carbonatés actuels.

En effet de multiples concrétionnements carbonatés issus de milieux aussi variés que ceux des domaines marin, lagunaire ou continentaux (hydrographique, karstique, pédologique) doivent leur origine au moins pour une part à l'action de microorganismes.

Nous avons mené cette étude quantitative du phénomène d'intégration du Calcium au sein du voile bactérien au moyen de l'isotope radioactif du Calcium ^{45}Ca , présent dans le milieu de culture en faible quantité.

Plusieurs hypothèses sont émises sur les mécanismes de précipitation bactérienne des carbonates. Les principales mettent en cause un rôle indirect ou au contraire un rôle direct des bactéries. Dans le premier cas, les bactéries vivantes mais passives induisent cette précipitation en créant des conditions favorables en agissant sur le milieu. Dans le second cas les bactéries agissent de façon beaucoup plus directe en concentrant activement les ions Ca^{2+} , principalement au niveau de leurs enveloppes après un passage cellulaire probable. Les bactéries serviraient alors de «germes cristallins» amenant ainsi la formation de cristaux.

Dans cette seconde hypothèse, qui est la nôtre, on ignore de toute façon le degré d'implication des microorganismes, entre autres, s'ils ne font qu'amorcer le phénomène ou s'ils interviennent d'un bout à l'autre du processus de cristallogenèse. Les bactéries pourraient également n'intervenir que comme site de nucléation durant leur vie et c'est avec le temps que le carbonate de calcium recouvrant les cellules bactériennes mortes engendrerait des cristaux de grande taille.

Nous avons tout d'abord préparé un milieu de culture favorable au développement de groupements microorganismes préalablement extraits de deux échantillons types appelés respectivement «galet enrobé» (concrétionnement fluvial) et «navette grise» (concrétionnement pédologique).

Le milieu de culture stérile a été réparti dans des tubes à essais stériles selon deux lots de 16 tubes. Pour chaque échantillon nous avons ensemencé deux lots de tubes, un lot contenant Ca^* , l'autre lot dépourvu de Ca^* , servant de témoin. Les voiles développés dans chaque tube ont été prélevés à différents moments : à chaque temps «t», 4 voiles appartenant respectivement aux lots de tubes 1, 2, 3, 4 ont été prélevés. Dans les tubes contenant du ^{45}Ca , nous avons effectué le comptage de la radioactivité après avoir stoppé le

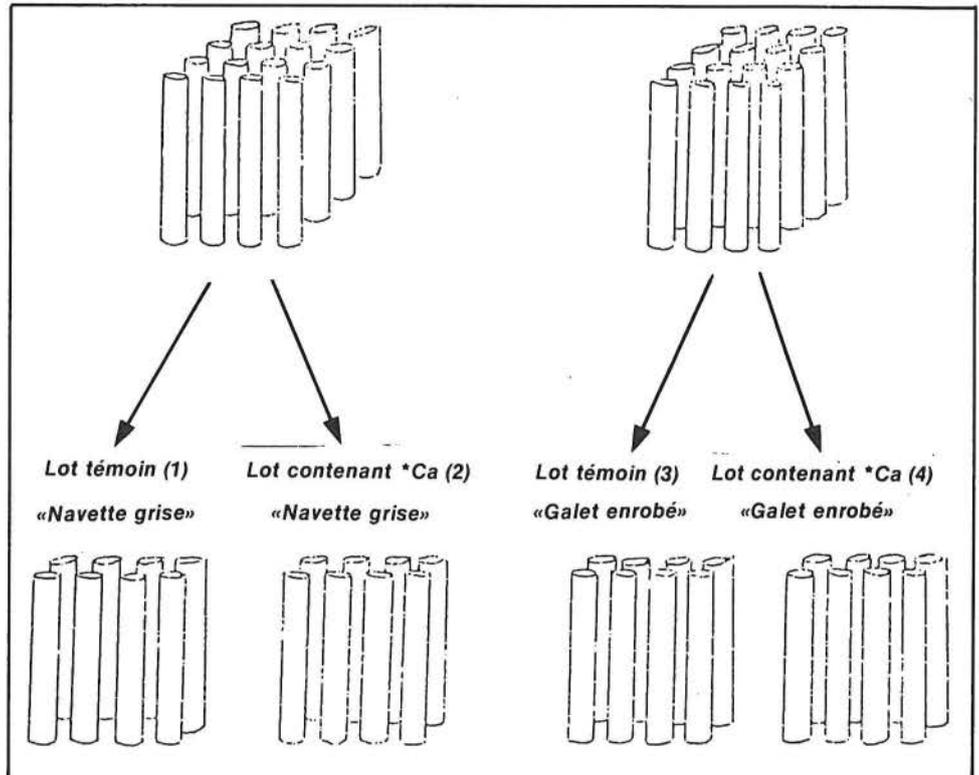


Fig. 1. Lots de 16 tubes contenant le milieu de culture et ensemencés à partir des cultures microorganismes extraites d'un concrétionnement pédologique et d'un concrétionnement fluvial actuels prélevés dans la nature.

développement des voiles séchés et pesés (fig. 1).

Le comptage sur l'échantillon référence a été effectué au même moment que pour tous les autres, ce qui entraîne que la quantité de calcium intégré au voile peut être directement calculée par proportionnalité par rapport au comptage de référence. Nous avons donc une correspondance directe entre le nombre de coups enregistrés et la quantité de calcium (fig. 1).

Nous constatons de grandes analogies dans le développement des divers voiles bactériens. L'aspect des courbes traduisant le développement des voiles microorganismes provenant de l'échantillon «galet enrobé» et «navette grise» est relativement similaire (aussi bien pour les voiles en présence de Ca^* que pour ceux cultivés en milieu dépourvu de calcium radioactif, servant de témoins).

Les valeurs obtenues pour la quantité de calcium intégré aux différents voiles au cours du temps montrent qu'il s'agit de quantité relativement faible (plus importante toutefois dans le cas des échantillons «galet enrobé»).

Ce graphique précise aussi que :

1. L'adsorption calcique est liée au développement du voile

L'expérience réalisée avec le ^{45}Ca nous a permis de mesurer la quantité globale de calcium intégré au cours de la formation des voiles, que ce calcium soit à l'état de minéralisations, mêlé aux composants organiques, issus des produits de dégradation de l'activité bactérienne, ou encore entrant dans la constitution des corps bactériens.

En ce qui concerne l'action des composés organiques, on sait d'une part que certains d'entre eux ont la propriété de complexer les cations et d'autre part qu'il existe au niveau de la paroi des bactéries un grand nombre de composés susceptibles de «piéger» les ions calcium. Quant à l'action des bactéries, de nombreux travaux ont été consacrés ces vingt dernières années à l'étude du rôle du calcium ainsi que de son transport au sein de la cellule bactérienne. A notre connaissance, ce sont Silver et Kralovic qui ont les premiers proposé l'existence d'un système de «transport actif» maintenant un taux de calcium

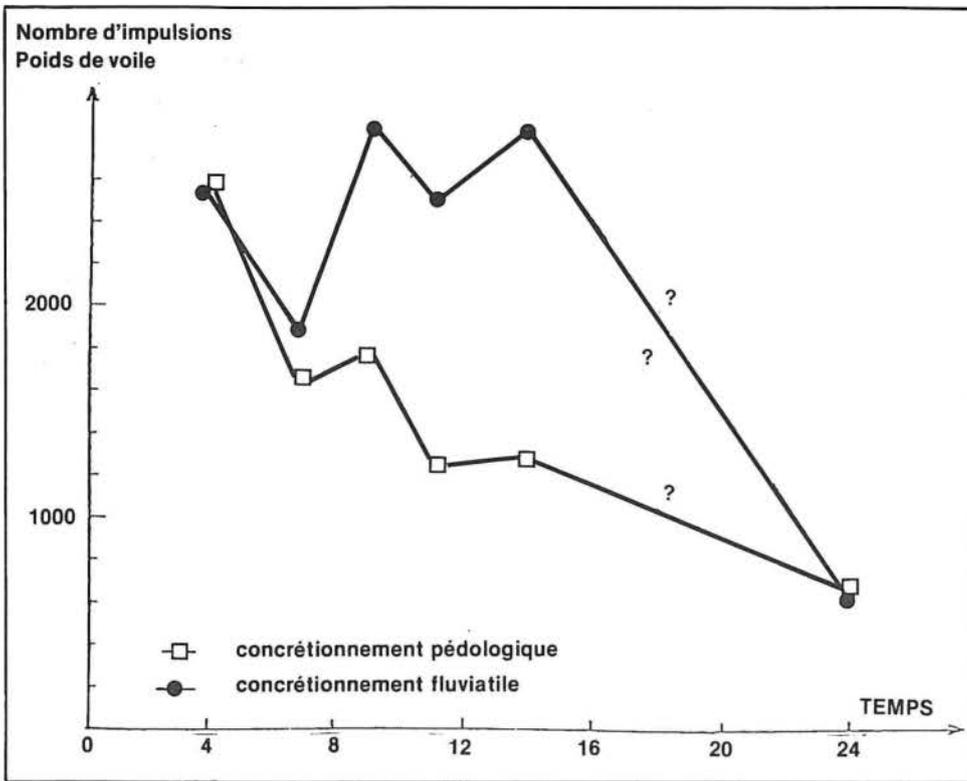


Fig. 2. Quantité de calcium intégré aux voiles bactériens

relativement bas dans une cellule bactérienne. Depuis, trois systèmes de transport actifs différents ont été mis en évidence selon le type de bactérie envisagée. Si la plupart des bactéries maintiennent dans le milieu intracellulaire une concentration en calcium nettement inférieure au milieu extérieur, durant la phase exponentielle, on constate un renversement de cette tendance lors de la sporulation : la cellule accumulant alors le calcium sous forme de picolinate de calcium essentiel à la thermorésistance de la spore. Ces exemples de variation de la teneur en calcium chez les microorganismes en fonction de leur développement suggèrent que l'aspect en dent de scie des courbes d'adsorption du calcium que nous avons obtenues est bien lié aux stades successifs du développement des voiles microorganismes.

La décroissance générale dans tous les cas de l'adsorption calcique correspond à l'épuisement du milieu de culture.

2. Mise en évidence d'une intégration précoce du calcium par le voile bactérien

L'emploi du ^{45}Ca permet de saisir «l'imprégnation» précoce du voile en composés calciques, probablement organocalciques. Une meilleure connaissance des substances organiques composant le voile et leur importance relative permettra d'apprécier leur action sur le calcium.

3. «L'expression cristalline» des microorganismes est progressive

Nous avons vérifié pétrographiquement la minéralisation des voiles bactériens tout au long de l'expérimentation. L'observation au microscope photonique ainsi qu'au microscope électronique à balayage a permis de se rendre compte de l'importance des minéralisations carbonatées par rapport à l'ensemble des voiles et l'étude des divers faciès calcitiques (fig. 3a, 3b, 3c, fig. 4 et fig. 5).

Au départ le calcium fait partie intégrante de l'organique sous une forme non décelable en minéralogie photonique. Seule la microscopie électronique couplée au microanalyseur O.R.T.E.C. permet de déceler la minéralisation sélective (ici, calcique) précoce des individus. Cela concorde avec ce que l'on sait déjà de la cristallogénèse bactérienne (J.-P. Adolphe, C. Bayard) en particulier, que «les dépôts cristallins successifs autour du corps bactérien relèvent de la croissance bactérienne même». Le cristal se modèle à partir du corps bactérien en différentes étapes pour aboutir à la forme définitive (fig. 6).

En conclusion, ce protocole expérimental a permis de suivre l'intervention de microorganismes dans la redistribution d'éléments minéraux marqués et d'apprécier la quantité de calcium intégré à des voiles bactériens en fonction du temps.

Cette première expérience demande à être affinée et sa poursuite permettra de saisir l'étendue de la biocristallogénèse dans la

nature. En recréant les conditions du milieu naturel nous pouvons aussi espérer une meilleure adéquation des productions carbonatées expérimentales avec les formations naturelles.

J.-P. ADOLPHE
G. AMICHOT
M. DELMAS
J. PARADAS
G. REVEL
X. SIMONIN
F. SOLEIHAVOUF

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

ADOLPHE (J.-P.) - 1980 - Etude comparée de la cristallogénèse bactérienne expérimentale. Communication hors fascicule. Colloque sur les carbonates, 17 et 18 nov. Université de Bordeaux III (en coll. avec C. BAYARD-MARECHAL).

ADOLPHE (J.-P.) - 1981 - Observations et expérimentations géomicrobiologiques et physicochimiques de concrétionnements carbonatés continentaux actuels et fossiles. Thèse Doctorat d'Etat. Universités Pierre et Marie Curie, Paris 6.

BOQUET, BORONAT, RAMOS, CORMENZANA - 1973 - Production of calcite by soil bacteria is a general phenomenon. *Nature* 246.

DANIELLI, EDDINGTON - 1983 - Bacterial calcification in limestone caves. *Geomicrobiology Journal*, vol. 3, n° 1.

DEKKER (M.) - 1981 - Microbial formation and decomposition of carbonates in *Geomicrobiology*. H.L. EHRLICH, editor.

DEVES (A.) and BRODIE (A.F.) - 1981 - Active transport of Ca^{2+} in bacteria: bioenergetics and function. *Molecular and cellular biochemistry*.

SILVER - 1977 - Calcium transport in microorganisms and minerals. Ed. E.D. WEINBERG, Marcel DEKKER.

KRUMBEIN - 1974 - On the precipitation of aragonite on surface of massive bacteria. *Naturwissenschaften*, 61, 4.

STEWART - 1981 - Scanning Electron Probe X-ray microanalysis of elemental distributions in freeze-dried cryosections of bacillus coagulans spores. *Journal of bacteriology*. August.

Remarque de P. RENAULT : des expérimentations similaires ont été tentées en 1955-56 par M. Caumartin à partir de souches prélevées dans du mondilch. Mais ses résultats n'ont jamais été publiés; ils pourraient peut-être compléter les vôtres.

Question de J. NICOD : que veut dire le terme «fossiles» ?

Réponse : nous pouvons actuellement effectuer un bilan organique d'un échantillon carbonaté. C'est-à-dire non seulement donner la composition organique (= algue, champignon, bactérie), mais dire si les organismes en question sont encore vivants; ainsi que nous nous en sommes aperçu dans les travertins d'Imouzer, des bactéries anciennes pouvaient être source d'une nouvelle vie. Le DNA de ces microorganismes «fossiles» conserve donc des potentialités de vie.

LE CONCRETIONNEMENT SOUTERRAIN DANS LES GROTTES DE NIAUX, LOMBRIVES ET SABART (PYRENEES ARIEGEOISES) AU COURS DU QUATERNAIRE. MISE EN EVIDENCE DES FACTEURS FAVORABLES ET DEFAVORABLES

Michel BAKALOWICZ
Laboratoire souterrain du CNRS
Moulis 09200 SAINT-GIRONS

De nombreux auteurs sont d'accord pour affirmer que le concrétionnement souterrain est éminemment variable dans l'espace et dans le temps. F. Trombe (1952) rappelle que la fameuse règle américaine de la croissance «d'un once-cube (16,4 cm³) par 100 ans» n'a pas de sens; G. W. Moore et G.N. Sullivan (1978) présentent des données montrant la variabilité de la croissance de concrétions dans des grottes de plusieurs pays. Malgré cela, peu d'auteurs ont cherché à mettre en évidence les facteurs qui déterminent les conditions du concrétionnement souterrain; dans tous les cas, la forme des dépôts a beaucoup plus retenu l'attention des chercheurs.

F. Trombe, s'appuyant sur sa connaissance des mécanismes chimiques mis en jeu, précise que les facteurs température et concentration de CO₂ dans l'eau et l'air souterrain conditionnent le dépôt de carbonate de calcium; il insiste sur le fait que les cavités doivent être aérées pour favoriser le départ de CO₂ et la précipitation du carbonate. Pour C. Hendy (1971), il existe une seconde cause de précipitation: l'évaporation.

B. Gèze (1965), puis B. White (1976) sont probablement les auteurs les plus précis à ce sujet. Ils proposent de relier les différentes générations de travertins souterrains (1) aux variations climatiques du Quaternaire. En particulier, un climat tropical serait le plus favorable. White détaille même les facteurs climatiques susceptibles de rendre compte des différences de concrétionnement observées entre les régions tropicales (les Caraïbes) et les régions tempérées (Etats-Unis et Canada).

1. Les sols tropicaux possèdent de plus fortes pCO₂, car l'activité biologique est plus intense.

2. Les saisons d'activité biologique sont plus longues sous les tropiques, donc l'échelle de temps des processus est accrue.

3. Les sols sont plus épais sous les tropiques, ce qui permet un contact plus long de l'eau avec le sol et ses composés, donc une meilleure approche des équilibres.

4. Les températures plus élevées des régions tropicales, tout en limitant la solubilité du CO₂, augmentent le taux de réalisation des équilibres.

5. Les hauteurs de précipitation plus grandes en région tropicale favorisent l'infiltration et le transport en solution.

Par conséquent, pour White, ce sont uniquement des facteurs externes au karst souterrain qui commandent le développement des travertins. Nous pourrions discuter le fait que les sols tropicaux fourniraient les plus fortes pCO₂; nous préférons renvoyer sur ce sujet à T. Atkinson (1977) et M. Bakalowicz (1978).

Il nous paraît plus intéressant de discuter sur un exemple bien connu de la distribution des périodes de dépôt de travertin au cours du Quaternaire. En effet, la datation des carbonates karstiques par les séries de l'uranium (H.P. Schwarcz, 1978; M. Gascoyne et al., 1978, 1983) permet depuis 15 ans de vérifier l'hypothèse de B. Gèze citée précédemment. En effet, à partir de nombreux sites d'Amérique du Nord et de Grande Bretagne, M. Gascoyne (1979) a montré clairement que depuis le Quaternaire moyen les périodes froides sont associées, dans les régions tempérées, à des lacunes générales de dépôt.

En France, hormis les mesures d'âge de gisements archéologiques et le travail de J.-C.

L'étude des sédiments détritiques (formations 3 et 5) a montré que leur mise en place correspondait à l'invasion du réseau par des torrents glaciaires. Ces deux épisodes sont bien corrélés avec deux glaciations mises par ailleurs en évidence (M. Gascoyne et al., 1983): le Würm (entre 90 et 20 ka), et une glaciation plus ancienne (vers 250 ka). Les deux discontinuités (entre 175 et 130 et vers 320 ka) sont aussi corrélées à des périodes glaciaires citées par ces auteurs.

Les isotopes stables, oxygène-18 et carbone-13, des carbonates donnent quelques informations sur le paléoclimat lors des interglaciaires (fig. 1). Les données sont trop peu nombreuses pour permettre d'estimer les

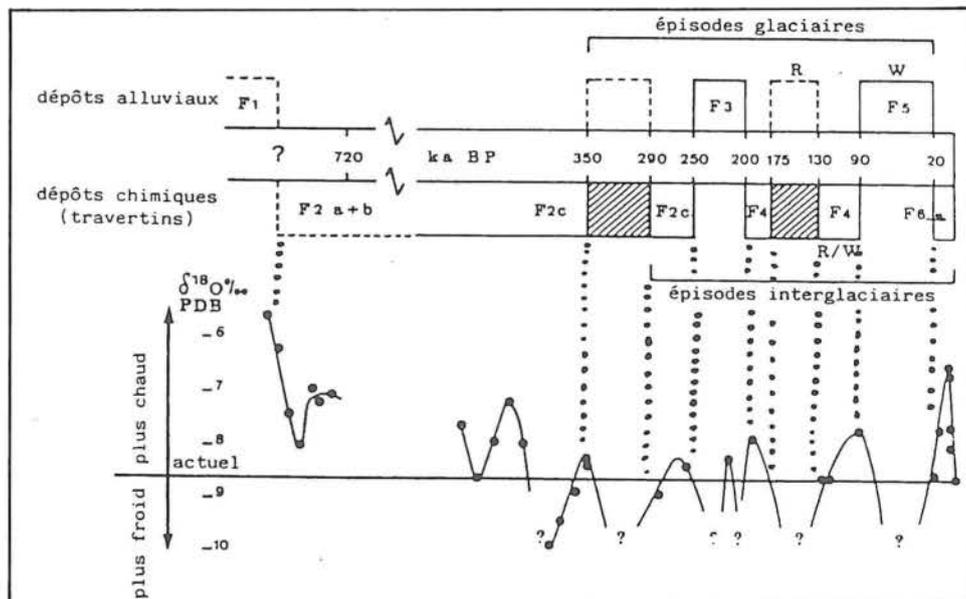


Fig. 1. Géochronologie et paléoclimat d'après les sédiments souterrains du réseau de Niaux-Lombrives-Sabart

Duplessy et al., (1972) sur l'aven d'Orgnac, nous ne disposons que de la stratigraphie du réseau de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyénées ariégeoises) étudiée par P. Sorriaux (1982) et datée dans ses grandes lignes (M. Bakalowicz et al., 1984).

Cette stratigraphie doit être rappelée sommairement. Elle est composée de trois ensembles sédimentaires constitués chacun à sa base d'une formation détritique (conglomérats, graviers et ou sables) allochtone, suivie éventuellement d'une formation de décantation (argiles et limons) couronnée par des dépôts chimiques de travertins. Ce sont ces travertins qui ont été datés (fig. 1, tabl. 1). Les âges sont donnés en ka (1 kilo annum = 1000 ans BP) ou en Ma (1 Méga annum = 10⁶ ans BP).

paléotempératures, mais elles autorisent une approche qualitative.

Ainsi, les niveaux calcitiques du conglomérat ancien (formation 1) et la base de la formation rouge (formation 2) correspondent à un climat nettement plus chaud que l'actuel probablement entre 1,5 Ma et 1,0 Ma. Le complexe de la calcite, déposé entre 700 ka environ et 250 ka, marque un climat d'abord plus chaud, puis nettement plus froid, avec une lacune avant 350 ka. Les interglaciaires (290-250; 200-175; 130-90 et l'holocène) montrent soit des températures du même ordre qu'actuellement, soit nettement plus chaudes, comme vers 8 à 10 ka.

Par conséquent, nous retrouvons bien là les caractères externes au karst favorisant la formation de concrétions: un climat alimentant

1) Nous appellerons «travertin souterrain» toutes les formations carbonatées d'origine chimique rencontrées dans les cavités karstiques dans le même sens que «speleothem» pour les Anglo-Saxons.

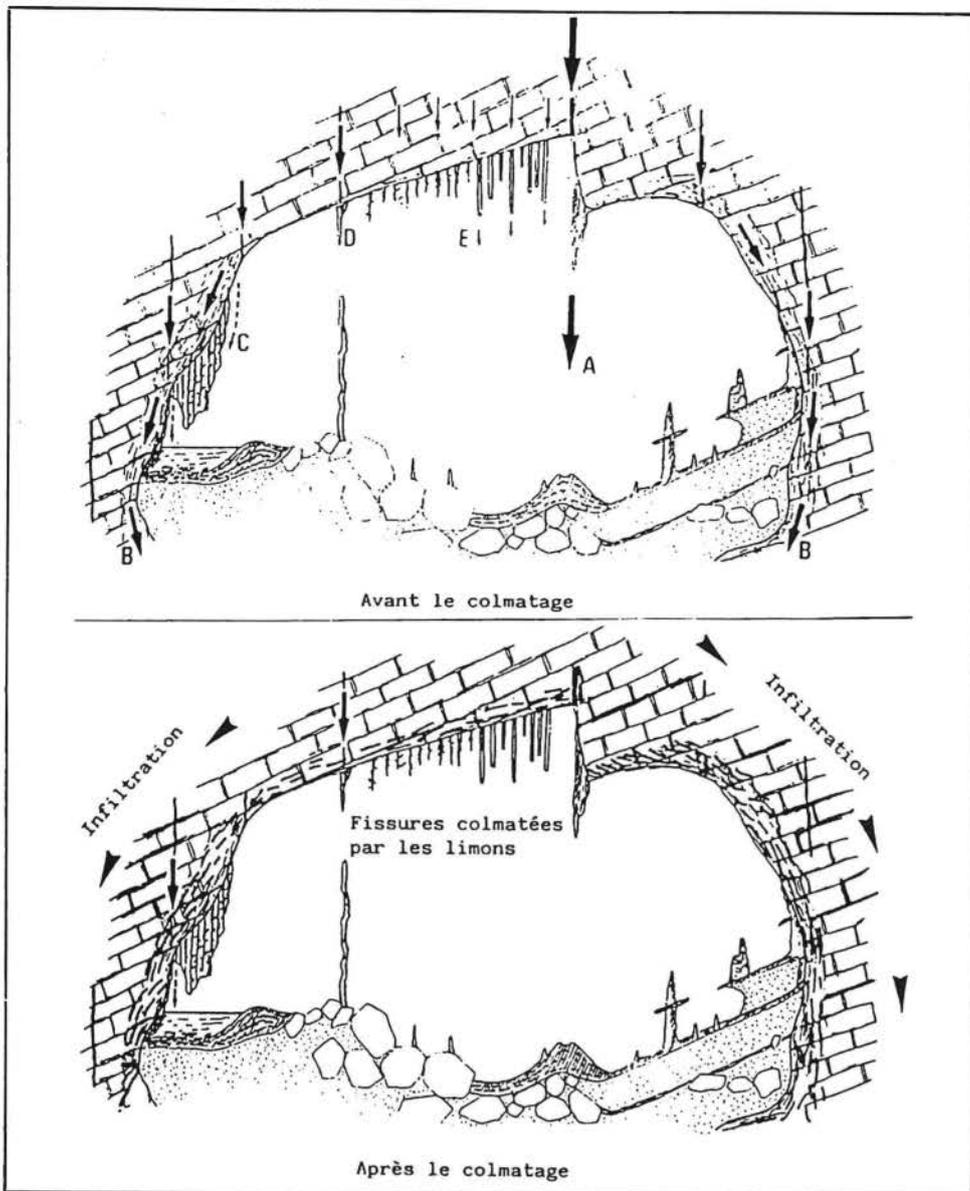


Fig. 2. Schématisation des conditions d'infiltration dans la cavité avant (d'après A. MAN-GIN, 1975, Thèse, 3^e partie, p. 99) et après le colmatage par les limons.

l'infiltration et favorisant le développement d'un couvert végétal fournissant le CO₂ par les sols.

Cependant, l'histoire des dépôts souterrains depuis 90 ka révèle que le climat n'est pas le seul facteur dont dépend la formation de travertins souterrains. En effet, alors que sont bien connus des stades de réchauffement au cours du Würm, auxquels correspondent des phases de concrétionnement bien décrites par M. Gascoyne et al., (1983), en particulier vers 40, 50 et 75 ka, les carbonates de Niaux n'ont jusqu'à présent fourni **aucun dépôt chimique** entre 90 et 20 k. Or, le stade de 40 ka est bien marqué par un concrétionnement abondant dans la grotte de Labouiche, que nous avons daté à plusieurs reprises de 36 à 40 ka (M. Bakalowicz, 1982).

Cette absence de dépôt ne peut être attribuée à une érosion puisque nous avons retrouvé dans la masse pourtant bien érodée de la formation 3 de petits niveaux calcitiques dont l'un a été daté, correspondant à des stades de réchauffement lors de la glaciation vers 200 à 250 ka. Enfin, alors que jusqu'à 90 ka la formation de travertins donne lieu à des dépôts souvent spectaculaires malgré les érosions successives, les carbonates précipités depuis la fin du Würm (20 ka) restent bien modestes, sauf dans la partie proche de l'entrée.

Toutes ces observations conduisent à supposer qu'une modification profonde des conditions d'émergence de l'infiltration dans la grotte est à l'origine de ce phénomène. De nombreux indices confirment ce fait. En effet, après la période de sédimentation détritique fluviale (formation 5), probablement située dans le Würm, un ennoyage complet des cavités jusqu'à une cote d'au moins + 300 m a été mis en évidence par P. Sorriaux. Cet ennoyage doit être mis en relation avec l'avancée maximale du glacier au Würm ancien dont F. Taillefer (1982) a montré l'existence. Il a été suivi d'une vidange progressive et d'un dépôt de limons par décantation. Ces limons qui ont pu être introduits lors de l'ennoyage, colmatent la plupart des fissures visibles dans la grotte, sauf dans la zone de l'entrée. Ils jouent d'ailleurs un rôle important en modifiant la composition chimique des eaux d'infiltration par échange de cations. En outre, toutes les informations chimiques sur les eaux de ces grottes montrent clairement que l'on a affaire à des transits très lents.

La figure 2 schématise les relations hydrauliques entre la grotte et son environnement dans une situation normale, puis à la suite du colmatage de la zone fissurée périphérique après injection de limons dans les parois. Par conséquent, l'étude menée dans le réseau de Niaux-Lombrives-Sabart montre clairement que la mise en place et le développement de concrétionnement souterrain est sous la dépendance de deux ensembles de facteurs :

- les facteurs extérieurs au karst, liés essentiellement à l'environnement bio-climatique (précipitations, température, CO₂);
- les facteurs propres au karst, liés à la circulation des eaux d'infiltration et du CO₂. Ainsi, l'absence d'une fracturation marquée autour des conduits ou le colmatage de ces fractures s'oppose à l'émergence dans la cavité d'eaux incrustantes; mais ceci s'oppose aussi à la diffusion du CO₂, depuis la roche vers la galerie comme cela a déjà été montré (M. Fleyfel et M. Bakalowicz, 1980; M. Bakalowicz, 1981). Mais le recouvrement complet du karst par un sédiment peu perméable peut avoir une conséquence analogue en empêchant les échanges gazeux de CO₂ avec l'extérieur, donc en ne permettant pas la précipitation de calcite. C'est très probablement le cas des cavités de la craie du Bassin de Paris, où en général l'absence de concrétionnement est associée à des pCO₂ élevées,

Ensemble	Formation	Nom	Description	Age (ka)
3	6	Dépôts récents	au dessus de 540 m (alt.) - travertins peu épais - carbonates détritiques - limons au dessous de 540 m (alt.) - sédiments détritiques fins	fréquent depuis 8 ± 2 base : 19 ± 1,6
	5	Formation alluviale de Niaux	3e étape : sédiments fins internes 2e étape : - au-dessus de 645m : sédiments fins - au-dessous de 645 m : sédiments alluviaux 1e étape : sédiments alluviaux partout	non datable
	4	Planchers supérieurs	Travertins épais	sommet : 91 ± 2 lacune vers 130-175 base : 185 ± 10
	3	Conglomérats de la galerie des Comtes de Foix	Sédiments alluviaux avec au moins 3 niveaux calcitiques	216 ± 20
1	2	Formation rouge	2 c : Complexe de la calcite 2 b/a : Complexe argileux à niveaux de calcite flottante	sommet : 260 ± 30 lacune vers 320 ± 20 > 720 (1) base : < 1500
	1	Formation alluviale de Lombrives	- sédiments fins de décantation - sédiments alluviaux	? ?

Tableau 1. Stratigraphie des sédiments souterrains

(1) Il s'agit d'une estimation basée d'une part par deux mesures de magnétisme rémanent (communication personnelle de F. SEMAH), d'autre part par les valeurs 234u/238u = 1.0

comme dans la rivière souterraine de Puits Bouillant, dans l'Yonne (R. Muxart et al., 1966). Par conséquent, il convient de considérer avec prudence l'absence ou la limitation de travertins souterrains dans un ensemble sédimentaire. Cette absence n'a pas nécessairement une signification paléoenvironnementale.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée en partie dans le cadre des recherches menées à Niaux pour le Ministère des Affaires Culturelles. Les datations par les séries de l'uranium ont été effectuées aux Départements de Géologie et de Géographie de l'Université Mac Master, en collaboration avec les Professeurs H.P. Schwarcz et D.C. Ford, dans le cadre d'un séjour post-doctoral soutenu par le CNRS et les bourses scientifiques de l'OTAN. Les isotopes stables ont été mesurés au Laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6^e, dans le cadre d'une collaboration avec le Professeur R. Letolle.

Michel BAKALOWICZ

REFERENCES CITEES

ATKINSON (T.) - 1977 - Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone : an important control of groundwater hardness in limestones. *J. hydrol.*, 35 : 111-123.

BAKALOWICZ (M.) - 1978 - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karsti-

que et de la karstification. *Thèse Doct. Sci. nat.*, Université Paris 6, Géologie Dynamique, Laboratoire sout., CNRS, 269 p.

BAKALOWICZ (M.) - 1981 - Les eaux d'infiltration dans l'aquifère karstique. *8th Internat. Cong. Speleol.*, Bowling Green, USA, 2 : 710-713.

BAKALOWICZ (M.) - 1982 - La géochimie isotopique de sédiments karstiques : apports, problèmes et perspectives. *Ann. Sci. Univ. Besançon*, 3^e Coll. Hydrologie en Pays Calcaire, *Géol. Mém.*, 1 : 227-239.

BAKALOWICZ (M.), SORRIAX (P.) et FORD (D.C.) - 1984 - Quaternary glacial events in the Pyrenees from U-series dating of speleothems in the Niaux-Lombrives-Sabart caves, Ariège, France. *Norsk geogr., Tidsskr.*, 38 : 193-197.

DUPLESSY (J.-C.), LALOU (C.), DELIBRIAS (G.) et NGUYEN (H.V.) - 1972 - Datations et études isotopiques des stalagmites. Applications aux paléotempératures. *Ann. Spéléol.*, 27, 3 : 445-464.

FLEYFEL (M.), et BAKALOWICZ (M.) - 1980 - Etude géochimique et isotopique du carbone minéral dans un aquifère karstique. *Cristallisation, Déformation, Dissolution des Carbonates*, Bordeaux, nov. 1980, p. 231-245.

GASCOYNE (M.) - 1979 - Pleistocene climates determined from stable isotope and geochronology studies of speleothems. *Ph D thesis, Mc Master University*, Hamilton, Canada, 641 p.

GASCOYNE (M.), SCHWARZ (H.P.) et FORD (D.C.) - 1978 - Uranium series dating and stable, isotope studies of speleothems : parts I theory and techniques. *British Cave Res. Assoc.*, 5, 2 : 91-111.

GASCOYNE (M.), SCHWARZ (H.P.) et FORD (D.C.) - 1983 - Uranium-series ages of speleothem from North

West England : correlation with quaternary climate. *Phil. Trans. Royal Soc. Lond.*, B, 301 : 143-164.

GEZE (B.) - 1965 - La spéléologie scientifique. *Ed. Seuil*, Paris, 190 p.

HENDY (C.) - 1971 - The isotopic geochemistry of speleothems. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 35 : 801-824.

MOORE (G.W.) et SULLIVAN (G.N.) - 1978 - Speleology. *The study of caves*. Zephyrus press, USA, 2^e ed., 150 p.

MUXART (R.), STCCHOUZKOY (T.) et FRANCK (J.C.) - 1966 - Le réseau de la rivière souterraine de Puits Bouillant (St-Aubin, Chateaufort, Yonne). *Spelaion Carso*, 4 : 17-46.

SCHWARZ (H.P.) - 1978 - Dating methods of Pleistocene deposits and their problems II. Uranium-series disequilibrium dating. *Geoscience Canada*, 5, 4 : 184-188.

SORRIAX (P.) - 1982 - Contribution à l'étude de la sédimentation en milieu karstique. Le système de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées ariégeoises). *Thèse 3^e cycle*, Univ. P. Sabatier, Toulouse, Geol. régionale, structurale et appliquée, Laboratoire souterrain CNRS, 255 p.

TAILLEFER (F.) - 1982 - Sédiments des karsts et géomorphologie. *Rev. géogr. Pyrénées Sud-Ouest*, 53 : 433-477.

TROMBE (F.) - 1952 - Traité de spéléologie, Payot, Paris, 376 p.

WHITE (W.B.) - 1976 - Cave minerals and speleothems, in : T. FORD et C.H.D. CULLINGFORD, *The science of spelology*, Academic press, Londres, part. 8, p. 267-327.

Observations sur la note de Michel Bakalowicz. Le concrétionnement dans les grottes de Niaux, Lombrives et Sabart...

Intervention de Philippe RENAULT

Dans cette note, l'auteur propose une nouvelle signification du terme travertin suivi de l'adjectif «souterrain», — ce qui revient à créer un néologisme à partir d'un terme existant —, et, par ailleurs, propose un modèle théorique du concrétionnement, dans la grotte de Niaux essentiellement, ce qui attire les remarques suivantes.

L'introduction d'un néologisme ou du changement de sens d'un terme de signification reconnue, doit être justifiée, qu'il s'agisse d'une distinction ou d'une interprétation nouvelle, d'un phénomène nouveau... Dans le cas présent l'auteur voudrait officialiser l'expression «travertin souterrain» comme équivalent de «speleothems», néologisme américain créé en 1952, lui-même équivalent de «cave formations» ou de «concrétions de caverne». Cette adjonction d'un adjectif à un nom, bien défini en France, comme «dépôt formé par ruissellement externe» (Renault, *lexique*, 1959; Fénelon, *lexique*, 1968; Geze, *lexique*, 1973; voir aussi le Colloque «Tufs et travertins» AFK, 1981) a été vivement critiquée par les géologues et géographes participant à la réunion.

L'auteur présente une comparaison des datations isotopiques de concrétions dans les grottes de Niaux et de Labouiche (Ariège) et souligne l'absence, dans la grotte de Niaux, de concrétions correspondant à la phase chaude des 40 000 ans.

Ce constat élargit le problème de la distribution des concrétions dans une cavité karstique. Il est bien connu que, dans un réseau karstique, il y a des zones avec concrétions d'un type ou d'un autre, et des zones dépourvues de concrétions. Les datations ont successivement révélé l'existence de phases paléoclimatiques déterminant le concrétionnement dans les cavités et, en fonction de l'environnement climatologique, la possibilité de la présence ou de l'absence de concrétions à une époque

donnée; ce qui, dans le cadre d'une étude karstologique, permet de préciser le rôle des facteurs déterminants dans la cristallo-genèse souterraine.

Négligeant le problème méthodologique posé par le petit nombre de prélèvements effectués dans les 10 km de galeries connues du complexe réseau de Niaux-Lombrives-Sabart, nous ne considérerons ici que l'atmosphère des galeries visitées et l'apport d'eaux carbonatées en fonction de la perméabilité locale.

1. Comme l'auteur le rappelle, la précipitation du CO₂Ca en galerie résulte d'une évaporation, ou d'une différence de pCO₂ entre l'atmosphère souterraine et l'eau carbonatée, ce qui implique, dans une interprétation paléoclimatique, la connaissance du régime de ventilation ou des variations de la pCO₂ en un site et à un instant donné. L'étude spéléométéorologique de J. Brunet, P. Vidal et Ph. Renault, de 1970 à 1981 (Renault, 1981), permet de présenter un modèle tenant compte des caractères morphologiques du réseau, considéré dans son ensemble, et notamment des étroitures, jouant le rôle de diaphragmes dont la section est variable dans le temps, à l'échelle de l'année (variations de plans d'eau d'une voûte mouillante, portes ou trappes ouvertes ou fermées selon les circonstances) ou des siècles (concrétionnement dans une étroiture). Dans une étude cristallogénétique ce facteur spéléométéorologique est à mettre en rapport avec les variations de la végétation externe. Rappelons que Niaux, grotte de moyenne montagne se développe entre 750 et 800 m d'altitude, alors que Labouiche, grotte des collines prépyrénéennes, se situe à moins de 400 m d'altitude. La possibilité d'une interaction morpho-sédimento paléobotanique paraît à étudier en priorité dans une comparaison de ce genre.

2. Les apports carbonatés dépendent de l'environnement climatique régional et de la végétation associée, ainsi que de la perméa-

bilité de la masse rocheuse sus-jacente à la galerie. Cette perméabilité est fonction du système dimensionnellement hétérogène de fentes et de conduits, traversant le massif, ainsi que du colmatage superficiel (moraines au-dessus du réseau Niaux-Lombrives-Sabart). L'auteur envisage par ailleurs la possibilité d'un colmatage des fentes proches de la paroi des galeries, lors des crues accompagnant le recul du glacier de l'Ariège. Dans l'analyse paléoclimatique des phases de cristallo-genèse, cette hypothèse est nouvelle, mais conduit à formuler quelques remarques. Pour l'auteur : 1) il y aurait eu une seule crue, avec suspension argileuse, au cours du Quaternaire. 2) la décalcification argileuse, dans les fentes proches de la paroi, doit être admise a priori. 3) ce colmatage s'opposerait à la diffusion du CO₂ des fentes vers la galerie.

Le premier point sera discuté par ailleurs. Le deuxième pose quelques problèmes concernant le transfert argileux de la galerie en charge vers le réseau de fentes. Depuis M. Boule (1892) l'on admet l'importance du soutirage des sédiments fins, de la surface vers le fond, à travers ce réseau. Nous avons eu la possibilité d'observer ce mécanisme dans le karst ardéchois et, simultanément, de constater l'effet décolmatant des fortes crues. Ces observations correspondent à un karst particulier et ne sont pas généralisables; il n'en reste pas moins que le phénomène est à étudier. Le troisième point, transfert du CO₂ vers une galerie rendu impossible par le colmatage des fentes, n'est pas envisageable dans le cas de la grotte de Niaux. En effet, il s'agit de la cavité pyrénéenne, à 750-800 m d'altitude, présentant les plus hautes pCO₂ en raison de l'orientation du versant sus-jacent, de sa couverture végétale sur couverture morainique et d'une disposition morpho-sédimentaire souterraine déterminant un régime spéléométéorologique, à peu près permanent, mais stable depuis plus de 10 000 ans.

Cette caractéristique paraît difficilement compatible avec une obturation générale des conduits annexes.

Par ailleurs, en l'absence de possibilités de comparaison, entre la galerie principale de Niaux, moyennement et anciennement concrétionnée, et la galerie Clastres, de caractères spéléomorphologiques différents, qui, d'un point de vue sédimentologique, aurait évolué au Quaternaire, d'après le schéma général fixé par P. Sorriaux (thèse 3^e cycle, 1982), et qui présente un concrétionnement, localement important, d'apparence récente.

Pour conclure, nous dirons que l'auteur apporte une donnée chronogéologique importante et dont il faudra tenir compte dans les études de cristallogenèse en galerie de grotte. L'explication proposée est incontrôlable en l'absence de données plus précises (localisation des prélèvements en coupe et sur plan du réseau, long de 10 km, nature des concrétions étudiées...). L'interprétation spéléométrologique de cette lacune cristallogénétique apparaît comme la plus vraisemblable, sous réserve d'une étude comparative des variations paramétriques dans les différentes zones du réseau de Niaux-Lombrives. Ce qui n'enlève rien à l'intérêt de cette note brève.

Philippe RENAULT

Pour informations complémentaires et figures, voir : Ph. RENAULT, *Karstologia*, 1983, n° 2, p. 17-22.

Intervention de R. LAURENT

En l'absence de l'auteur, la communication de M. Bakalowicz a été présentée par C. Ek et de ce fait, elle n'a pas pu faire l'objet de commentaire direct. Cependant, compte tenu de la terminologie employée dans cet article, il me paraît important d'ouvrir une réflexion et une discussion sans pour autant désirer entrer dans une «querelle de terminologie».

Michel désigne «Travertins souterrains» toutes formations carbonatées d'origine chimique rencontrées dans les cavités karstiques, si j'ai bien compris l'exposé, et il se réfère à B. Gèze (1965) pour rester francophone.

Bernard Gèze dans son ouvrage *La Spé-*

lologie Scientifique auquel il est fait allusion, présente effectivement une synthèse sur la minéralogie des remplissages en caverne, mais cet auteur semble employer le terme de **concrétionnement** pour désigner les différentes formes d'origine chimique rencontrées dans le karst et notamment **plancher stalagmitique** et **non travertins** comme le propose Michel, suivant en cela, je pense, l'école anglo-saxonne.

Cette analogie qui n'est peut-être pas foncièrement fautive en tant que formation appelle quelques réflexions et ce sont celles-ci qui motivent mon intervention alors que je ne suis pas spécialiste de la question.

Les chercheurs travaillant sur les sujets liés au karst ont besoin des explorateurs et vice-versa; nous en avons comme preuve la revue co-éditée par la FFS et l'AFK «*Karstologia*». Par ailleurs, le BBS prend de plus en plus d'importance pour informer des articles écrits et il est lu tant par les «spéléistes» que par les chercheurs. Aussi si nous voulons ne pas apporter de confusion dans les écrits émanant des spéléos, écrits qui bien souvent sont utiles aux scientifiques, il faut rester clair et employer une terminologie simple, souvent issue des us et coutumes même si parfois elle n'est pas assez «pointue» pour désigner un phénomène ou si elle semble importante pour certains.

— Pour un spéléologue, qu'est-ce qu'un «travertin»? D'abord c'est la présence ou l'absence qui l'intéresse et non sa composition. Aussi je pense qu'il n'est pas inutile de rappeler quelques définitions issues de la littérature omni-présente dans les bibliothèques spéléologiques.

— Son étymologie : **Travertin** vient de Tibur, formations externes décrites depuis des exemples pris dans le Tivoli (Italie) qui a donné **Travertino**: P. Fénelon (1968) décrit ce phénomène suivi en cela par B. Gèze (1973) qui spécifie bien que cette formation se forme par ruissellement à l'extérieur.

R. Moret (1962), A. Foucault et J.-F. Raoult (1980) reprennent les mêmes définitions à savoir que ces formations d'origine essentiellement chimique peuvent être parfois associées à des additifs d'origine organique : ce qui devient des tufs, elles se forment à l'extérieur depuis une émergence ou une source et les dépôts s'estompent à mesure que l'eau devient moins incrustante. Seul H. Baulig (1956) reste imprécis et sa

définition peut prêter à confusion «**Les eaux karstiques sont souvent incrustantes. Les grosses sources édifient des terrasses de travertin. De même, les rivières souterraines construisent, sur le bord..., des creux (gours) de leur lit, des barres de travertin qu'elles exhausent peu à peu.**»

Pour se résumer, il me semble que nous pouvons définir globalement ce phénomène de la façon suivante : **Les travertins désignent une forme extérieure, synonyme de planchers stalagmitiques ou de gours,...** qui sont usités dans le cadre de remplissage d'origine chimique mais à l'intérieur d'une cavité. Aussi, pour éviter toutes confusions et bien cerner le sujet dans les écrits, il est souhaitable, à mon avis, d'utiliser :

— à l'extérieur du massif, le terme **travertins** qui peut être associé à des tufs selon l'évolution. Les différents colloques ou réunions, organisés par l'AFK démontrent bien cette réalité;

— à l'intérieur du massif, utiliser la «panoplie» des termes décrits par B. Gèze (1973).

Je pense qu'une équipe ou les chercheurs spécialistes de ces formations devraient préciser clairement ces définitions dans *Spelunca* ou dans *Karstologia* pour éviter toute confusion et tout «lapsus» car moi-même, je le répète, n'étant pas spécialiste, quelques subtilités dans ces terminologies peuvent m'échapper.

Roger LAURENT

Bibliographie

BAULIG (H.) - 1956 - *Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie*. Fac. Lettres Univ. Strasbourg, Soc. Ed. Les Belles Lettres, Paris, p. 62-63.

FENELON (P.) - 1968 - *Vocabulaire français des phénomènes karstiques*. Mémoires et Documents, 1967, nouvelle série, Vol. 4, *Phénomènes karstiques*, éd. CNRS, t. 1, p. 14-68 (réédition).

FOUCAULT (A.) et RAOULT (J.-F.) - 1980 - *Dictionnaire de géologie*, éd. Masson, Paris, coll. Guides Géol. Régionaux, p. 316.

GEZE (B.) - 1965 - *La spéléologie scientifique*, éd. du Seuil, coll. Rayon de la Science, Paris, 190 p.

GEZE (B.) - 1973 - *Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie*. Ann. Spéol., éd. CNRS, t. 28, fasc. 1, p. 1-20.

MORET (R.) - 1962 - *Précis de géologie*, éd. Masson, 4^e éd., Paris, 677 p.

Réponse de Michel Bakalowicz (droit de réponse accordé par le comité de lecture en l'absence de l'auteur).

Je ne veux pas entrer dans le jeu, somme toute stérile de la discussion pour savoir si «travertin souterrain» est ou non approprié. Il est clair que chacun a bien compris de quoi il s'agit. Le choix de cette expression était délibéré : les mécanismes de formations des concrétionnements souterrains et des travertins s.s. sont rigoureusement identiques, quoique puissent écrire certains auteurs (cf. notamment J.P. Adolphe, 1986).

En revanche, plus enrichissante est la seconde partie de l'intervention de P. Renault. En effet, celle-ci pose plusieurs problèmes.

1. Tout d'abord, «le petit nombre de prélèvements» ne signifie pas que ces prélèvements ont été réalisés au hasard, donc au risque de ne pas concerner des événements brefs et localisés. En effet, un principe de base de la stratigraphie consiste d'abord à corréliser les groupes géologiques, afin de définir les ensembles sédimentaires et leurs relations spatio-temporelles. C'est évidemment ce travail qui a été réalisé en détail par P. Sorriaux et sur lequel s'est appuyé notre échantillonnage pour les mesures radiométriques. Les interstades entre 250 et 200 ka n'ont pas

échappé à cette recherche systématique. Pourquoi eut-ce été le cas des interstades du Würm, dont celui de 40 ka est universel ?

2. Il est évident que les échanges d'air entre la grotte et l'extérieur contribuent à favoriser le départ du CO₂, donc le concrétionnement. Toutefois dans le cas de Niaux, nous savons que le modèle proposé par P. Renault qui repose sur un nombre limité d'observations, ne rend pas compte de la réalité. Celui, notablement différent, sur lequel nous nous appuyons a été élaboré à partir d'observations hebdomadaires et de mesures en continu portant sur les températures (air, eau, roche), l'humidité, le CO₂, les débits d'infiltration et leur chimisme, depuis 1978 et même, pour certains sites, depuis 1972 (cf. C. Andrieux, 1983; M. Bakalowicz, 1981 et C. Jusserand, 1987; A. Mangin et C. Andrieux, 1987). Actuellement, les échanges de CO₂ avec l'extérieur sont importants; ils sont soumis à des variations saisonnières de grande amplitude. Ce ne sont pas eux qui sont le facteur limitant du concrétionnement, mais les écoulements eux-mêmes qui sont rares et faibles, du fait de l'imperméabilisation des parois des

conduits par le colmatage.

3. Quant à ce colmatage, il est bien connu; il a été clairement mis en relation avec une obturation complète du massif, jusqu'à plus de 500 m d'altitude, par le glacier qui, au début du Würm, selon F. Taillefer et en concordance avec nos datations absolues, a produit un ennoyage total du massif. Il est clair que ce colmatage par des limons argilo-limoneux s'est essentiellement produit à partir des conduits, en obstruant toute l'auréole de fissures de détente accompagnant les galeries.

Toutes ces informations confirment que la faible représentation des travertins souterrains depuis le début du Würm ne peut qu'être due au colmatage des fissures, qui est responsable des faibles débits d'infiltration dans la grotte.

Lire : Adolphe J.P. Méditerranée, 1986, 1-2, p. 11-17. Andrieux C., *Karstologia*, 1983, 1, p. 19-24. Bakalowicz M., 8^e Congrès Internat. Spéol. Bowling Green, 1981, p. 710-713. Bakalowicz M. et Jusserand C., *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 1987, p. 266-283. Mangin A. et Andrieux C., *Journées Trombe*, 1987, sous presse.

TYPOLOGIE DES GOURS DU KARST TROPICAL DE SAGADA (PHILIPPINES)

Claude MOURET
La Tamanie 87380 MAGNAC-BOURG

Au cours de quatre campagnes d'explorations spéléologiques, échelonnées de 1979 à 1984 (Deharveng, 1980; Mouret, Bousquet et al., 1983, 1985), une étude systématique des cavités karstiques des calcaires oligocènes de Sagada a été entreprise avec environ 15 km de topographies levées à ce jour. Les gours, dont certains sont d'un type peu commun, seront ici classés en tenant compte à la fois de leur morphologie et de leurs conditions de gisement.

TYPES DE GOURS RENCONTRÉS

Type a : Gours-barrière subverticaux, à mur régulier mince, sur pente modérée

Ils sont caractérisés par leur muraille subverticale, d'épaisseur à peu près constante et leur rôle de barrière dans les galeries, joignant les deux parois de celles-ci ou plus rarement une paroi et un autre gour. Ils existent isolés ou en série.

Une série typique existe sur le sol penté de 15 à 16 degrés d'une galerie de Natividad cave (fig. 3, D), dont les écoulements actuels, s'ils existent, sont exceptionnels. La hauteur de ces gours varie surtout de 0,80 à 1,10 m et leur épaisseur est de l'ordre de 20 à 30 cm. Ils sont souvent légèrement convexes, dans les deux plans vertical et horizontal; ce peut être soit vers l'aval, soit vers l'amont. Leur sommet peut être subplat ou au contraire relativement

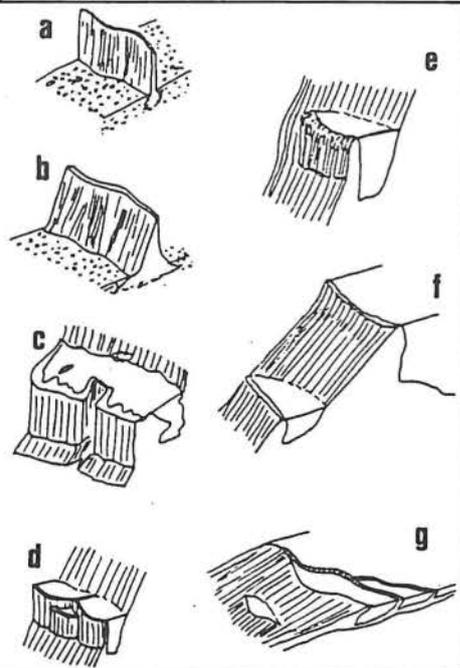


Fig. 2. Schéma d'un gour de type c, caractéristique de Sagada.

pointu, la pointe étant alors située du côté aval. Ces gours peuvent être légèrement renflés à leur base, côté amont. Ils sont associés à des galets, qui témoignent de débits assez élevés, mais dont l'origine géographique n'a pas encore été découverte.

Un gour isolé, dont la partie supérieure est de ce type est celui de «Pig Pen» (fig. 3, A). La hauteur correspondante est de 0,80 m environ et la longueur de 7 m. Cette partie surmonte un gour de type f. Le gour de Pig Pen, en réalité tourné vers le vrai amont de la galerie qu'il barre, possède un gour symétrique un peu plus loin, tourné lui, vers l'aval vrai : ceci est dû à une alimentation en eau à partir d'une galerie sus-jacente médiane, qui possède elle-même des gours de type f.

Type b : Gours-barrière très pentés à mur irrégulier, sur pente modérée

Avec une section triangulaire pointée vers le haut, ils sont peu différents des précédents, dont ils constituent possiblement un stade plus évolué, par épaississement des parois. L'exemple le plus net est le gour dit «the Altar» qui barre la galerie de Latipan cave (fig. 3, B) haut de 3,50 m et long de 11 environ. Ce gour a des parois en pente forte (fig. 1, b). Il

est maintenant fossile, l'eau pérenne passant sous lui sur quasiment toute sa longueur. La pente locale de la galerie est de quelques degrés seulement. Les sédiments actuels contigus comportent de nombreux galets.

Type c : Gours-barrière festonnés, associés à des coulées calcitiques

Il s'agit du type le plus exceptionnel et le plus remarquable. Deux exemples se trouvent à l'aval du lieu dit «the Palace», dans Latipan cave (fig. 3, A), où la pente moyenne est de 20 degrés. Ils se dressent en haut de coulées, qui leur sont peut-être en partie antérieures et sûrement en partie postérieures.

La forme du gour principal est résumée par la figure 2, où l'on voit l'allure festonnée, la paroi aval subverticale et la paroi amont très irrégulière. La paroi aval supporte de nombreuses «colonnes», qui peuvent se réunir, devenir bifides, ou rester isolées. Celles-ci

REMERCIEMENTS

Il m'est particulièrement agréable de remercier ici mes compagnons d'exploration à Sagada, sans qui rien n'aurait été possible: Y. CARFANTAN, S. DUFLOT, J.J. MATIEU, J.M. PUIG et surtout Y. BOUSQUET.

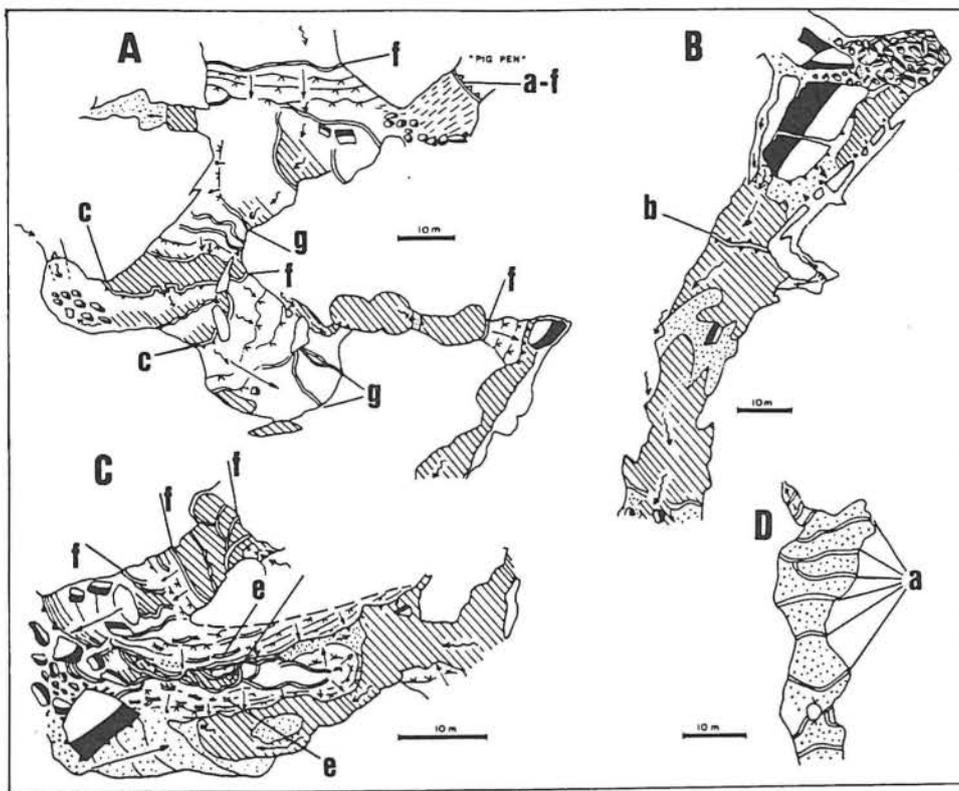
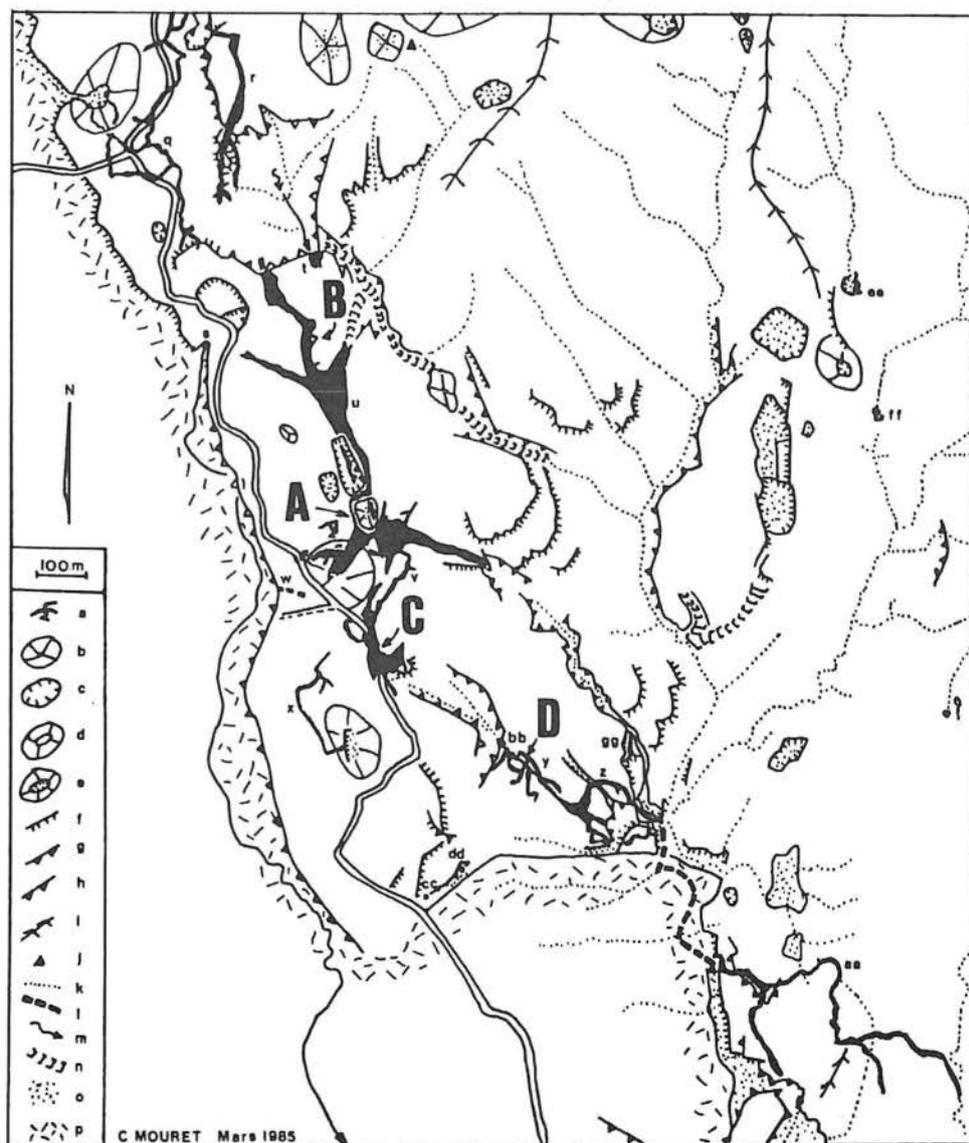


Fig. 3. Plans schématiques de zones à gours. Ces derniers sont représentés par deux traits parallèles. **A :** Latipan cave, the Palace, pente moyenne 20°. **B :** Même grotte, the Altar. **C :** Lokohong cave, série de gours allant d'une galerie supérieure à faible écoulement à une galerie inférieure à écoulement pérenne (dénivelée totale : 20 m environ). **D :** Gours de type a dans une galerie moyenne de Natividad cave. Courbes de niveau avec chevrons : coulées, hachures : eau ; triangles pleins : abrupts ; triangles vides : abrupts avec surplomb ; flèches sinueuses : écoulements ; flèches rectilignes : lignes de pente ; autres figures : sable, argile, blocs.

passent sans transition à des coulées de calcite, à partir de la rupture de pente qui les limite vers le bas.

La structure du gour principal a pu être partiellement observée. Les stries d'accroissement montrent que le dépôt de calcite se fait le long de la paroi aval, et plus dans les avancées que dans les rentrants de la muraille (fig. 2). Rien n'a pu être observé à l'intérieur de la vasque. Le fait que les stries d'accroissement soient parfaitement visibles sur le dessus du gour et qu'il y ait des îlots résiduels, montre qu'il y a dissolution actuelle de ce dessus, presque homogène sur toute sa longueur, puisqu'il n'y a pas vraiment d'échancrure. Des

Fig. 4. Localisation des parties de la figure 3 dans le karst de Sagada (centre ouest seulement) a : grotte ; b : doline à fond courbe ; c : doline à fond plat et bords abrupts ; d : doline à fond plat ; e : doline à bords abrupts dans une autre doline ; f : falaise mineure ; g : falaise majeure sans surplomb ; h : idem, avec surplomb ; i : ligne de crête ; j : sommet ; k : écoulement temporaire ; l : écoulement temporaire majeur ; m : écoulement pérenne ; n : vallée à fond plat ; o : dépôts terrigènes et alluviaux ; p : terrains non karstiques.
RESEAUX ET GROTTES : q : Lomyang-Agoyolge ; r : Sogong-Dokiwi ; s : source d'Ambasing ; t : perte de Lomyang ; u : Latipan, Sumaging, Lomyang ; v : Lokohong ; w : Bukong ; x : Kiosk ; y : Natividad (s.s.) ; z : Major Lake ; aa : Tataya En ; bb : Kamanuang ; cc : Barknad 2 ; dd : Barknad 1 ; ee : Mababat 1 ; ff : Mahabat 2 ; gg : Coffins suspendus.



dissolutions de gours ou de dessus de coulées ou des échancrures (fig. 3, B) sont relativement fréquentes dans Latipan cave ainsi que dans Lokohong cave.

Le long du bord amont de la retenue d'eau, la plupart des dépôts calcitiques sont en surplomb, les précipitations s'arrêtant à la surface de l'eau.

Type d : Gours imbriqués, sur pente moyenne, 30 degrés environ

Ces gours sont toujours placés sur des coulées, même peu épaisses. Leurs parois sont subverticales et morphologiquement comparables à celles du type a ; elles semblent être toujours convexes vers l'aval (fig. 1, d). Les proportions restent plutôt constantes. On en connaît de peu profonds sur une coulée calcitique latérale de la rivière de Natividad cave, dans sa partie amont : en moyenne 10 cm de profondeur, 20 à 30 de largeur et 50 de longueur.

Un autre cas, proche du sol, surmonte des coulées calcitiques très minces, qui recouvrent des blocs issus du plafond ; il se trouve en amont de la première voûte surbaissée du réseau de Tataya En. Leur hauteur décroît de plus d'un mètre à une vingtaine de cm et ils se succèdent sur 10 m de long environ.

Type e : Gours isolés sur pentes fortes, 50 degrés environ

L'un d'eux se trouve sur la coulée très pentée qui donne accès à la rivière de Natividad cave : il se présente comme un godet encastré dans celle-ci, qui subit de ce fait une augmentation de pente à son niveau, mais il n'occupe



Grands gours festonnés Latipan Cave (Type C) - (Photo Y. Bousquet)

pas toute sa largeur. La paroi du gour, massive et trapue, dépasse modérément de la coulée. Son fond, par contre, est nettement en dessous (fig. 1, e). Ce type de gour peut atteindre 1 m de large et 2 de long, voire plus.

A la «Perte de la Boue», un gour du même type occupe quasiment toute la largeur de la galerie et se prolonge par une coulée pentée de plus en plus fortement vers l'aval. Il n'y a pas de muraille à proprement parler, l'eau est normalement retenue par toute la masse calcitique. Le gour cité est toutefois fossile, en ce sens qu'il ne retient de l'eau que lors des crues absorbées par la perte. Au Lokohong, des gours isolés (fig. 3, C) à paroi mince occupent les pentes fortes d'une coulée.

Type f : Gours étagés sur coulées

Ce type est le plus commun : les murailles, plus ou moins redressées, atteignent couramment le mètre de haut et sont pentées vers l'amont. Le fond du gour est souvent beaucoup plus bas que la surface de la coulée, ce qui est lié au dépôt de calcite du côté aval du gour. Ces gours sont disposés en série.

Type g : Gours plats sinueux, sur coulée ou sur plancher de galerie

Ces gours à muraille peu élevée, 1 ou 2 dm, souvent mince (1 dm environ), à bord amont redressé et à paroi aval faiblement pentée (de quelques degrés à 20 environ), sont rarement isolés et souvent imbriqués (fig. 1, g). Ils sont présents dans la galerie principale de Latipan cave, en aval du «Dancing Hall».

Type h : Gours dérivant de travertins

Un exemple se trouve à l'entrée de Major Lake cave, sur le réseau sensu alto de Natividad cave. Les travertins proviennent de la falaise qui surplombe l'entrée et descendent le long de la contre-pente redressée qui barre la plus grande partie de la galerie. Les travertins, d'abord mélangés à la végétation, ont un faciès de coulée, qui évolue vers le bas en des gours de calcite encore mélangés aux matières organiques, puis de plus en plus pure, jusqu'à l'être parfaitement.

Type i : Microgours

Ils sont abondants sur les coulées de calcite du karst de Sagada, ce qui est somme toute banal. Nous les rappelons pour mémoire.

QUELQUES EXEMPLES DE SUCCESSIONS DE GOURS DANS LES CAVITES DE SAGADA

La figure 3 montre quatre exemples localisés sur la figure 4. A et B se trouvent dans Latipan cave; B est en amont, sur un écoulement pérenne qui disparaît progressivement et en grande partie avant d'arriver en A, situé 250 m plus en aval. En A arrive aussi un écoulement pérenne (différent ?) qui rejoint les restes de l'écoulement provenant de A, juste avant le dernier gour. L'écoulement qui alimente les gours de A est donc presque uniquement celui qui vient de B.

Entre A et B, plusieurs des gours sont fossiles, soit à cause de sous-écoulements, soit à cause d'une échancre dans leur muraille (fig. 3, B). A mi-chemin, toutefois, se trouvent des gours de type g, sur l'écoulement pérenne, qui occupe seulement quelques mètres sur les 25 de la largeur de la galerie. Le grand gour de type f, en amont sur la figure 3 A, est lui aussi fossilisé par des sous-écoulements qui réapparaissent à sa base. A l'aval de ce point, il y a alternance de gours et de coulées, la précipitation de calcite se faisant sur le tombant des dépôts, alors que leur sommet est souvent sujet à une dissolution, comme c'est le cas pour les gours de type c, déjà décrits. Après le gour le plus en aval représenté sur la figure 3 A, on n'en trouve plus le long du cours d'eau, ni dans Latipan cave, ni dans la continuation post-siphon de Lokohong cave et à peine dans Natividad cave, juste à la cascade amont, sur un écoulement qui est vraisemblablement celui de Lokohong cave, dont il est séparé par 200 à 300 m inexplorés à ce jour. On n'en retrouve pas non plus, plus en aval encore, dans le réseau de Tataya En, le long de l'écoulement majeur.

Ainsi, les gours restent situés dans les parties autres que celles des écoulements principaux, à de rares exceptions près, qui correspondent à des pentes fortes, à l'arrivée de galeries à écoulements secondaires riches en gours, ou à des gours fossiles.

L. Deharveng (1980) a mesuré en plusieurs points la teneur de l'eau en CaCO_3 de A à B de la figure 3 : 185 à 192 mg/l au point aval de la figure 3 B, 166 à 171 au niveau des gours de type g déjà cités et 120 à 123 au niveau des gours de type c (fig. 3 A). Il y a donc dans l'ensemble précipitation de CaCO_3 , même si l'on observe localement des dissolutions.

La figure 3 C montre les types de gours rencontrés le long d'une série échelonnée depuis les premières ruptures de pente d'une galerie

semi-fossile à faible écoulement jusqu'à un abrupt absolu, puis jusqu'au contact avec une galerie inférieure à écoulement pérenne. Certains gours du bas ne sont pas fonctionnels, malgré la bonne alimentation en eau du secteur, ce qui illustre l'un des processus possibles de leur fossilisation, par déviation des filets d'eau. Ces exemples proviennent de Lokohong cave, et la rivière pérenne est celle qui vient de l'aval des gours du «Palace» dans Latipan cave (fig. 3 A).

L'exemple de la figure 3 D a été en partie commenté à propos des gours de type a. La série dessinée est interrompue deux fois plus en aval, par des pentes fortes. La dernière de ces pentes est celle qui donne accès à la rivière et qui supporte des gours de type e.

Si on résume les faits observés, à l'échelle du karst, on constate que l'eau des drains majeurs ne donne pas lieu actuellement à des gours, sauf contre-exemple à découvrir. La coulée amont de la rivière de Natividad pourrait être liée à une arrivée d'une galerie à gours juste avant le siphon, selon un schéma comparable à ce qui se passe à l'aval des gours de type c du «Palace», c'est du moins l'hypothèse provisoire que nous formulons.

Les galeries à gours sont toutes pourvues d'écoulements indigènes au karst, plus riches en CaCO_3 a priori (Lokohong, Latipan, Natividad, Tataya En). Certains gours proviennent directement des suintements de plafond ou de parois (Tataya En, Natividad, Sogong...).

CONCLUSIONS

Les gours du karst de Sagada appartiennent à plusieurs types morphogénétiques, dont les exemples de la figure 3 montrent des successions possibles. Certains ne sont connus que sur des coulées (type d), d'autres (a, b, g) sont plutôt caractéristiques des galeries à écoulement important (les gours-barrière sont néanmoins tous fossiles), les autres peuvent exister aussi bien sur les pentes des galeries principales que sur des coulées de galeries très secondaires. Une étude plus détaillée des débits, des concentrations en CaCO_3 , des pH, pour chaque cas, apporterait certainement une quantification de ces phénomènes et aussi les bases d'une nouvelle typologie, plus précise. Cette typologie devrait aussi pouvoir être générale et pouvoir s'appliquer partout, l'étude d'un grand nombre d'exemples permettant aussi d'éliminer les cas trop particuliers. Cet article avait seulement pour but une première approche des problèmes posés par la genèse des gours en fonction des paramètres du milieu qui les environne.

Claude MOURET
Djakarta, 10.3.85

BIBLIOGRAPHIE

DEHARVENG (L.) - 1980 - Spéléologie aux Philippines. Expédition L. DEHARVENG-J. OROUSSET, 10 décembre 1979 au 12 février 1980. Toulouse, chez l'auteur, 44 p.

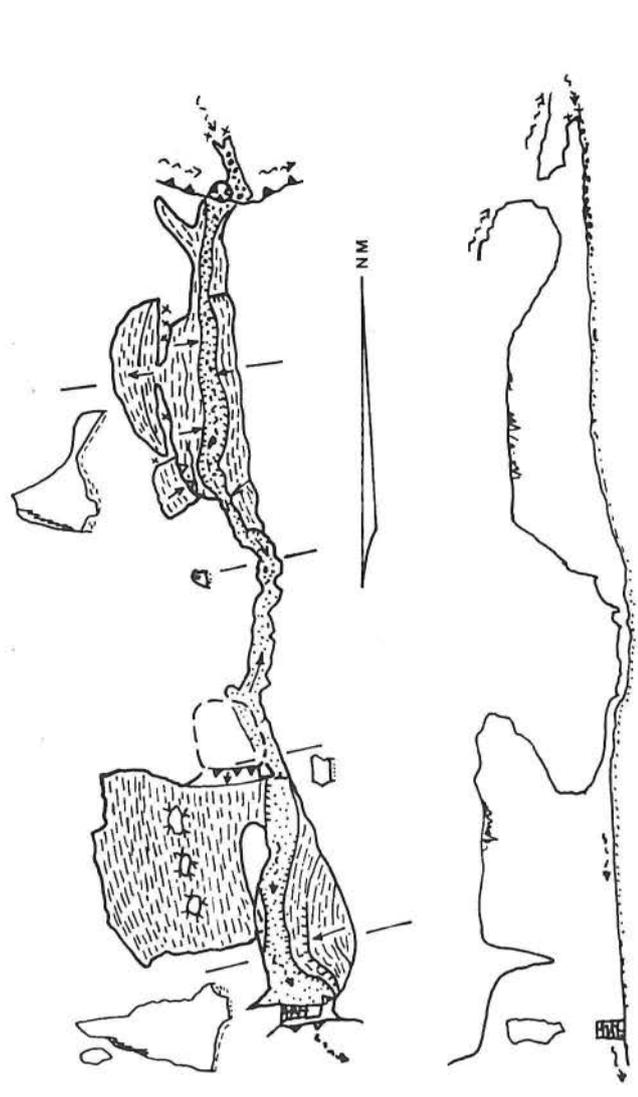
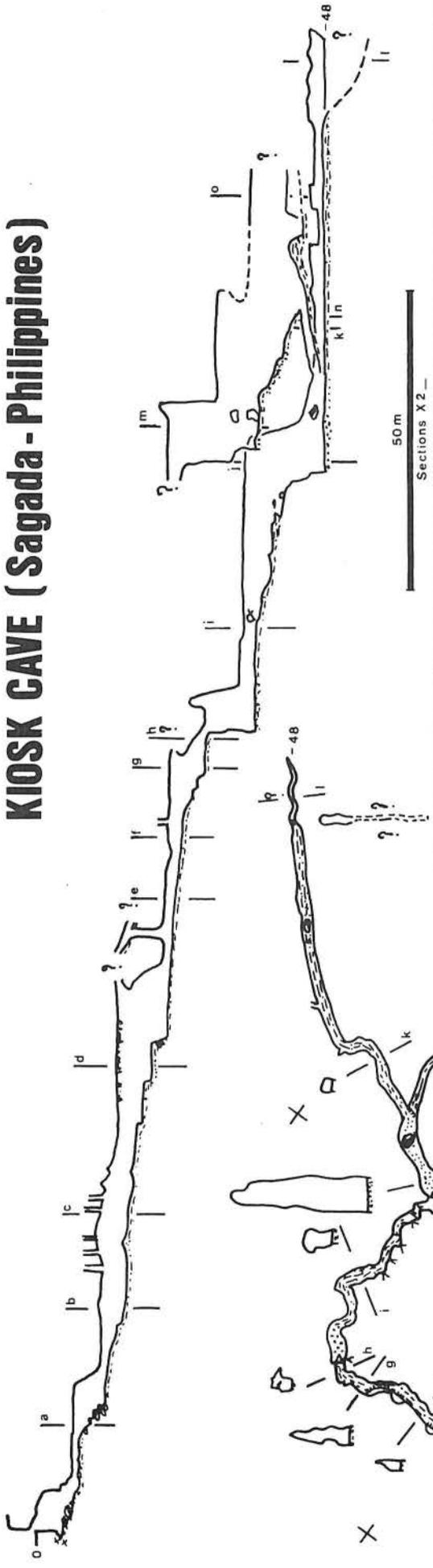
MOURET (C.) - sous presse - Un vaste réseau du karst de Sagada (Mountain Province, Philippines) : Sumagang, Latipan, Lomyang. Mém. n° 12, Spéléo-Club de Paris, coll. «Grands volumes souterrains», 1984.

MOURET (C.) - sous presse - Un réseau karstique tropical de moyenne altitude : Tataya En (Sagada, Mountain Province, Philippines). *Spelunca Bull.*

MOURET (C.), BOUSQUET (Y.), DUFLLOT (S.), MATIEU (J.-J.) - 1983 - Philippines. Expéditions 1982-1983. *Spelunca Bull.*, n° 12, p. 18.

MOURET (C.), BOUSQUET (Y.), CARFANTAN (Y.), PUIG (J.-M.) - 1985 - Philippines. Expédition octobre-novembre 1984. *Spelunca Bull.*, sous presse.

KIOSK CAVE (Sagada - Philippines)



Claude MOURET
Yves BOUSQUET
Sylvie DUFLOT
Jean-J. MATIEU

17 Janvier et 4 Mars 1983

Précision 5 BCRA

Sections vues vers l'aval

HANGING COFFINS CAVE

LA PARTIE CENTRE-OUEST DU KARST DE SAGADA (Luzon, Philippines)

Claude MOURET*
Yves BOUSQUET**

*G.S. Corrèze. La Tamanie 87380 MAGNAC-BOURG
**CASC Saint-Montan Imbours, Larnas 07220 VIVIERS

I. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Le karst de Sagada (Mountain province, Luzon, Philippines) a fait l'objet de recherches spéléologiques depuis la fin de 1979 (Deharveng, 1980) et plus particulièrement en 1982-1983 (Mouret et al., 1983) pour le secteur centre-ouest qui nous intéresse ici. Plusieurs publications ont déjà précisé ses conditions générales.

Il affecte des calcaires oligocènes de la formation de Tineg et se développe en moyenne montagne (1020 à 1636 m). La lame d'eau annuelle transitant par le karst a été évaluée à 1660 mm, chiffre qui reste à préciser (Mouret, sous presse).

La partie centre-ouest du karst se caractérise par plusieurs faits :

- les écoulements de surface y convergent pour leur plus grande partie, et se réunissent à la terminaison aval actuelle du Natividad Cave System (NCS);
- les écoulements souterrains semblent aussi converger vers un point assez identique, entre le NCS et Tataya En Cave (TEC);
- les réseaux spéléologiques de ce secteur s'organisent en fonction des caractéristiques précédentes, liées à des raisons structurales : axe bas N-S situé dans l'alignement de la rivière temporaire qui joint en surface le NCS à la TEC et pendage SE des couches dans tout le secteur Natividad-Lokohong. On observe des pendages ouest au niveau de Latipan mais leur extension vers le Sud n'est pas connue;
- le karst semble réduit dans sa largeur par un système de failles (voir carte), mais quelques incertitudes stratigraphiques ne nous permettent pas de savoir si les calcaires reposent sous les flyschs de l'imperméable; ce ne semble toutefois pas être le cas.

2. LES RÉSEAUX SPÉLÉOLOGIQUES STRUCTURES GÉNÉRALES

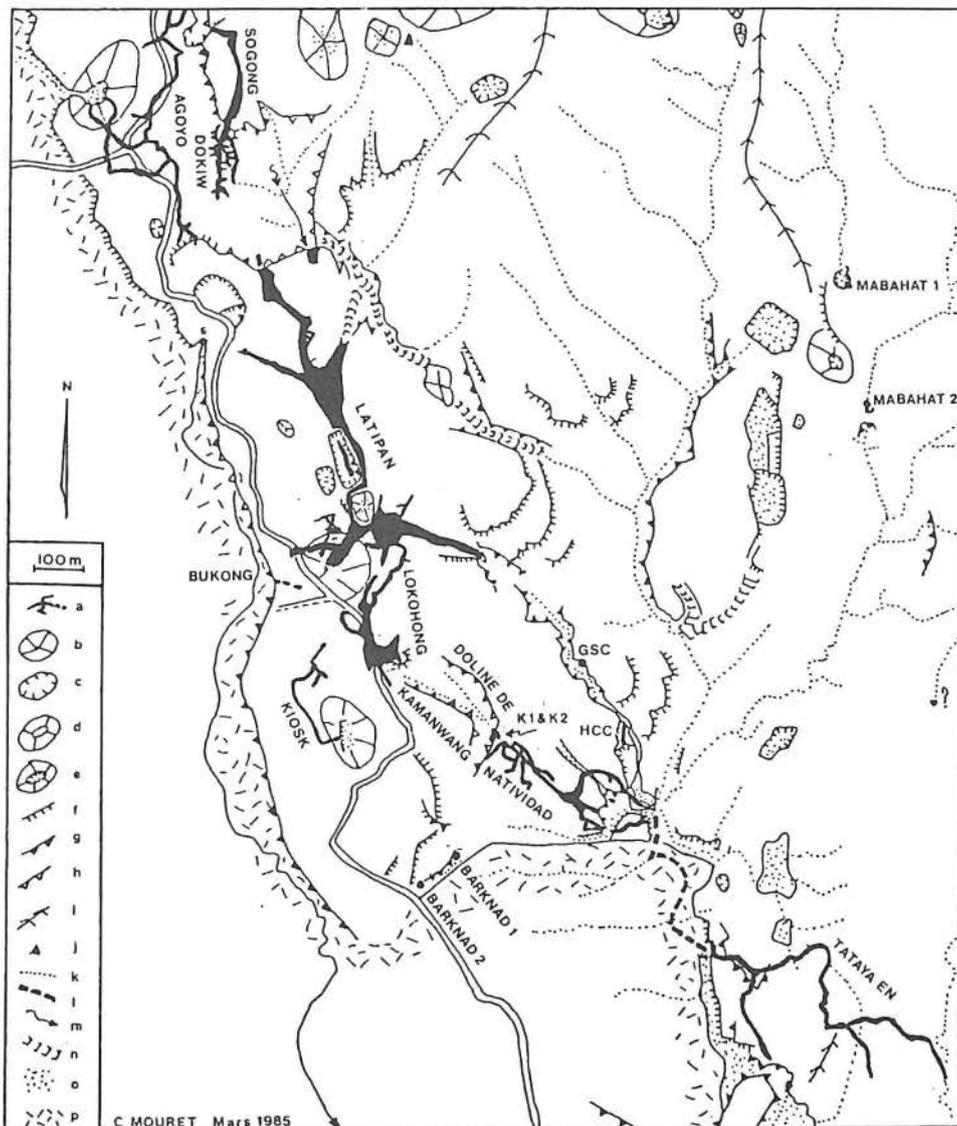
Voir carte et topographies concernées, pour tout ce chapitre.

2.1. Natividad Cave System

C'est un ensemble complexe de galeries réparties sur plusieurs niveaux altimétriques. Il peut être considéré comme l'un de ceux convergeant nécessairement vers Tataya En Cave (chasm); un autre de ces ensembles n'est pas encore exploré, faute d'accès, bien que nous sachions où il doit se trouver.

2.1.1. Natividad Cave

C'est la cinquième grotte du karst de Sagada par sa longueur : 1088 m. Elle comporte deux entrées peu éloignées, en pied de falaise.



Carte de la partie ouest du karst de Sagada d'Agoyo à Tataya En.

Le niveau supérieur. Après l'entrée fossile de grande taille et une fraction de large galerie, un massif de concrétions et probablement en partie la roche obturent presque toute la section. Deux chatières dans la calcite, élargies artificiellement, donnent accès à la suite : une corniche qui matérialise l'ancien plancher de la galerie, lorsque celle-ci coulait vers l'entrée précitée. Cette corniche se retrouve le long des parois de la galerie jusqu'à la «Grande Barrière». Au-delà, la galerie se divise en deux. La branche dans le prolongement mène à un lac en contrebas. Celle de l'ouest,

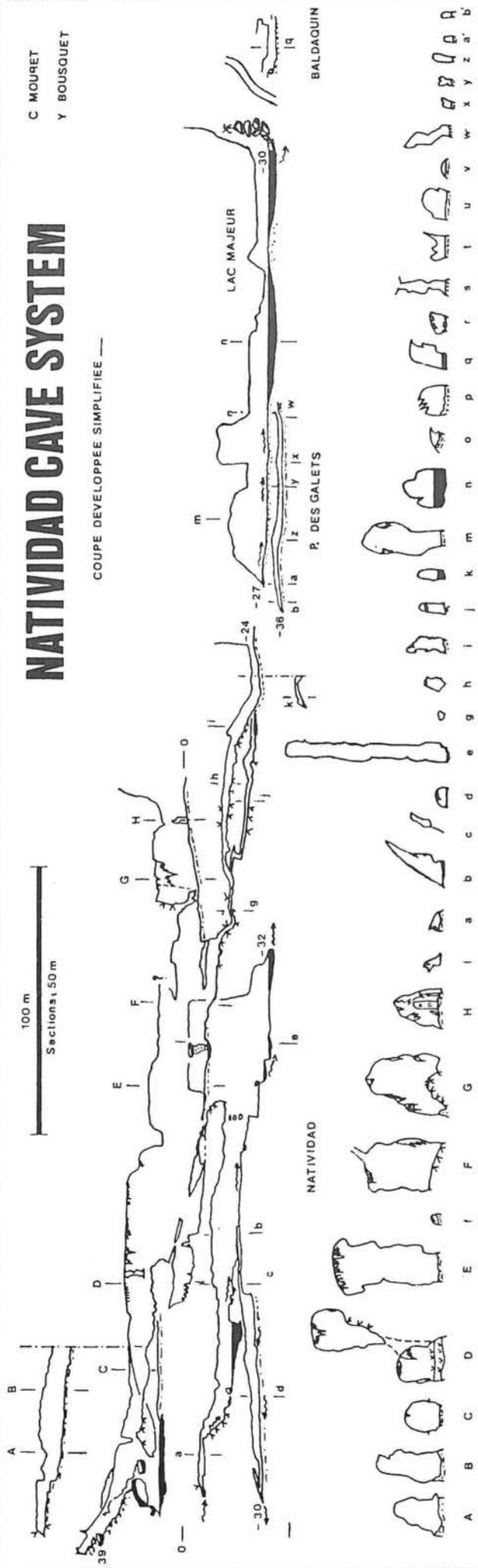
a. Grottes. b, c, d, e. Dolines. f, g, h. Ressauts <1 m, >1 m, >1 m avec surplomb. i. Lignes de crête. j. Sommet. k. Ecoulement temporaire de surface. l. Rivière temporaire. m. Ruisseau permanent. n. Vallée à fond plat. o. Sédiments terrigènes. p. Terrains non karstiques. HCC. Hanging Coffins Cave. GSC. Green Skulls Cave.

encombrée de sable, se divise elle-même en deux : la galerie la plus à l'ouest est obstruée par un dôme de concrétions; l'autre mène à une petite salle où l'on retrouve le lac précité. De là, une courte galerie remontante est obstruée par la calcite et des sédiments terrigènes au nord; au nord-ouest, la «galerie de

NATIVIDAD CAVE SYSTEM

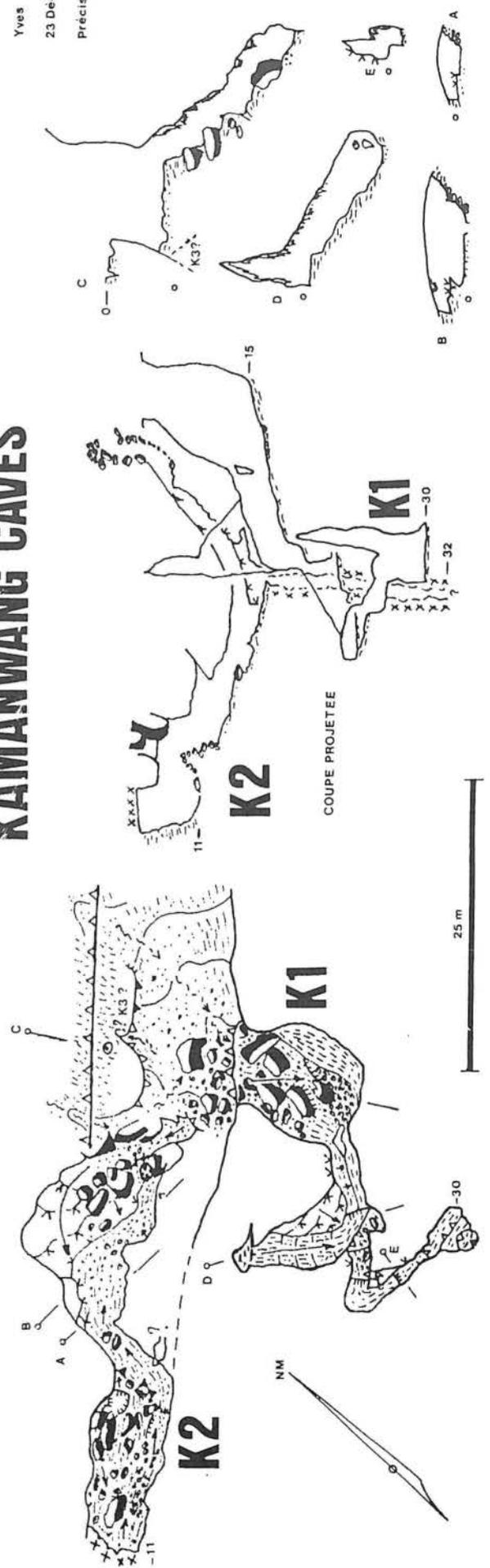
C. MOURET
Y. BOUSQUET

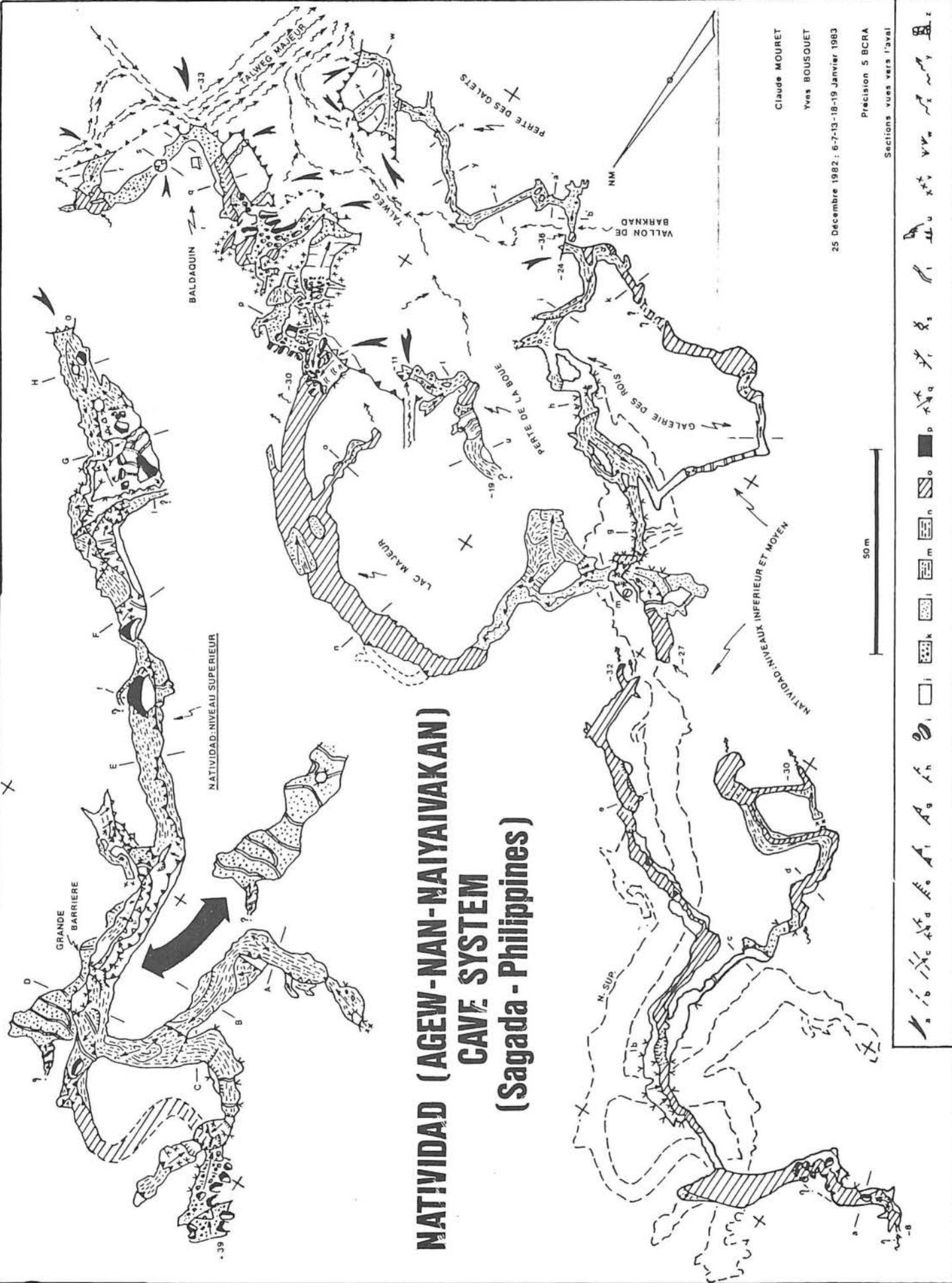
COUPE DEVELOPEE SIMPLIFIEE —



KAMANWANG CAVES

Claude MOURET
Yves BOUSQUET
23 Decembre 1982
Precision 5 BCRA





**NATIVIDAD (AGEW-NAN-MAIYAIYAKAN)
CAVE SYSTEM
(Sagada - Philippines)**

Claude MOURRET
Yves BOUSOUET
25 Decembre 1982; 6-7-13-19 Janvier 1983
Precision 5 BCRA
Sections vues vers l'aval

- a
- b
- c
- d
- e
- f
- g
- h
- i
- j
- k
- l
- m
- n
- o
- p
- q
- r
- s
- t
- u
- v
- w
- x
- y
- z

50 m

Sections vues vers l'aval

Precision 5 BCRA

25 Decembre 1982; 6-7-13-19 Janvier 1983

Yves BOUSOUET

Claude MOURRET

NATIVIDAD NIVEAU X INFERIEUR ET MOYEN

LAC MAJEUR

PERTE DE LA BOUE

VALLON DE BARKNAD

PERTE DES GALETS

TALWEG MAJEUS

BALDAQUIN

GRANDE BARRIERE

NATIVIDAD NIVEAU SUPERIEUR

N. SUP.

39

30

27

32

19

24

36

33

11

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

12

13

14

15

16

17

18

20

21

22

23

25

26

28

29

31

32

34

35

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

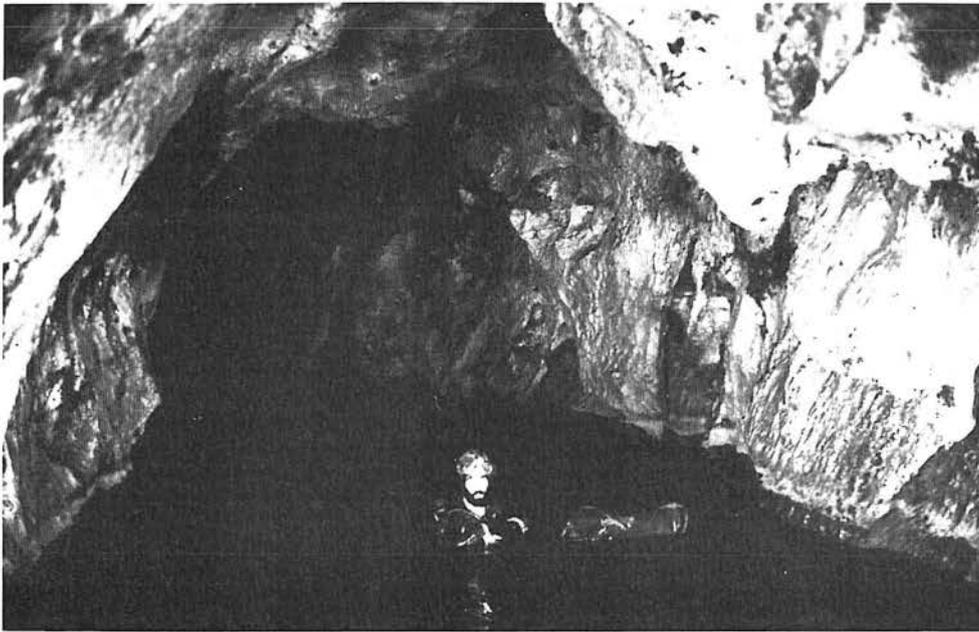


Photo 1. Lac de Major Lake Cave - entrée de la grotte (Photo C. Mouret)

l'éboulis» remonte jusqu'à +39 m. La topographie indique que cet éboulis est celui des Kamanwang Caves, décrites plus loin, mais il n'a pu être encore traversé, 11 m environ les séparent verticalement. De la compréhension de ce secteur dépend l'interprétation de l'origine des sédiments, sables principalement et de celle de l'eau du lac : ruisseaux temporaires de Kamanwang, possiblement et/ou débordement d'un écoulement non connu situé un peu plus bas en altitude.

Le niveau moyen. Entre la «Grande Barrière» et les chatières d'entrée, la galerie principale a une partie haute de plusieurs mètres sous les corniches, qui se prolonge par la «galerie des rois» à l'aval.

Sous la «Grande Barrière», la «galerie des gours» est occupée de nombreux galets. Elle se vide directement en haut de l'accès au niveau inférieur, dont la partie haute devait en constituer la prolongation initiale. Elle constitue donc un stade ultérieur à celui de la «galerie des rois». L'alimentation de la «galerie des gours» (qui coule probablement rarement) par le lac sus-jacent n'est peut-être pas la seule. Par ailleurs, un secteur complexe de fractures ouvertes et karstifiées, non représenté sur la topographie, se trouve juste au sud de l'accès au niveau inférieur et en paroi nord-est.

La «galerie des rois», en fait deux galeries «parallèles», semble alimentée en période de crue par de petits écoulements venus depuis la zone d'accès au niveau inférieur, d'une

part, et par l'entrée située dans le vallon de Barknad d'autre part. Toutefois les cerceaux entrecroisés dans cette entrée depuis des années, voire des dizaines d'années, n'ont jamais été emportés; les débits y restent donc faibles. Probablement, l'eau arrive dans ces galeries en quantités restreintes (?) et disparaît plus par des sous-écoulements lents dans les fissures sous les points bas où l'eau s'accumule, que par des ondes de crue.

Le niveau inférieur. La rivière principale se termine par deux siphons. Celui de l'amont, en

haut d'une cascade et encombré de concrétions, se trouve sous un plancher stalagmitique. La rivière est entrecoupée de nombreuses marmites. Le débit observé le 7.1.83 était de 10 l/s environ et la température de l'eau de 19° C.

Une galerie divergente ouest, occupée par l'eau de la rivière précitée seulement lors des crues, possède aussi un écoulement propre mais un peu plus faible, en période normale. L'origine de cet écoulement n'est pas encore connue. Cette galerie se termine aussi par deux siphons.

2.1.2. Major Lake Cave (Lac Majeur)

C'est une galerie de grande taille occupée en partie par un lac, profond presque partout. Au-delà, la galerie, encombrée de sédiments sableux grossiers à galets, se termine sur un siphon longé par un diverticule lui aussi encombré de sédiments grossiers. Une dérivation latérale de la galerie, concrétionnée, se trouve en hauteur au sud; elle semble être occupée par l'eau lors des crues, d'après les silts qui la tapissent; une autre dérivation dans la roche, existe au niveau du lac. Dans ce secteur, les plafonds et les parois sont très découpés par l'écoulement des eaux en crue: arêtes vives, faux pendants, marmites. Un dépôt sableux s'est mis en place au départ d'une galerie aval latérale. L'entrée, enfin, est occupée par un vaste éboulis de gros blocs provenant des voûtes disparues et de la falaise. Des travertins y passent en transition à des gours.

2.1.3. Grotte du Baldaquin

Elle est située dans le prolongement de Major Lake Cave dont elle constitue soit une

	H	L	l	l/H	Z
Natividad cave	+39/-32 (71)	1088	930	0,855	≈1190
Lac Majeur (Major lake cave)	-16	260	254	0,977	≈1176
Perte des Galets (Pebbles cave)	-5	119	112	0,991	≈1155
Perte de la Boue (Muddy cave)	-15	55	45	0,818	≈1179
Kamanwang K1	-30	56	48	0,857	≈1270
Kamanwang K2	-32	65	46	0,708	≈1270
Barknad 1	-18	30	25	0,833	≈1270
Hanging Coffins cave	-8	87	79	0,908	≈1255
Greens Skulls cave	≈ -5	≈60			≈1275
Bukong cave	>-20	80			≈1320
Kiosk cave	-48	362	317	0,875	≈1370

H = Dénivelée; L = Longueur réelle; l = Longueur en plan; Z = Altitude de l'entrée.

Sont aussi données: Z Lokohong ≈ 1360; Z Tayata En: 1150.

Tableau 1. Mensurations principales des grottes du centre-ouest du karst de Sagada.

←
LEGENDE DE LA PAGE PRECEDENTE
Topographies. Les figurés sont situés sur le plan du Natividad cave system.

a. Entrée. b. Contour incertain ou caché. c. Ligne de pente et courbe de niveau. d. Idem sur sol concrétionné. e. Ressaut mineur (<1 m). f. Ressaut >1 m. g. Ressaut >1 m avec surplomb. h. Rupture de pente au plafond (barre verticale du T vers le bas). i. Blocs. j. Roche à nu. k. Galets, cailloutis. l. Sables. m. Sables argileux ou silts. n. Argile. o. Eau (en plan). p. Eau (en coupe). q. Pente concrétionnée (ligne de pente). r. Paroi concrétionnée. s. Concrétion isolée au sol: stalagmite ou pilier. t. Gour. u. Concrétions (sur coupes). v. Obstructions. w. Herbe. x. Ecoulement pérenne. y. Ecoulement temporaire. z. Mur artificiel.

	dénivelée	pente moyenne	coefficient de sinuosité	longueur de rivière
Rivière de Natividad	24	12,17%	1,28	200
Rivière de Tayata En	12	1,42%	1,40	828
Distance:siphon aval (-32) de Natividad avec siphon amont de Tayata En.	50	11,61%	1,35	580*
Distance aval de Lokohong avec siphon amont de Natividad.	≈74	15,25%	1,30 (hypothèse)	485*

Tableau 2. Pente, sinuosité et longueur «réelle» de tronçons de grottes de la partie centre-ouest du centre de Sagada (* = calculé).

ancienne continuation, par sa branche SE-NW seulement, l'autre branche étant alors un affluent, soit un ancien affluent. La zone de galeries effondrées qui sépare les deux grottes masque la solution. Toutefois, plusieurs des blocs peuvent être virtuellement réassemblés.

La grotte du Baldaquin semble être une exsurgence temporaire, mais elle absorbe peut-être aussi l'eau des vallons de surface, pro parte, jusqu'à saturation des étranglements de galerie.

Au bout de la galerie N-S se trouve un petit écoulement pérenne de 0,1 l/s environ.

2.1.4. Muddy Cave (perte de la boue)

Cette perte absorbe les eaux temporaires d'un petit torrent de surface qui vient du haut de la falaise. Creusée dans la roche en place, elle descend jusqu'à un passage très bas avec un lac de boue puis remonte jusqu'au sommet d'un gour vide indiquant un écoulement dans le sens qui est celui de la perte. Au-delà, la galerie s'élargit jusqu'à un passage bas obturé par des sédiments argilo-sableux mais laissant passer un faible courant d'air.

2.1.5. Pebbles Cave (perte des galets)

Cette petite grotte creusée récemment le long de diaclases, peut-être à la faveur de la décompression superficielle générée par le creusement des thalwegs, se termine sur deux petits siphons. Sa partie est (zone des trois entrées) semble antérieure, sans doute contemporaine des autres galeries du secteur, comme le Baldaquin.

2.1.6. Relations entre les différentes grottes

Elles découlent d'observations et de raisonnements indirects. Il est important de souligner que toutes les grottes ont été réunies (jusqu'à Tataya En) par un relevé topographique de surface (530 m). Malgré tout, celui-ci a été gêné, notamment au niveau des vérifications d'octobre 1984, par une végétation arbustive très serrée. De tels faits empêchent de trop se fier aux différences d'altitude faibles.

A cause de son débit plus faible, Major Lake Cave (MLC) n'est probablement pas la suite de la rivière principale de Natividad. On y trouve aussi de fortes incrustations de calcite dans le lit de son cours d'eau, qui n'existent pas dans Natividad. Enfin, son amont serait plus haut que l'aval de la rivière de Natividad.

Nous n'excluons pas définitivement une relation avec la rivière secondaire (-30) de Natividad.

Muddy Cave, nettement plus haut que MLC ne semble pas a priori devoir lui être rattachée. Une jonction ne serait possible que dans les plafonds de la galerie sèche sud de MLC.

Pebbles Cave pourrait être un accès vers les niveaux profonds du secteur. On est ainsi conduit à admettre l'existence possible de niveaux sous-jacents à Major Lake Cave longeant la rivière de Natividad et d'une possible galerie fossile à partir de Muddy Cave. Enfin, quoique moins probable, une galerie semi-fossile pourrait être à l'origine des galets de la «galerie des gour» de Natividad.

2.2. Kamanwang Caves

Les deux grottes K1 et K2 s'ouvrent au fond d'une profonde (≈ 50 m) doline d'effondrement. K1 semble être une galerie recoupée par l'effondrement qui a créé la doline. K2 est un dédale entre la falaise en surplomb et les blocs effondrés et entre les blocs effondrés eux-mêmes. En octobre 1984, nous avons pu voir un autre vide (K3) entre les blocs, dont l'accès était auparavant obstrué par des sédiments.

Les relations avec Natividad Cave ont été discutées plus haut.

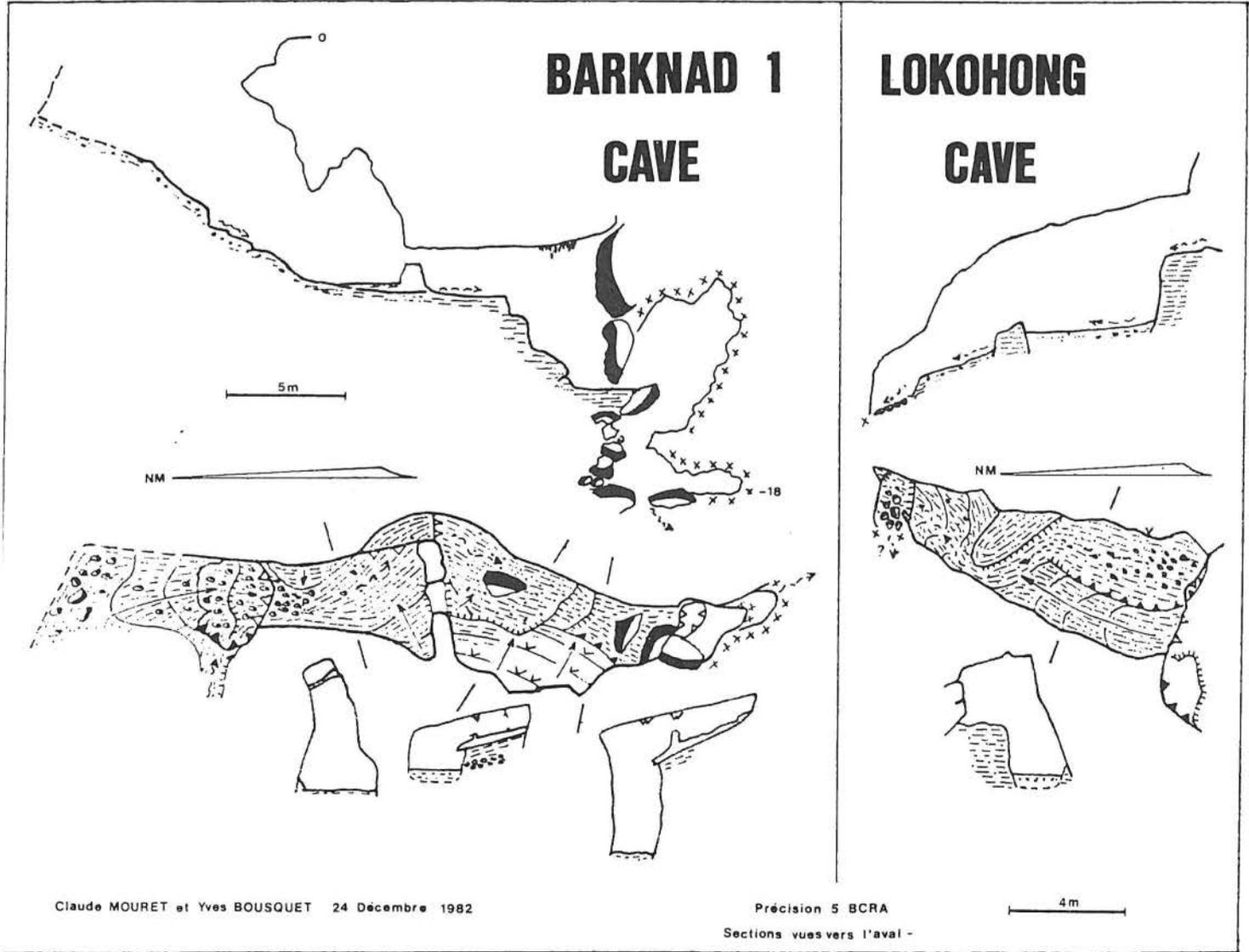
2.3. Barknad Caves

Ce sont deux pertes temporaires rapidement impénétrables, à cause de leur obstruction par d'énormes blocs.

Barknad 1 se développe entre la paroi rocheuse et les blocs. La relation entre les pertes de Barknad et le secteur de Natividad n'est pas connue. Y a-t-il une jonction avec Pebbles Cave, située elle aussi le long du valon de Barknad ou avec l'écoulement secondaire de Natividad inférieur ? Y a-t-il une relation avec les possibles niveaux sous-jacents à Major Lake Cave évoqués plus haut ?

2.4. Lokohong Cave

Cette grotte, déjà topographiée sur le terrain en octobre 84, descend à -106 m par rapport à son entrée de Lokohong, dans la rivière qui prolonge la grotte de Latipan (Mouret et al., 1985). Pour des raisons d'orientation et de similarité de débit, il s'agit probablement de



Claude MOURET et Yves BOUSQUET 24 Décembre 1982

Précision 5 BCRA
Sections vues vers l'aval -

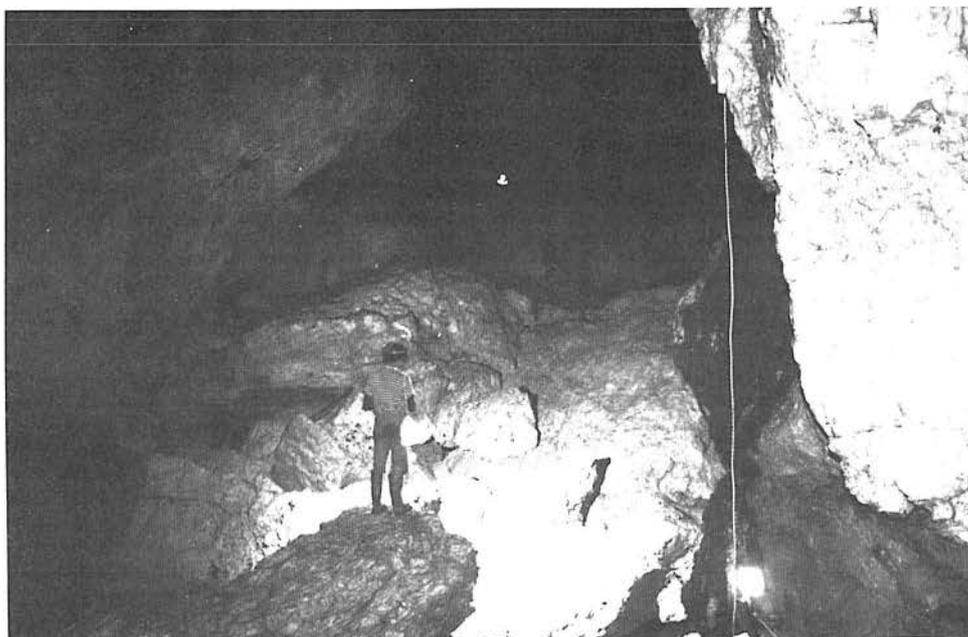


Photo 2. Galerie inférieure de Lokohong Cave (photo Y. Bousquet)

la même eau que celle de la rivière principale de Natividad. Cette grotte fera l'objet d'un article beaucoup plus détaillé.

2.5. Bukong Cave

Partiellement explorée en octobre 1984, cette grotte descendante se développe au contact des calcaires avec leur socle. Nous la citons ici pour mémoire. Elle fera aussi l'objet d'un article plus détaillé.

Elle pourrait être soit un affluent fossile de Lokohong, soit une grotte indépendante. On ne peut exclure aussi une ancienne exsurgence comme l'est actuellement la source d'Ambasing.

2.6. Kiosk Cave

Cette grotte formée de galeries plutôt hautes et étroites matérialise le macrodrainage de la doline dans laquelle elle s'ouvre.

Elle pourrait s'étendre un peu plus en amont mais ceci est peu probable, car au départ, la galerie est déjà étroite et proche aussi du sommet de la colline. Elle peut toutefois traverser toute la doline.

Contrairement à toutes les autres, cette grotte descend en se dirigeant vers le Nord, à contre-pente générale. Des pendages locaux orientés de la même façon pourraient expliquer ce point qui reste à préciser. La grotte reste néanmoins essentiellement creusée le long de diaclases. Elle devient impénétrable à son point bas (- 48 m) à cause d'un changement de section assez brutal qui transforme la galerie en un canyon étroit qui s'enfoncé rapidement.

Cette grotte peut se rattacher soit aux gale-

ries du secteur Lokohong-Kamanwang soit se diriger vers Bukong.

2.7. Hanging Coffins Cave

Une perte dans le canyon du vallon de Latipan, créée par recoupement du toit d'une galerie antérieure, mène après des chatières emplies de sable à une vaste galerie, avec un diverticule latéral spacieux. Celle-ci a servi d'hypogée funéraire. L'entrée aval est en grande partie murée. L'amont de la grotte est obturée par un éboulis.

Cette grotte est indépendante de toutes les galeries plus basses de Natividad.

2.8. Green Skulls Cave

Ouverte dans la paroi est du vallon de Latipan, au niveau de l'élargissement du vallon en amont de la grotte précédente, elle est constituée par une partie ovale de 5 m de diamètre environ, qui a servi de sépultures à maints individus, et qui se prolonge par une galerie subhorizontale longue de 60 m environ.

Plusieurs autres très courtes grottes s'ouvrent à proximité immédiate. Beaucoup ont servi de sépultures.

2.9. Relations d'ensemble entre les différentes grottes

Les relations entre les grottes du Natividad Cave System ont été commentées plus haut. Son amont connu à l'heure actuelle se prolonge très probablement par les Kamanwang Caves, bien que la jonction n'ait pas encore pu être faite.

A ce jour, nous considérons que trois avals sont possibles : le siphon aval de la rivière de Natividad, celui de Major Lake Cave et peut-

être celui de Pebbles Cave. Le tableau 2 montre les longueurs de galeries actives prévues entre le siphon amont de Tataya En et le siphon aval de Natividad (- 32) qui a le plus gros débit du NCS et est donc le plus comparable à celui de Tataya En ; il indique aussi les valeurs correspondantes pour l'intervalle Lokohong-Natividad, en faisant l'hypothèse qu'il s'agit du même écoulement : débits similaires, même orientation des galeries avec pentes relativement comparables si on adopte un coefficient de sinuosité comparable ; on pourrait baisser la pente en augmentant la sinuosité dans les calculs.

Bukong et Kiosk Caves forment peut-être un ensemble à part, sinon elles peuvent soit se rattacher à l'ensemble Latipan-Lokohong-Kamanwang-Natividad, soit le croiser.

Les Barknad Caves ont déjà été discutées plus haut. Quant aux grottes du vallon de Latipan, il a déjà été dit qu'elles sont indépendantes.

A partir de la grotte du Baldaquin, les canyons de surface se rejoignent tous, formant une large rivière temporaire, qui s'engouffre un peu plus en aval dans les puits d'accès de Tataya En Cave.

3. CONCLUSIONS

La partie centre-ouest du karst de Sagada, avec ses écoulements multiples et ses grottes complexes reste finalement très partiellement connue, malgré les travaux effectués. L'indice de cavernement y est élevé, mais beaucoup d'éboulements, liés en général à la proximité de la surface, interrompent l'exploration.

Les siphons de la zone aval constituent un obstacle momentané. La phase ultérieure sera l'essai de jonction entre Lokohong cave, les Kamanwang et Natividad d'une part et entre Natividad et Tataya En d'autre part. Enfin le rôle de Bukong cave devra être précisé par la continuation de son exploration lors de notre prochaine expédition.

Claude MOURET
Yves BOUSQUET

BIBLIOGRAPHIE

DEHARVENG (L.) - 1980 - Spéléologie aux Philippines. Expédition L. Deharveng-J. Orousset, 10 décembre 1979 au 12 février 1980. Toulouse, chez l'auteur, 44 p.

MOURET (C.) - 1984 - Un vaste réseau du karst de Sagada (Mountain Province, Philippines) : Sumaging, Latipan, Lomyang. Mém. n° 12, Spéleo-Club de Paris, coll. «Grands volumes souterrains».

MOURET (C.) - 1985 - Un réseau karstique tropical de moyenne altitude : Tataya En (Sagada, Mountain Province, Philippines). *Spelunca Bull.*

MOURET (C.), BOUSQUET (Y.), DUFLOT (S.), MATIEU (J.-J.) - 1983 - Philippines. Expéditions 1982-1983. *Spelunca Bull.*, n° 12, p. 18.

MOURET (C.), BOUSQUET (Y.), CARFANTAN (Y.), PUIG (J.-M.) - 1985 - Philippines. Expédition octobre-novembre 1984. *Spelunca Bull.*, 1985.

LE RESERVOIR KARSTIQUE DE LA COTE DE DELME

Claude GRIOLET
Michel HALLER

Service régional d'aménagement des eaux de Lorraine, METZ

CARACTERES TOPOGRAPHIQUES, STRUCTURAUX ET GEOMORPHOLOGIQUES SOMMAIRES DU SITE

La «Côte de Delme» constitue un relief marqué de formations calcaires massifs, situé à 30 km au sud de Metz. Long de 6 km pour 1 km de large et orienté NNW-SSE, ce relief culmine à 398 m au-dessus du plateau lorrain égerement vallonné constitué pour l'essentiel par des terrains imperméables.

Le site tire son originalité du fait qu'il constitue une butte témoin largement séparée de l'avant-côte de Moselle par la dépression de la vallée de la Seille. La conservation de cette butte est sans doute liée :

- au contexte structural régional, car ce relief se trouve à cheval sur l'axe synclinal de Sarreguemines d'orientation nord-est/sud-ouest, ce qui a surbaissé les niveaux du Dogger;

- au contexte structural local, par la présence d'une faille double qui a abaissé le compartiment est et a créé un escarpement le long de la faille contraire.

Ces deux dispositions structurales s'ajoutent et ont contribué à la conservation de ce relief.

Une faille secondaire, orthogonale à la faille double, en touche de piano, complique cette structure.

Les versants correspondent soit à un front de cote, soit à un talus d'érosion, selon que l'on considère l'un ou l'autre des compartiments induits par cette faille.

Durant les périodes froides du Quaternaire, l'érosion périglaciaire a joué un rôle très important : la quasi-totalité des versants de ce relief est tapissée d'éboulis de pente qui nasquent totalement la structure des formations sous-jacentes aux calcaires.

I. CARACTERISATION DES AQUIFERES

Cette butte représente un véritable château d'eau pour toutes les communes situées à son pourtour, alimentées en eau par les nombreuses sources issues de l'aquifère essentiellement karstique qu'elle constitue.

Malheureusement, depuis 1975, les teneurs en nitrates des eaux de certains points d'eau ont fortement augmenté, dépassant la norme européenne de 50 mg/l.

I.1. Lithologie

Dix forages de reconnaissance ont permis de constater que le Bajocien inférieur était ici fortement détritique et affecté de variations latérales de faciès importantes dues à une structure lenticulaire.

D'une manière générale, ce sont des calcaires sableux et des grès calcaires plus ou moins argileux, surmontés là où la série est la

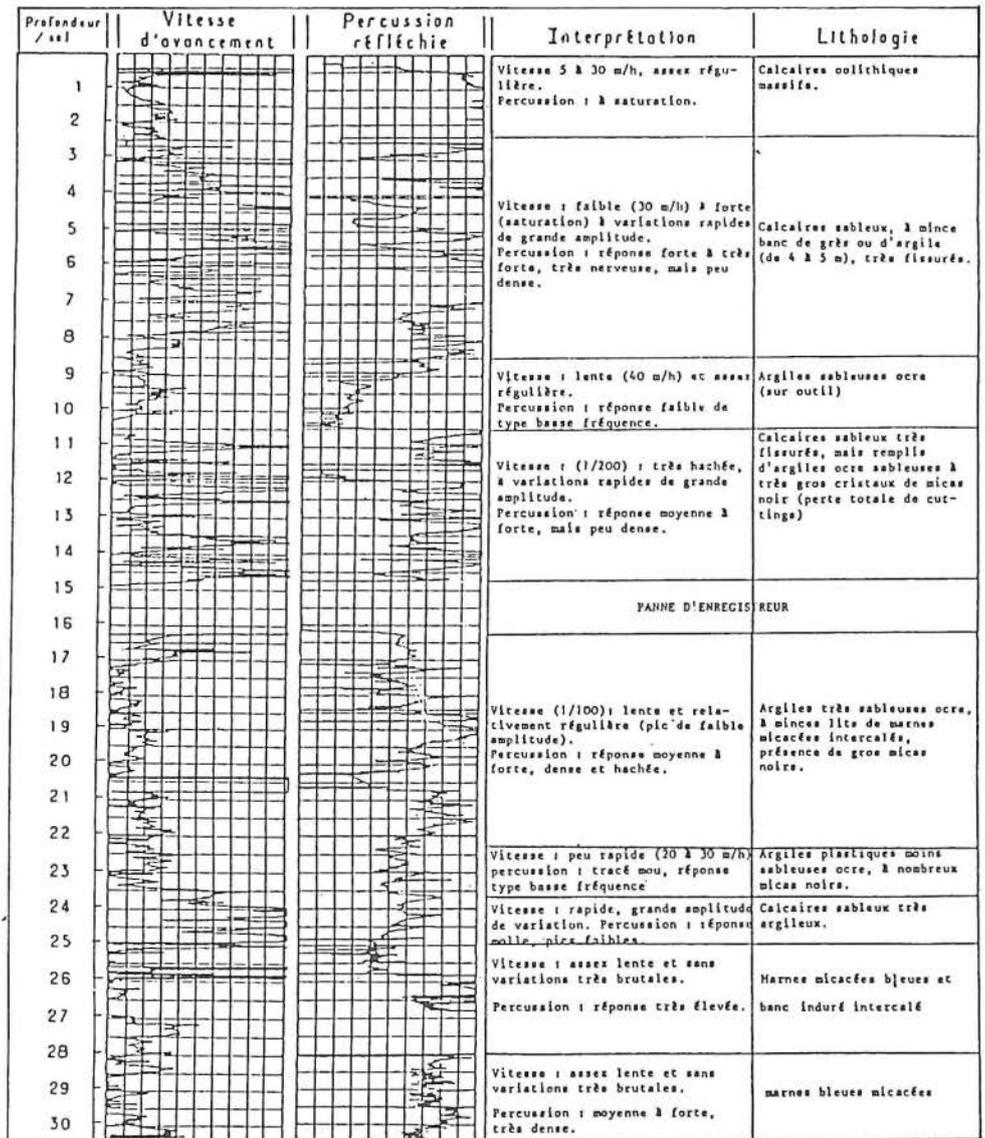


Fig. 1. Forage P 10. Diagrammes instantanés et interprétation lithologique.

plus complète, par des calcaires blancs oolithiques.

Ils reposent sur la formation des marnes bleues micacées qui marquent le début du Bajocien et représentent le substratum imperméable.

La série présente donc du haut vers le bas les faciès des «calcaires oolithiques à Clypeus angustiporus», des «roches rouges», des «Calcaires sableux de Haye» et des «marnes micacées».

Sur les pentes se sont accumulés des éboulis dont le rôle hydrogéologique peut être lui aussi très important.

II.2. Fissuration

Des diagraphies instantanées réalisées lors des forages de reconnaissance, vitesse d'avancement et percussion réfléchie, ont montré que si les fissures étaient nombreuses, elles étaient au maximum de taille centimétrique et que bon nombre d'entre elles étaient remplies d'argile (fig. 1).

II.3. Vitesse de circulation des eaux

Une coloration a été effectuée au printemps 1980. La fluorescéine est apparue sur les sources de Liocourt 15 jours après l'injec-

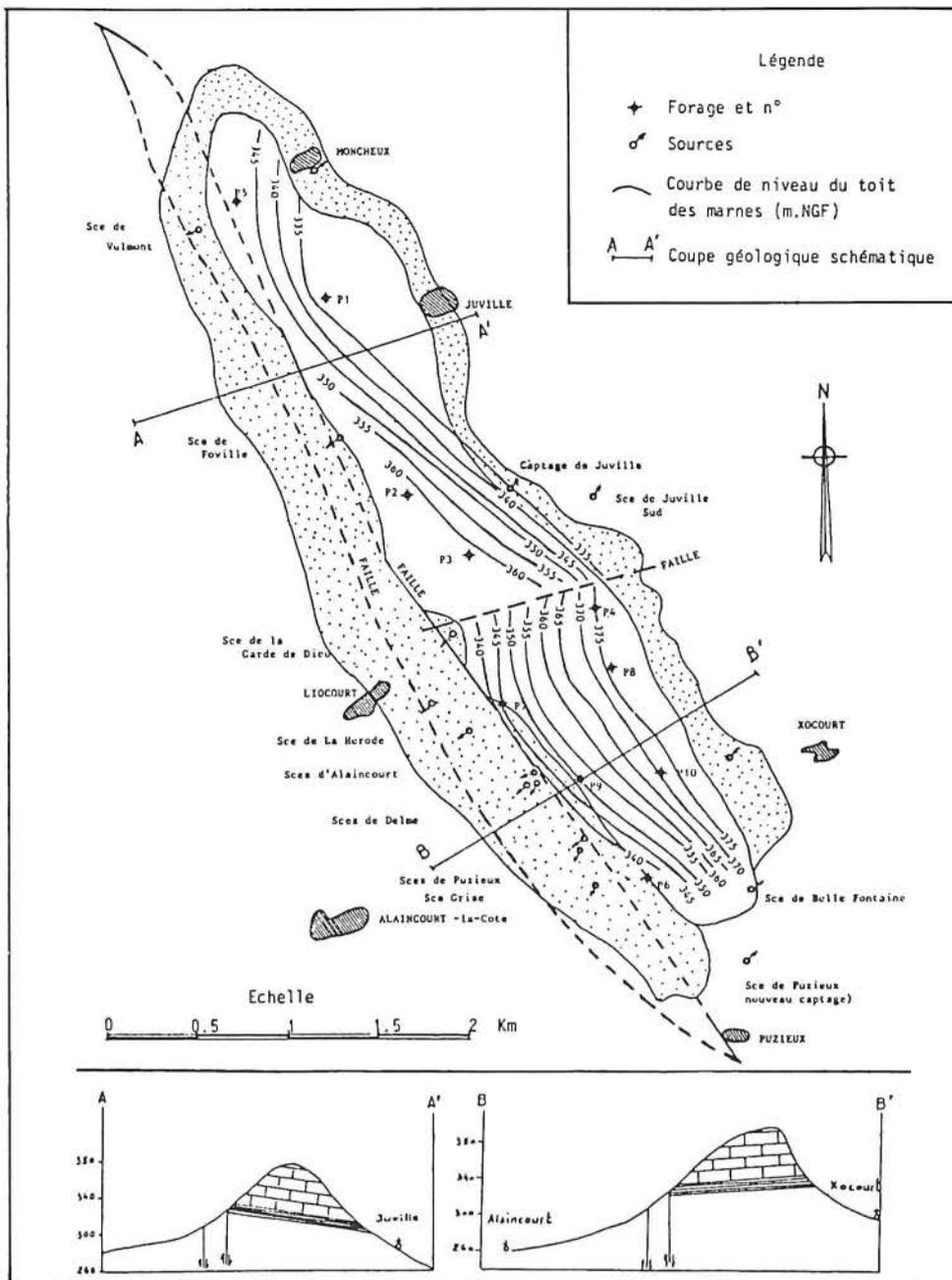


Fig. 2. Esquisse structurale du toit des marnes micacées

tion, ce qui, compte tenu des distances, représente une vitesse de circulation de l'ordre de 30 m par jour dans les calcaires sableux fissurés.

II.4. Structure

En limite ouest, cette côte est bordée par deux failles de direction nord-ouest/sud-est masquées par les éboulis de pente.

La forme des versants, ainsi que des mesures du pendage des couches, laissait supposer qu'une faille perpendiculaire pouvait exister, dont le tracé correspondrait au grand thalweg de la Garde de Dieu.

La côte du toit des «marnes micacées» a été repérée sur chaque forage de reconnaissance. L'observation de quelques affleurements, complétant ces renseignements, a permis d'établir une esquisse structurale du toit des marnes micacées (fig. 2).

Cette carte fait nettement apparaître deux compartiments :

- un compartiment sud, où le pendage de 4 à 5° est vers l'WSW, alors que les couches sont orientées NNW-SSE;
- un compartiment nord, où le pendage de 2 à 3° est vers le NE, alors que les couches sont

orientées NW-SE, marqué de deux plis à très grand rayon de courbure.

On ne peut raccorder les courbes isohypses de ces deux compartiments, ce qui tendrait à confirmer l'existence d'une faille barrant la côte dans l'axe ENE-WSW et passant approximativement par la Garde de Dieu, sans qu'on puisse déterminer très exactement son tracé.

Il existe une relation assez étroite entre le sens du pendage des couches et le degré d'occurrence des sources qui sont beaucoup plus nombreuses sur le flanc ouest de la côte.

Par ailleurs, la limite probable des affleurements de marnes micacées permet de faire la distinction entre les sources de déversement au contact du substratum imperméable, et les sources d'éboulis.

III. REGIME D'ECOULEMENT DES SOURCES

III.1. Courbes de récession

La partie décroissante d'un hydrogramme de source se décompose traditionnellement en deux parties :

- la décrue, pendant laquelle les eaux infiltrées contribuent au débit observé à l'exutoire;
- le tarissement pendant lequel l'écoulement des eaux du réservoir karstique n'est plus influencé par les eaux d'infiltration (vidange de la nappe seule).

On a donc pendant la décrue : $Q = Q_s + Q_r + q$ (source + Q_r (réserve) + q (infiltration)) et pendant le tarissement : $Q = Q_r$ et $q = \text{zéro}$.

La formule de Maillet exprime la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps et s'adapte bien au tarissement (vidange du karst noyé) :

$$Q_r = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} = \varnothing(t)$$

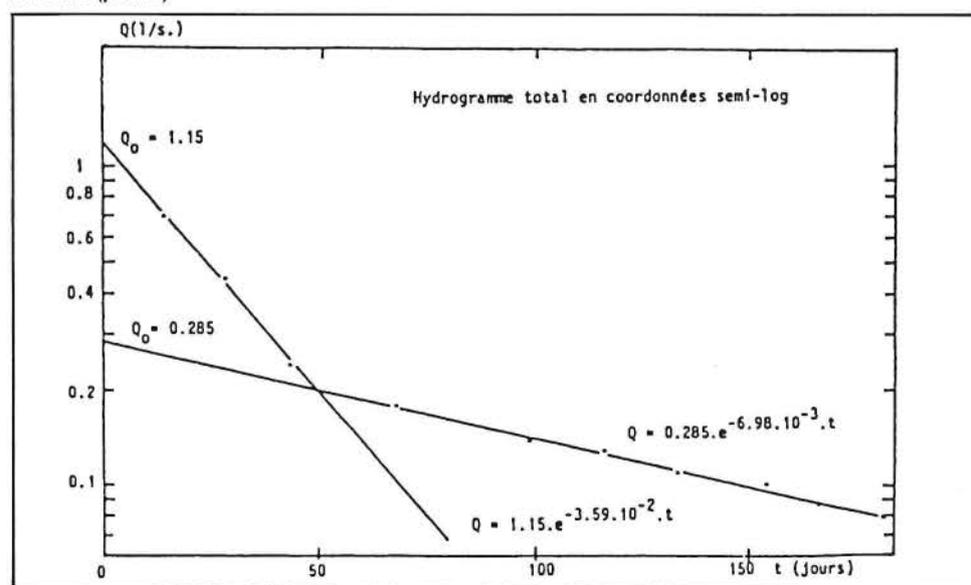
où α représente le coefficient de tarissement. A. MANGIN a constaté d'autre part qu'il s'agit de la fonction hémographique qui s'adapte le mieux à la décroissance des débits dus à l'effet provoqué par l'infiltration. Cette fonction s'écrit :

$$q = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \Sigma t} = \psi(t)$$

avec : q_0 le «débit d'infiltration» observé en pointe de crue ; η le coefficient de durée d'infiltration ; Σ le coefficient d'hétérogénéité d'écoulement.

En coordonnées semi-logarithmiques, les derniers points de la courbe de récession permettent de tracer une droite représentative de l'exponentielle de tarissement et de calculer le coefficient α de tarissement.

Fig. 3. Hydrogramme de la source de la Garde de Dieu (petite)



Si l'on suppose que α reste constant, le débit des eaux liées à la réserve étant connu, on peut déterminer le débit des eaux liées à l'infiltration provenant de la zone non saturée :

$$q = Q - q_0 e^{-\alpha t}$$

On procède alors à une méthode d'alignement à l'aide d'une nouvelle variable du type :

$$y = \frac{t - t_i}{Q - Q_0}$$

où t_i est le temps écoulé entre la pointe de crue et le moment où la courbe de récession rejoint la courbe de tarissement.

L'analyse des courbes de récession (décru et tarissement) des sources d'Alaincourt-la-Côte, Liocourt et Juville nous a permis de calculer des coefficients de tarissement α , de durée d'infiltration η et l'hétérogénéité d'écoulement Σ (fig. 3 et 4).

L'ensemble des résultats est reporté dans le tableau 1.

Le coefficient de tarissement exprime la plus ou moins grande vitesse d'épuisement des réserves (vidanges de l'aquifère).

En se référant à ce seul critère, ce serait donc les sources de la Hérode, de la Garde de Dieu (Petite) et d'Alaincourt (profil) dont les réserves baisseraient le plus vite.

Par ailleurs, le calcul des réserves de tarissement montre qu'il ne faut qu'une centaine de jours à ces sources pour épuiser la moitié de ces réserves, alors qu'à Juville sud, ce temps est porté à 120 jours, et à plus de 360 jours à Juville Village.

Toutefois, la présence de deux droites de tarissement tendrait à montrer qu'on a affaire à deux systèmes d'écoulement.

À Juville, ainsi que sur la source d'Alaincourt (face), où l'on ne dénote qu'une seule droite de tarissement, les coefficients sont les plus faibles de tous ceux qui ont pu être calculés. Sans doute ces sources, assez éloignées des calcaires, sont influencées de façon prépondérante par les écoulements dans les éboulis de pente.

Par contre, à la Hérode, la valeur 10 fois plus forte trouvée, bien qu'encore faible, montre un stockage des eaux plus important peut-être dû à une situation géologique différente (présence d'une faille).

Quant au coefficient d'hétérogénéité d'écoulement Σ , il vient confirmer les observations précédentes. En effet, une faible valeur de Σ montre la prédominance d'une infiltration lente en regard d'écoulements rapides et un grand étalement dans le temps des apports à l'aquifère par infiltration.

La superposition de deux types d'écoulement pourra donc se traduire par des coefficients d'un ordre de grandeur différent, comme c'est le cas notamment sur la source de la Garde de Dieu (Grande).

Toutefois, les valeurs trouvées, toutes inférieures à l'unité, indiquent que les circulations sont plutôt lentes et auraient lieu dans un milieu caractérisé par une granulométrie assez homogène et relativement fine.

Par contre, à la Hérode, où Σ se rapproche le plus de l'unité (jusqu'à 0,81), on peut supposer que l'alimentation par infiltration est beaucoup plus rapide.

III.2. Boucles d'hystérésis

On a calculé les deux variables ΔQ et ΔP égales à :

$$\Delta Q = \frac{Q - \bar{Q}}{\bar{Q}}$$

et

$$\Delta P = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}}$$

où Q et P sont le débit moyen et la pluie observés durant une saison donnée et \bar{Q} et \bar{P} sont

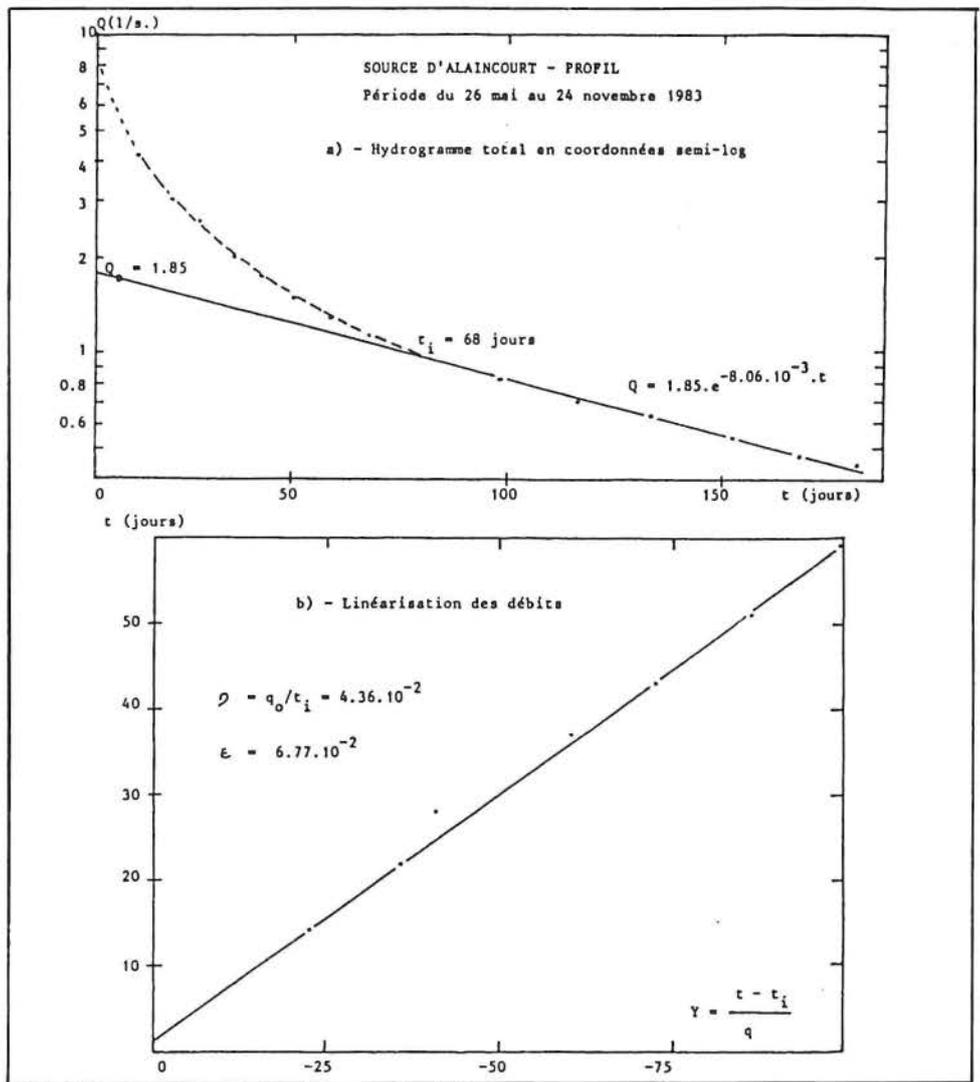


Fig. 4. Exploitation de l'hydrogramme de la source d'Alaincourt (profil)

SOURCES	Coefficient de tarissement α	Coefficient de durée d'infiltration ρ	Coefficient d'hétérogénéité d'écoulement ϵ
<u>LIOCOURT</u>			
Garde de Dieu (Grande)	: 4,2 à 7,5 . 10 ⁻³	: 4,5 . 10 ⁻²	: 8,9 . 10 ⁻² à 0,11
Hérode	: 4,3 . 10 ⁻³ à 3,5 . 10 ⁻²	: 0,26	: 0,64 à 0,81
<u>ALAINCOURT</u>			
Face	: 4,2 . 10 ⁻³	: 3,1 . 10 ⁻²	: 0,26
Profil	: 8,1 à 9,4 . 10 ⁻³	: 4,4 . 10 ⁻²	: 6,8 . 10 ⁻²
<u>JUVILLE</u>			
Sud	: 6 . 10 ⁻³	: 7,6 . 10 ⁻²	: 0,13
Village	: 1,3 . 10 ⁻³	: 6,9 . 10 ⁻²	: 9 . 10 ⁻²

Tableau 1. Ensemble des résultats

les moyennes saisonnières calculées sur la période d'étude.

ΔQ et ΔP sont cumulés et reportés sur un graphique.

On peut alors obtenir quatre cas de figures correspondant à différentes boucles d'hystérésis :

- des boucles normales («positives») autour de saisons humides ou de saisons sèches,
- des boucles anormales («négatives») autour de saisons humides ou de saisons sèches.

Les saisons ont été choisies comme suit :

- hiver de janvier à mars
- printemps d'avril à juin
- été de juillet à septembre
- automne d'octobre à décembre.

Pour la période 1982-1984, et sur trois années hydrologiques complètes, on a étudié les sources de la Garde de Dieu (grande et

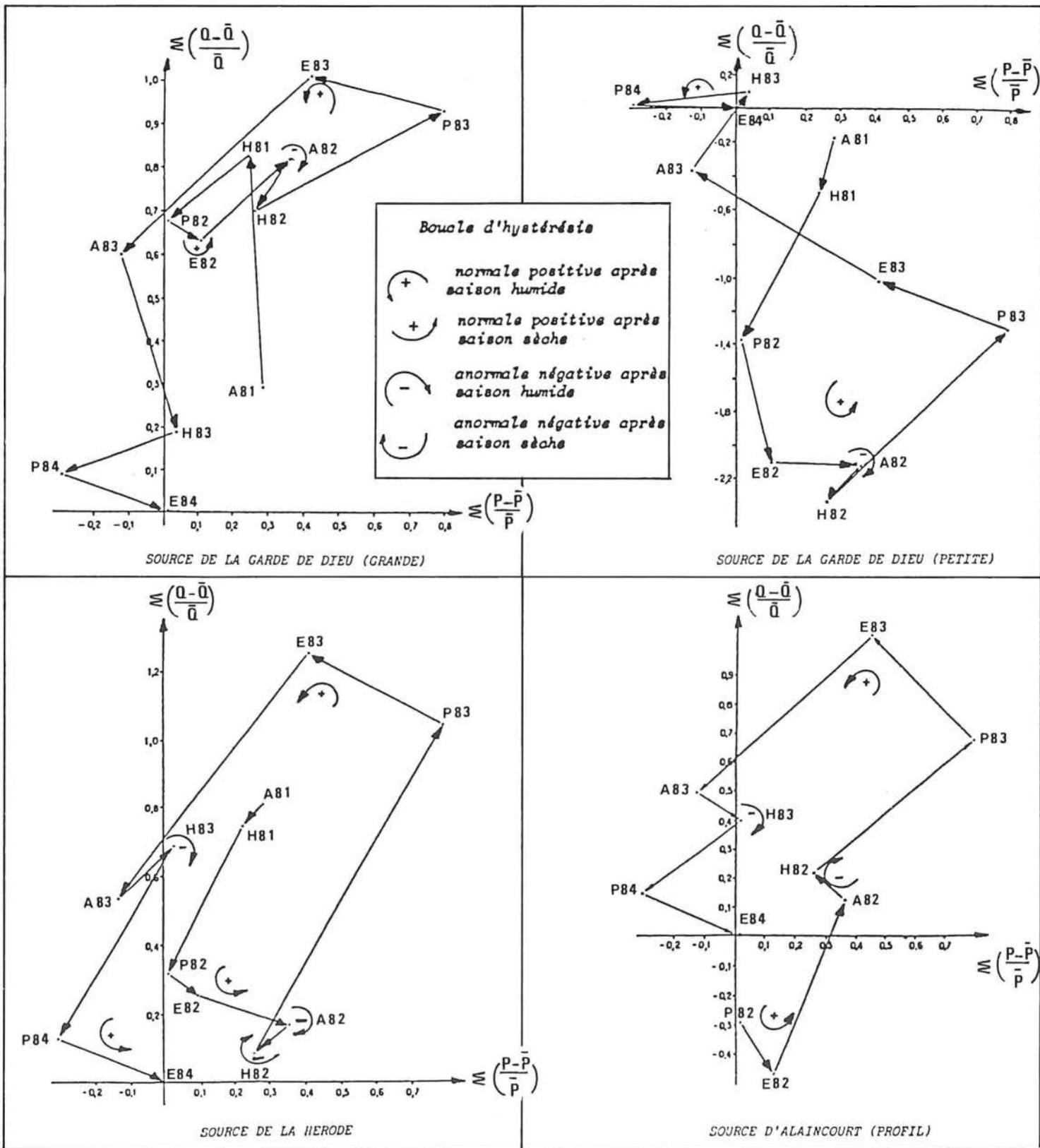


Fig. 5. Double cumul des écarts normes saisonniers des débits et des précipitations

petite), de la Hérode et d'Alaincourt (face et profil) (fig. 5).

Alors que les sources d'Alaincourt ne montrent pas de boucles anormales très caractérisées (hivers 1982 et 1983), les sources de la Garde de Dieu et surtout de la Hérode montrent une boucle anormale à l'automne-hiver 1982.

On peut proposer l'explication suivante :

Au cours d'une saison humide et après saturation des sols, les débits augmentent en fonction de la pluviométrie et il y a stockage d'eau dans les aquifères. Lorsque la pluviométrie diminue, les débits décroissent, mais

moins vite qu'ils n'avaient augmenté du fait de la restitution des réserves.

Après une saison sèche, la réserve facilement utilisable des sols (RFU) soit être reconstituée avant qu'une partie des pluies ne s'infilte. Aussi les débits continuent-ils de baisser un certain temps, malgré une augmentation de la pluviométrie.

Ce schéma d'une boucle d'hystérésis «positive» normale correspond à un aquifère homogène et semble s'appliquer aux sources d'Alaincourt alimentées essentiellement par les éboulis de pente.

Pour les sources de la Garde de Dieu, qui sourdent au contact du substratum imper-

méable ou de la Hérode, assez proche des affleurements du Bajocien, le mécanisme de l'alimentation et de la vidange des aquifères serait différent.

Les sources de la Garde de Dieu, qui sont des sources de déversement caractérisées, sont issues directement des calcaires sableux et grès peu consolidés du Bajocien inférieur ayant une double porosité :

- une porosité de fissures démontrées par les diagraphies instantanées,
- une porosité d'interstice probablement importante dans ce type de formation.

Ainsi, lorsque la pluviométrie augmente après une période de sécheresse, l'eau infil-

rée serait piégée dans les interstices et les débits continueraient à baisser. La matrice rocheuse n'étant pas complètement saturée, lorsque la pluie diminue, les débits diminuent aussi l'eau gravitaire contenue dans les interstices n'étant pas pratiquement pas mobilisée.

Ce schéma pourrait expliquer les boucles d'hystérésis « négatives » anormales.

Par ailleurs, il peut expliquer aussi que l'on observe sur les sources de débordement, et elles seules, deux droites de tarissement avec des coefficients α significativement différents.

Les éboulis, dans ce contexte, joueraient alors un rôle de régulation des écoulements.

II.3. Aires d'alimentation des sources

La connaissance des débits moyens et de l'évapotranspiration potentielle décennales permet d'obtenir la courbe des doubles cumuls de la figure 6, composée par la succession répétitive de trois pentes dont on peut donner l'interprétation suivante :

- en période estivale :
- (P - ETP) est nul ou négatif, il n'y a pas l'infiltration des eaux de pluie, mais l'aquifère continue de se vidanger. La pente du graphique est alors verticale;
- au début de l'automne et lors des premières pluies, la réserve en eau des sols se reconstitue et l'infiltration est encore nulle, du tout au moins très faible. Les débits aux exutoires continuent de décroître et la pente de la droite devient quasi horizontale;
- le sol étant saturé en eau, l'infiltration vers le réservoir est possible et provoque une reconstitution des réserves. Le débit des sources augmente progressivement pour devenir ensuite proportionnel à la pluie excédentaire accumulée :

$$\Sigma Q = S \cdot \Sigma (P - ETP)$$

La surface de l'aire d'alimentation S est donc la pente de la droite.

Cette démarche, assez approximative, suppose que le ruissellement de surface puisse être négligé, ce qui semble être le cas d'après nos observations de terrain. Dans le cas contraire, les résultats obtenus sont par excès.

Les aires d'alimentation calculées par cette méthode sont reportées dans le tableau 2.

SOURCES	Aires d'alimentation (en hectares)	
	valeurs extrêmes	valeur retenue
Garde de Dieu (Grande)	9 à 15,5	9
(Petite)	0,74 à 1,04	1
Alaincourt (face)	7,1 à 9,4	8,2
(profil)	6,8 à 13,3	10,5
Juville (captage)	15,4 à 21,2	18,3
(sud)	15 à 22,1	18,2
Hérode	6,4 à 13,5	8,3

Tableau 2. Calcul des aires d'alimentation

I. QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX

I.1. Généralités

Les eaux sont toutes des eaux bicarbonatées calciques d'origine karstique.

Sources	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁼	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
ALAINCOURT	88.2	4.4	2.2	0.8	23.6	20.8	165.0
GARDE de DIEU	105.8	4.2	2.5	0.6	31.1	27.3	167.8
HERODE	109.4	4.6	2.5	0.7	31.4	27.2	186.1

Tableau 3. Concentration moyenne des différents ions (en mg/l)

Sources	Nitrates exportés (kg/ha/an)		
	1981-82	1982-83	1983-84
<u>Garde de Dieu</u>			
- Grande	560	510	250
- Petite	180	770	530
<u>Hérode</u>	460	500	280
<u>Alaincourt</u>			
- face	220	400	180
- profil	250	490	240
<u>Juville</u>			
- captage	-	420	140
- sud	-	330	100

Tableau 3. Résultats des apports en nitrates

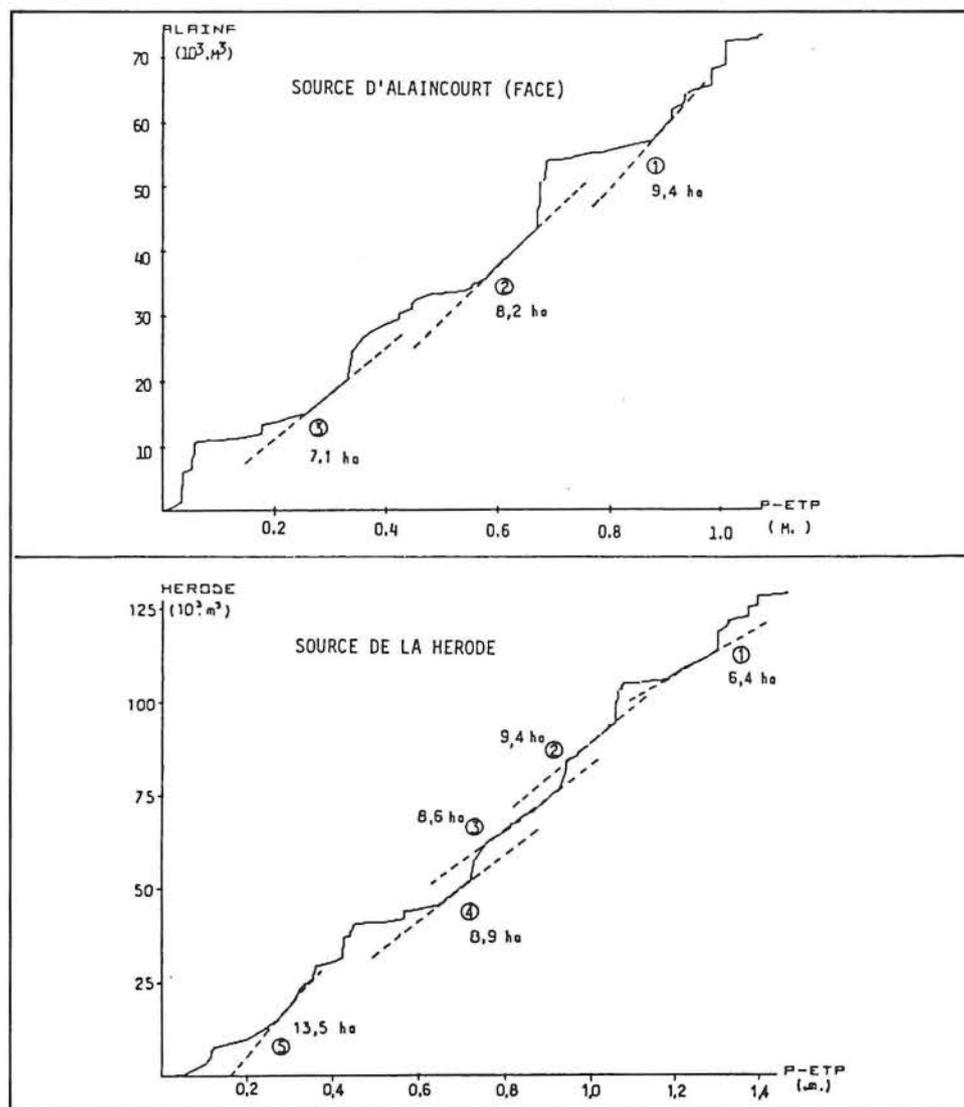


Fig. 6. Double cumuls des débits moyens et de (P - ETP) décennales

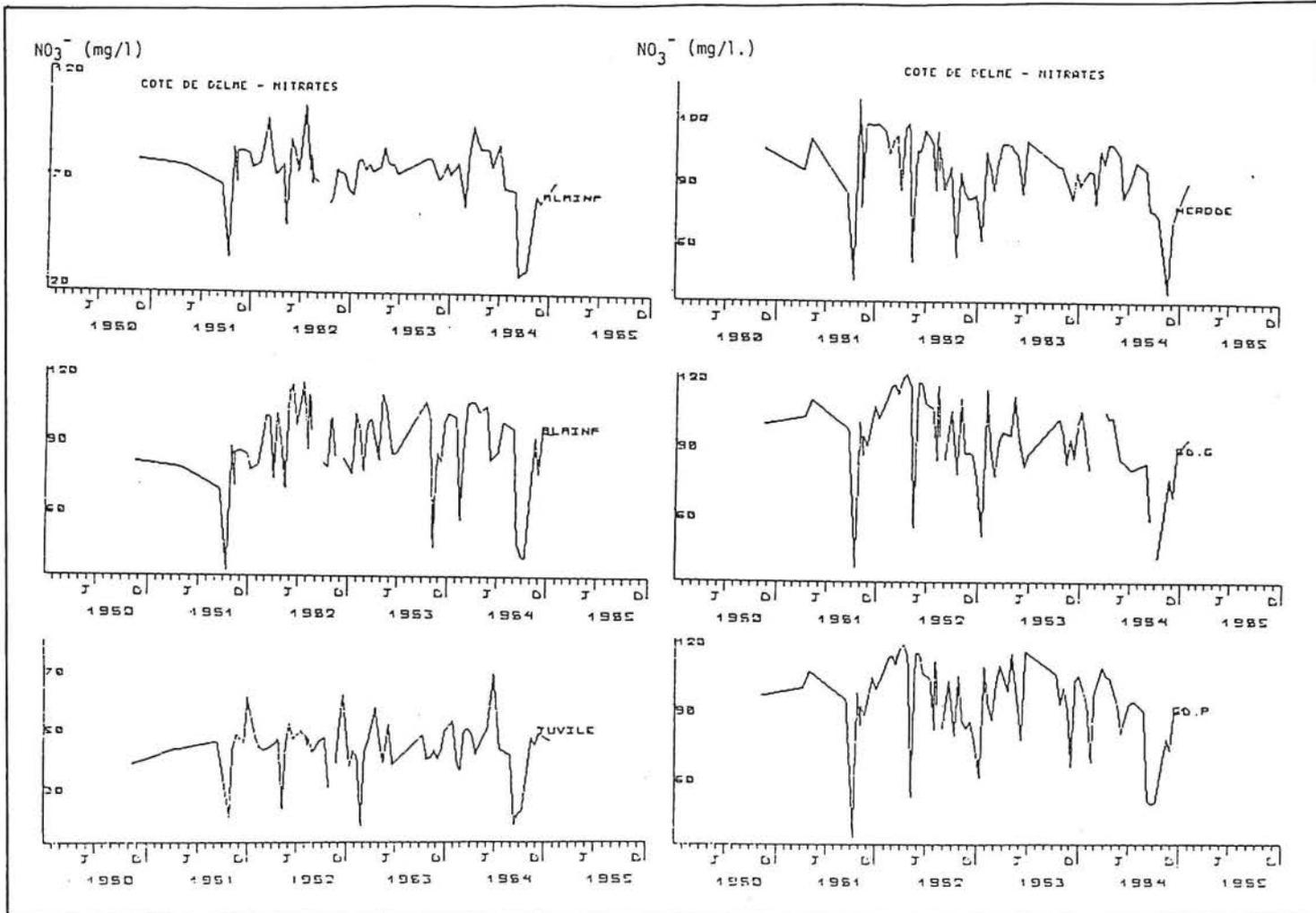


Fig. 7. Evolution des concentrations en nitrates des eaux

La concentration moyenne des différents ions (en mg/l) varie toutefois d'une source à l'autre. (Voir tableau 3).

Les teneurs moyennes en calcium, bicarbonates et sulfates de l'eau des sources d'Alaincourt, inférieures à celles de l'eau des sources de la Garde de Dieu et de la Hérode, pourraient s'expliquer par des apports en eau moins chargée en provenance des éboulis, ce qui confirmerait les hypothèses émises quant à leur fonctionnement.

Un problème important concerne les teneurs en nitrates des sources d'Alaincourt et de Liocourt qui dépassent largement la norme européenne de 50 mg/l.

Des calculs statistiques montrent que les nitrates se corrélaient avec les chlorures sur les sources les plus atteintes par une augmentation des concentrations en produits azotés, vraisemblablement à cause de leur origine (apports sous forme d'engrais par l'agriculture).

IV.2. Apports en nitrates

On a pu estimer la quantité de nitrates exportée sur les bassins de chaque source grâce à la connaissance des concentrations, des débits et de la surface des aires d'alimentation sur trois cycles hydrologiques complets du mois d'octobre 1981 au mois de septembre 1984 (cf. tableau).

On notera que l'exportation des nitrates a été considérablement réduite par la période 1981-1984. Les valeurs calculées en 1983-84, comparées aux plus fortes valeurs calculées lors des années antérieures ne sont plus respectivement que de 30% pour Juville, 47%

pour Alaincourt-la-Côte et 56% pour Liocourt. Peut-être faut-il voir là les premiers effets d'une modification des pratiques culturales, et notamment l'abandon de l'épandage de lisier de poules, ainsi qu'une meilleure répartition des fumures. Mais il est sans doute encore trop tôt pour en ressentir les effets sur les concentrations en nitrates des eaux des différentes sources (fig. 7).

V. CONCLUSIONS

La structure de la côte de Delme, simple dans son ensemble, est beaucoup plus complexe dans le détail.

L'existence d'une faille, insoupçonnée jusqu'ici, est une quasi certitude. De direction approximative est-ouest, elle couperait la côte au niveau de la ferme de la Garde de Dieu, délimitant un compartiment nord où les couches géologiques ont un pendage vers le nord-ouest, et un compartiment sud où le pendage est ouest-sud-ouest. Cette structure semblerait jouer un rôle de première grandeur sur le degré d'occurrence des sources.

Quant à l'aquifère, il est constitué par des calcaires sableux et des grès du Bajocien inférieur possédant une double porosité : une porosité de fissure démontrée par diagraphies instantanées et une porosité d'interstice.

Cette double porosité serait à l'origine d'une double droite de tarissement observée sur les sources de déversement et permettrait d'expliquer les anomalies constatées par la méthode des boucles d'hystérésis.

Les éboulis de pente donnent également naissance à des sources, dont le débit serait alors régularisé.

En ce qui concerne la qualité des eaux, on a pu mettre en évidence une diminution de

l'exportation annuelle en nitrates par hectare due probablement à la cessation de l'épandage de lisier et à un épandage plus rationnel des engrais.

Cette influence ne s'est pas encore manifestée sur les concentrations en nitrates de l'eau des sources, car il se peut que l'accumulation d'eau très chargée dans les interstices de la matrice gréseuse soit très difficile à lessiver. Néanmoins, si la tendance actuelle se poursuit, la situation devrait s'améliorer.

Claude GRIOLET
Michel HALLER

BIBLIOGRAPHIE

GARCZYNSKI (F.) - 1984 - Altération du régime hydrologique par des dommages, forestiers ou autres, à identifier. Rapport inédit, Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts. Groupement de Grenoble.

GOUGOUSSIS (E.) et (C.) - 1979 - Etude hydrodynamique de l'exhaure de la mine de Maron. D.E.A., E.N.S.G., Nancy, 80 pages.

GRIOLET (C.) - 1984 - Côte de Delme. Campagne de dix forages de reconnaissance, 10 novembre-8 décembre 1983. Compte rendu d'exécution des travaux. Rapport SRAEL-DES-1984-234, 51 pages.

GRIOLET (C.) et HALLER (M.) - 1984 - Ressources en eau de la Côte de Delme. Compte rendu des études menées par le S.R.A.E.L. Mars 1984. Rapport SRAEL-DES-1984-223, 40 pages.

MANGIN (A.) - 1970 - Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décharge et de tarissement. *Annales de Spéléologie*, tome 25, fasc. 3, p. 581-610.

MANGIN (A.) - 1982 - Détermination du comportement hydrodynamique des aquifères karstiques à partir de l'étude des informations fournies par leurs exutoires. *Mém. du B.R.G.M.* n° 45 (les milieux discontinus en hydrogéologie), 16-17 novembre 1982, p. 397-403.

LE REGIME DES TRANSPORTS SOLIDES ET DISSOUS DANS LE KARST COUVERT DE LA DALLE D'ETAIN (Interfluve Loison-Othain, Lorraine septentrionale)

J. CORBONNOIS
P. GAMEZ
M. SARY

Centre d'études géographiques de l'université de Metz

L'étude du karst couvert de la Dalle d'Etain, entreprise par le C.E.G.U.M. depuis 1975, a déjà fait l'objet de plusieurs publications (cf. bibliographie). L'exposé replace d'abord rapidement le karst dans son contexte morpho-structural (interfluve Loison-Othain) et fait un bilan des résultats antérieurs acquis sur le bassin de la Damusse. Mais l'étude proprement dite porte sur l'analyse du régime des transports solides et dissous en liaison avec les régimes hydrologique pluviométrique. Elle est menée à partir des données partielles septembre 1984-mai 1985) obtenues sur deux stations (Damusse et Cuve) équipées d'un limnigraphe et d'un préleveur automatique (celui-ci fonctionnant à pas de temps fixe).

L'INTERFLUVE LOISON-OTHAIN ET SES RESULTATS ANTERIEURS

La morphogenèse et la karstogenèse de l'interfluve sont liées à l'activité prépondérante des écoulements d'eaux qui exploitent les particularités géologiques de la Woëvre septentrionale. L'érosion, appréhendée de manière qualitative (cartographie des formes et des circuits hydriques) a fait l'objet d'un premier essai de quantification à l'aide de mesures, hebdomadaires ou épisodiques, effectuées dans le bassin-versant de la Damusse.

Le cadre physique de l'interfluve Loison-Othain (cf. croquis 1)

L'interfluve Loison-Othain est caractérisé par le contraste lithologique entre les argiles de la Woëvre (Callovien) et les calcaires de la Dalle d'Etain (Bathonien supérieur) sur lesquels elles reposent :

- les collines argileuses sont armées de petits bancs calcaro-gréseux qui confèrent une certaine vigueur au relief. Ses versants constituent le domaine privilégié des processus de solifluxion, surtout dans les ronds-points formes originales en amphithéâtre); la Dalle d'Etain, du côté Loison, apparaît dans des dépressions alvéolaires (Delut-Dombras) où elle est entaillée par des vallons à écoulement temporaire;
- au pied des collines argileuses, la dalle est recouverte par des colluvions argilo- limoneuses. C'est là que se situe la majorité des pertes karstiques.

Les affluents du Loison et de l'Othain, entaillant l'interfluve, sont, le plus souvent, adaptés à un réseau de fractures de direction hercynienne (NE-SO). Ce même réseau joue également un rôle important dans l'écoulement des nappes. De ce contexte hydro-structural résultent des émergences de nappe libre là où les calcaires affleurent (ex : Delut ou Dimbley) et des émergences de nappe captive là où les calcaires disparaissent sous la

Type d'écoulement		Ruissellement sur vallons cultivés	Ruissellement sous forêt et sur pâturages	Nappe karstique	Exutoire du bassin versant	Trop-plein karstique de crue
HYDROLOGIE	part de l'écoulement total (‰)	28	36	36	100	8
	Activité moyenne annuelle (en jours)	40	171	365	365	10
	débit moyen par jour de fonctionnement (m ³ /s)	0,417	0,128	0,058	0,164	0,468
	Surface d'alimentation concernée (km ²)	2,5	3,5	11,5	11,5	3,5
TRANSPORTS SOLIDES	turbidité moyenne (mg/l)	181	63	0	44	394
	nombre de mesures	10	25	0	102	10
	Tonnage annuel exporté	262	120	0	228	159
	Dégradation spécifique (t/km ² /jour)	6,5	0,7	0	0,6	15,9
	Dégradation spécifique (t/km ² /an)	104	34	0	19	45
EROSION CHIMIQUE	TH moyen (mg/l)	39	56	145	123	58
	Nombre de mesures	10	25	34	96	10
	Tonnage annuel exporté	56	106	267	636	23
	Dégradation spécifique (t/km ² /jour)	1,4	0,6	0,7	1,7	2,3
	Dégradation spécifique (t/km ² /an)	22,4	30	23	55	6,5
	Dégradation spécifique (mm/1000 ans)	8,8	12,1	17,8	22,1	2,6

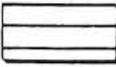
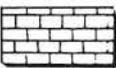
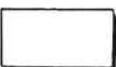
Tableau 1. Valeurs de l'écoulement et de l'érosion

couverture argileuse (ex : Mircoussin ou Cuve). Le ruissellement de surface, capté par les ouvertures karstiques, de part et d'autre

des collines argileuses, se surimpose à la nappe bathonienne et s'écoule préférentiellement vers le bassin du Loison.



LEGENDE

- | | | | | | |
|---|--|---|----------------------------------|---|-----------------------|
|  | Argiles du Callovien
(collines) |  | Rondvaux à solifluxion |  | Faille principale |
|  | Calcaires du Bathonien
(glacis de revers) |  | Principales pertes
karstiques |  | Pendage secondaire |
|  | Marnes du Bathonien
(vallée de l'Othain) |  | Emergence de nappe captive : |  | Stations de mesures : |
|  | Oolithe du Bajocien
(Vallée de l'Othain) | Ea1 Mircoussin | | 1 Damusse (hydrologie) | |
|  | Alluvions et
colluvions | Ea2 Cuve | | 2 Cuve (hydrologie) | |
| | | Ea3 Font. de fer | | 3 Delut (climatologie
et piézomètre) | |
| | |  | Emergence de nappe libre : | | |
| | | Sp1 Crédon | | | |
| | | Sb1 Damusse | | | |
| | | Sb2 Dimbley | | | |
| | |  | Ecoulement pérenne | | |

Croquis 1. L'interfluve Loison-Othain

2. Bilan des résultats antérieurs dans le bassin de la Damusse

Le Centre d'Etudes Géographiques de l'Université de Metz (CEGUM) a équipé depuis 1978 le bassin versant de la Damusse (ou ruisseau du Moulin). L'analyse des processus hydro-morphologiques, complétée par des mesures in situ, a permis une première approche quantitative de l'érosion des sols et de l'érosion chimique « assistées » par le karst.

Les résultats généraux obtenus (tableau 1) ne sont qu'une première approche du problème :

— **la turbidité.** Avec une mobilisation moyenne de 262 t correspondant à une dégradation de 104 t/km²/an, c'est le ruissellement sur les vallons cultivés de la dépression qui apparaît l'agent le plus efficace de la dégradation des sols : vient ensuite le trop-plein karstique de crue (159 t exportées, dégradation physique de 45 t/km²/an).

Rapportés au nombre de jours de fonctionnement, ces chiffres permettent de mesurer le degré d'agressivité des différents éléments du système hydrologique. On trouve en tête les circulations de type karstique (15,9 t/jour), puis le ruissellement sur vallon (6,5 t/jour) et enfin le ruissellement sous forêt et sur prairie (0,7 t/jour);

— **l'érosion chimique.** Elle est discontinue dans le temps et dans l'espace. Avec une exportation moyenne annuelle en carbonates (TH) de 267 t, c'est la nappe fissurée du calcaire bathonien qui apparaît comme l'agent le plus efficace de l'érosion chimique, devant le ruissellement sous forêt et sur pâturage (106 t), le ruissellement sur parcelles cultivées (56 t) et les écoulements karstiques de crue (23 t).

Par contre, ce sont les trop-pleins karstiques de crue qui se montrent les plus agressifs (2,3 t/jour) devant le ruissellement sur parcelles cultivées (1,4 t/jour), la nappe ne fournissant que 0,7 t/jour et le ruissellement aux pertes 0,6 t/jour.

Il en résulte que la corrosion, principalement d'origine karstique, est l'élément morphogénétique le plus actif actuellement dans le bassin de la Damusse : elle exporte uniquement en carbonates 636 t annuelles, contre seulement 228 t pour l'érosion des sols. Ce qui représente une ablation de 22 mm/millénaire, chiffre certes isolé, mais comparable aux données de G. Fabre pour le Languedoc oriental.

II. L'ÉROSION AU COURS DE LA PÉRIODE HIVERNALE 84-85

Afin d'affiner les résultats obtenus sur le bassin de la Damusse, des mesures en continu ont été effectuées, à la fois sur la Damusse et sur la Cuve (cf. localisation sur le croquis n° 1), où une nouvelle station, équipant une émergence karstique, au pied des collines argileuses, a été installée en septembre 1984. Ce bassin-versant situé 3,5 km au sud-est du précédent, s'en distingue par une surface plus petite (4,5 km²) entièrement boisée, à écoulement aérien intégralement capté par les ouvertures karstiques.

1. Les mesures

Les stations de mesures comportent chacune, en plus de l'appareillage hydrométrique un préleveur automatique d'eau. Celui-ci fournit trois échantillons moyens journaliers de 8 heures (chaque échantillon est constitué de 4 prises d'eau bihoraires). Dans certains cas, les échantillons contiennent des eaux d'origines différentes (nappe, ruissellement...), masquant alors la complexité des réactions hydro-physico-chimiques à pas de temps faible (ex : montée de crue en moins de 8 heures).

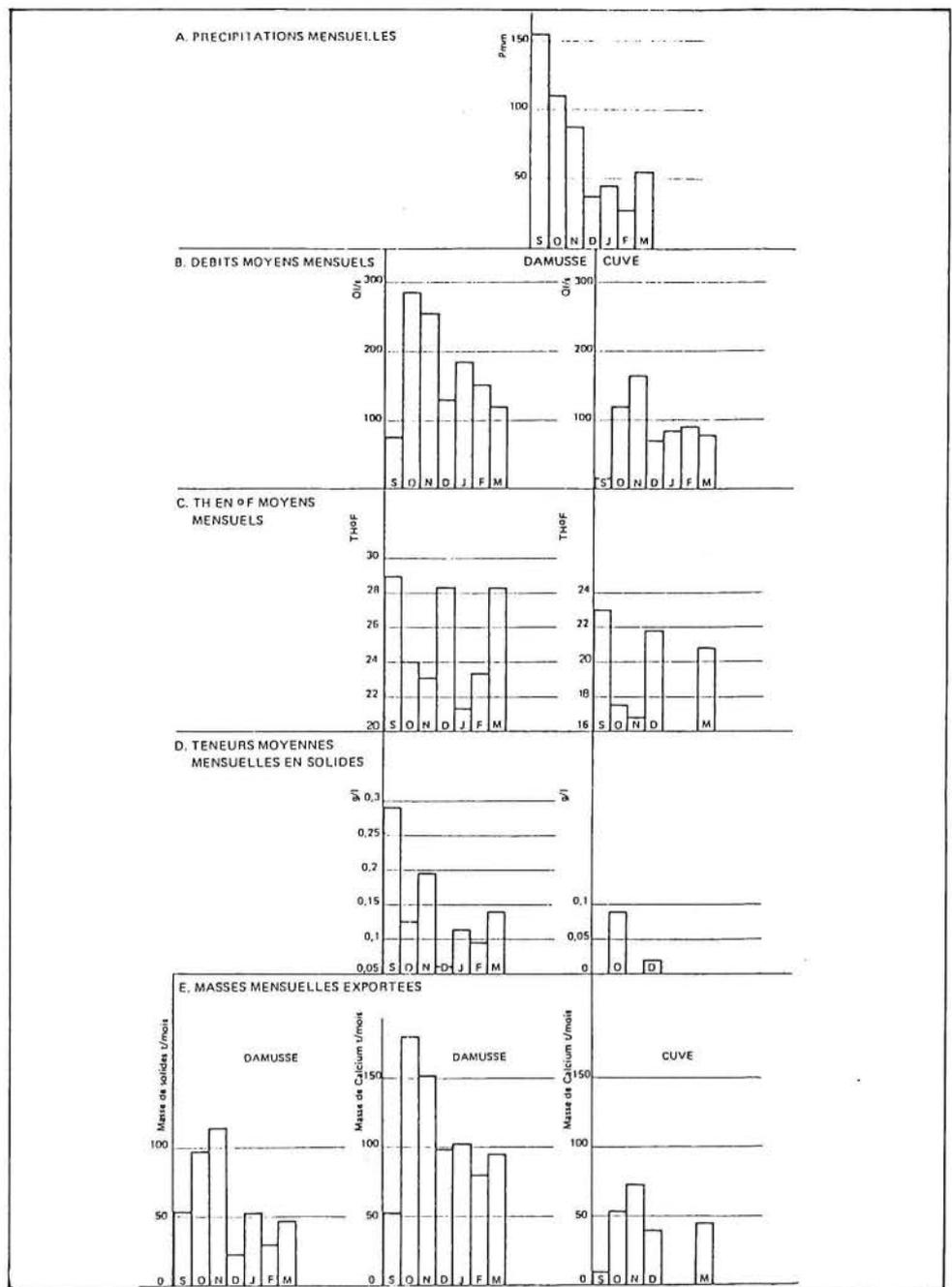


Figure 1

Sur ces échantillons, ont été mesurées en laboratoire :

— la charge en ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺. Les dosages ont été faits par complexométrie. Les résultats ont été exprimés en équivalent CaCO₃ mg/l;

— la charge en matière solide en suspension, par filtration des échantillons d'eau, exprimée en mg/l.

Ces résultats d'analyses seront corrélés avec les débits en vue d'une approche du régime des transports solides et dissous aux deux stations de mesures.

2. Présentation des résultats à l'échelle mensuelle

Cette présentation permet de caractériser globalement la période hivernale 84-85, au cours de laquelle les mesures ont été faites.

Les résultats moyens mensuels ont été représentés sur la figure n° 1. Ils montrent que l'érosion est plus faible à l'émergence de la Cuve (transit lent des eaux de pluie à travers la masse calcaire faiblement fissurée) que dans le bassin de la Damusse (bonne karstification de la zone d'infiltration assurant un transit rapide des eaux vers les collecteurs karstiques) où les eaux d'un ruisselle-

ment plus actif, se mélangent aux eaux de la nappe calcaire (entraînant une plus forte variation des teneurs en matières dissoutes). Ce ruissellement entraîne également les solides vers les conduits karstiques ainsi que vers les entailles de surface.

Mais ces différences de comportement peuvent être mieux mises en évidence par l'analyse des données journalières et des résultats pour 8 heures.

3. Valeurs journalières et horaires (8 heures)

Seuls les débits feront l'objet d'une présentation à l'échelle journalière. Les résultats concernant les valeurs de l'érosion seront analysés à l'échelle de 8 heures.

a) **Les débits.** La succession journalière des débits (fig. 2) montre que la période d'observation comprend une série de crues en relation avec les épisodes pluvieux.

On observe de septembre à décembre une alternance de périodes de hautes eaux d'une durée de 8 à 10 jours comprenant les plus instables (montée et descente de crues) et de périodes de basses eaux à débit peu variable (durée de 7 à 20 jours selon celle des épisodes sans pluie).

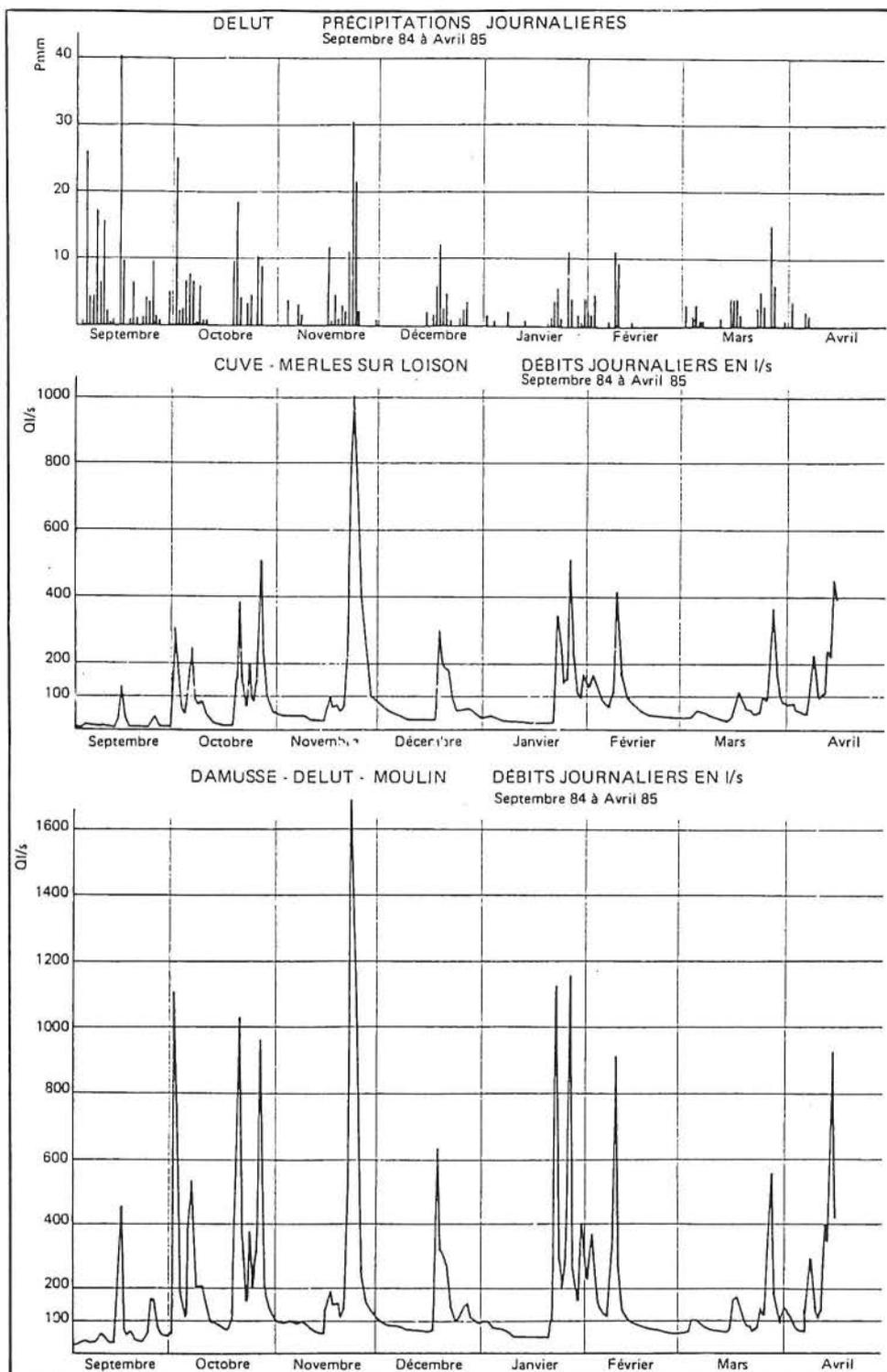


Figure 2

	Dates	Durée Jours	P mm	Débit moy. journalier l/s		Charges exportées tonnes		Dégradation spécifique tonnes/km ²	
				Damusse	Cuve	Damusse	Cuve	Damusse	Cuve
Crues	1 au 10/10	10	56,6	350	131	71,7	20,0	6,5	4,4
	18 au 31/10	14	61,0	308	164	95,5	34,2	8,2	7,5
Périodes stables	17 au 24/12	8	26,2	247	140	40,2	16,8	3,6	3,7
	8 au 14/11	7	0,2	70,4	15,7	15,9	5,4	1,4	1,3

Tableau 2. Valeurs de l'érosion chimique pour quelques périodes caractéristiques

A la fin de l'hiver, du fait de précipitations moins intenses et plus étalées dans le temps, les débits se caractérisent par des variations incessantes aux deux stations (succession de petites crues).

Ce sont ces fluctuations qui commandent les modalités de l'érosion. Les exportations de solides et d'éléments dissous sont liées :
 — aux volumes d'eau écoulés,
 — à l'amplitude des variations de débits,
 — aux durées des épisodes pluvieux qui déterminent ces variations.

b) Les matières dissoutes (CaCO₃). Nous étudions ici les teneurs moyennes pour 8 heures (obtenues par les analyses de laboratoire). Les variations au cours de la période d'observation sont comparées à celles des débits (débit moyen pour 8 heures).

Ces données ont été visualisées sur les fig. 3 et 4. On peut différencier grossièrement deux types de situations, correspondant respectivement à des périodes de débits variables (au moment des crues) et des périodes de débits faiblement contrastés.

- Sur la Damusse, les teneurs en éléments dissous les plus fortes plafonnent à 350 mg/l lorsque les débits sont faibles et varient peu pendant quelques jours (50 à 100 l/s). Ces teneurs sont légèrement plus élevées en septembre lorsque le débit est inférieur à 50 l/s. Au moment des crues, on note une diminution rapide (24 à 32 heures) des teneurs jusqu'à des valeurs minimales de 170 à 130 mg/l, selon l'importance des crues. Leur réaugmentation, au moment des décrues jusqu'à leur stabilisation, s'étale sur 9 jours (224 heures). Ces séquences se reproduisent à chacune des crues observées, sauf en mars où les teneurs sont moins variables et ne s'abaissent jamais en dessous de 200 mg/l (du fait de la succession de petites crues ou peut-être d'un effet saisonnier ?).

- Sur la Cuve, on note les mêmes types de variations que sur la Damusse, mais les teneurs n'atteignent que 300 mg/l lorsque les eaux sont basses (Q stabilisé). Au moment des crues elles s'abaissent jusqu'à 100 mg/l en 24 heures. A la décrue, la réaugmentation des teneurs jusqu'à stabilisation s'étale sur 300 heures.

On constate donc pour l'ensemble de la période d'observation que les teneurs en éléments dissous se caractérisent par des variations cycliques plus ou moins achevées, commandées par la fluctuation des débits et la structure des pluies (concentrées ou étalées dans le temps).

L'écoulement des eaux de ruissellement, qui diluent les eaux de nappe est commandée par la karstification plus développée dans le bassin de la Damusse que dans celui de la Cuve.

Le tableau 2 donne pour quelques périodes actives les valeurs de l'érosion chimique. En période de basses eaux, celle-ci devient insignifiante.

c) Les matières en suspension. Comme pour les matières dissoutes, ce sont les teneurs moyennes pour 8 heures qui seront analysées ici et comparées aux débits.

Les figures 3 et 4 montrent que leurs variations sont grossièrement parallèles à celles des débits, avec cependant, à certaines périodes, des déphasages importants.

- Sur la Damusse, la quantité de matière en suspension varie entre 4 mg/l et 1 g/l. Les valeurs les plus élevées correspondent aux crues. Au moment des décrues, les teneurs diminuent rapidement (en 24 heures). En périodes stables (faibles variations de débits) elles oscillent entre 4 et 100 mg/l. Ceci témoigne de leur plus grande sensibilité aux petites fluctuations de débits, mais également des apports de berges (phénomènes de décompression des matériaux accompagnant les décrues et qui provoquent des apports de solides étalés dans le temps).

De plus, à la différence de ce qu'on a observé pour les éléments dissous, on note une certaine variation saisonnière des exportations de solides :

- au début de l'automne, c'est lors de la première crue (14 au 16 septembre) que les teneurs en solides ont été les plus fortes (jusqu'à 1 g/l), ce qui correspond au déblaiement, dans les conduits karstiques (en sur-

7A TENEUR MOYENNE EN SOLIDES POUR 8 HEURES

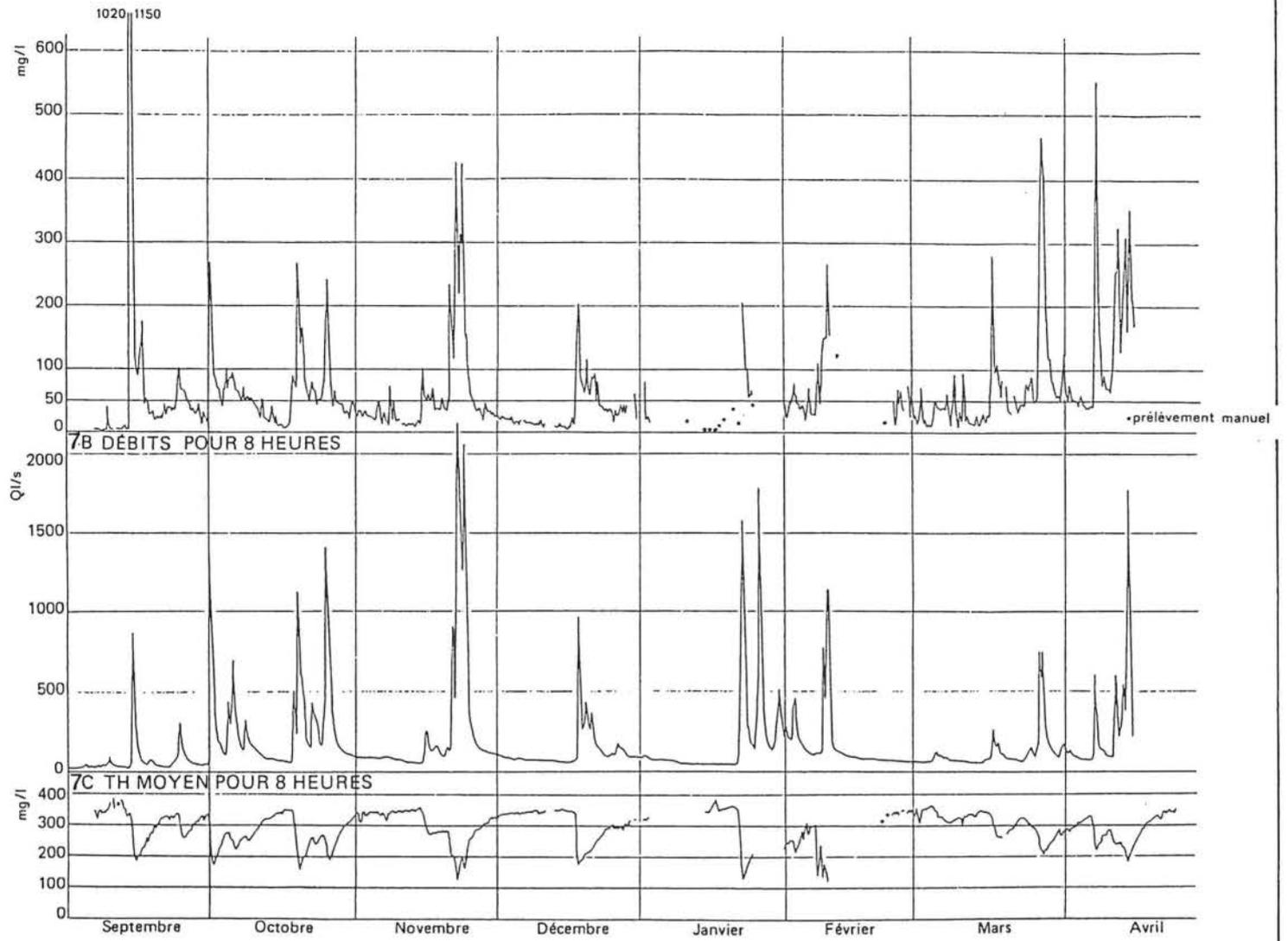


Fig. 3 Damusse

8A TENEUR MOYENNE EN SOLIDES POUR 8 HEURES

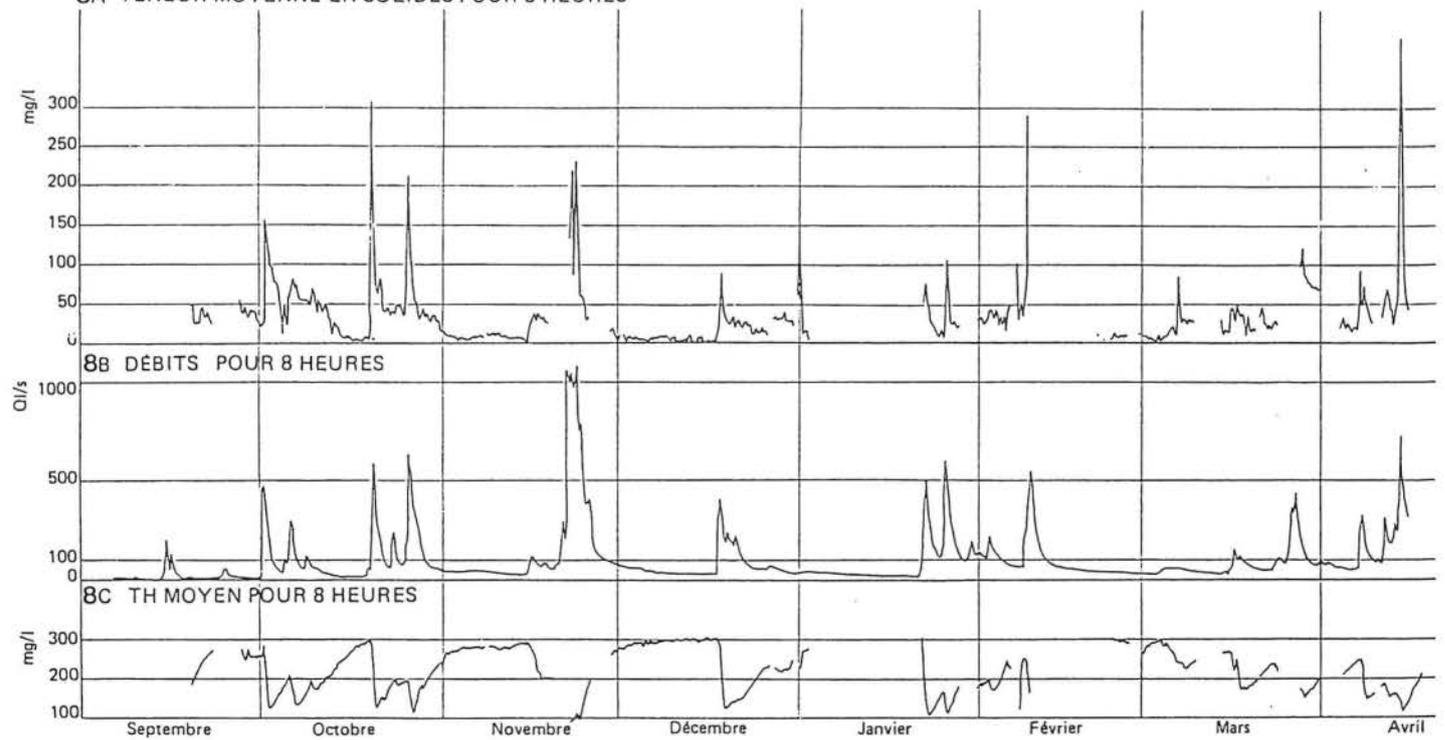


Fig. 4. Cuve

Dates	Durée jours	P mm	Débit moy. journalier l/s		Charges exportées tonnes		Dégradation spécifique tonnes/km ²	
			Damusse	Cuve	Damusse	Cuve	Damusse	Cuve
14 au 16/9	3	49,7	263,2	66,5	52,2	-	4,5	-
Crues 1 au 10/10	10	56,6	350	131	37,7	10,0	3,4	2,2
Période stable 1 au 11/12	11	0,6	82,4	47,6	0,13	0,024	0,011	0,005

Tableau 3. Exportations de solides pour quelques périodes caractéristiques

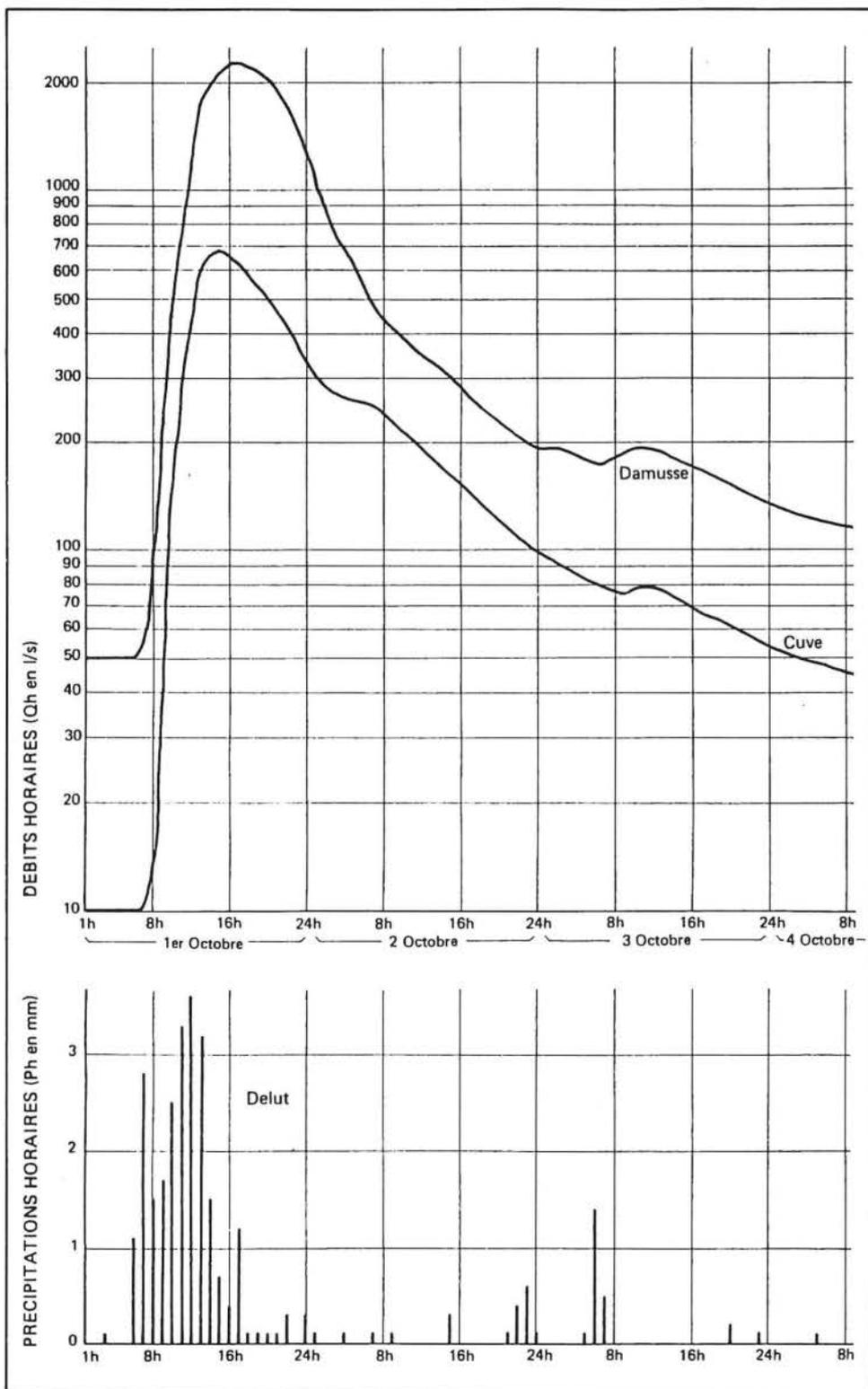


Fig. 5. Crue du 1 au 4 octobre 1984

face, la végétation encore abondante contribue à ralentir l'érosion) des matériaux antérieurement accumulés (fin de l'hiver précédent et été). Il s'agit donc d'apports surtout souterrains (phase de nettoyage);

— au cours de l'automne et de l'hiver, on observe une meilleure corrélation entre les teneurs en solides et les débits, avec équilibre des apports et des exportations. Mais la discontinuité des observations en janvier et février ne permet pas de discerner l'influence des périodes de gel et dégel;

— à la fin de l'hiver et au début du printemps, les teneurs en solides sont plus élevées qu'à l'automne, à la fois pour les périodes de crues (crues moins fortes qu'en octobre et novembre, mais teneurs plus élevées) et pour les périodes stables (ex : période du 23 février au 15 mars). Elles témoignent d'une érosion active, avec déblaiement des matériaux entraînés par la solifluxion hivernale vers les gouffres, et par le ruissellement sur les parcelles labourées (érosion des matériaux disloqués par le gel intense de janvier et début février). Les teneurs élevées sont donc liées aux apports ayant transité par les conduits karstiques, et aux apports directs de surface (ruissellement et effondrement de berges);

— sur la Cuve, les teneurs de matières en suspension varient entre 0 et 390 mg/l. Elles fluctuent à peu près comme sur la Damusse, avec cependant une meilleure relation avec les débits (apports essentiellement souterrains, liés aux caractéristiques du bassin versant). Mais comme les observations renferment de nombreuses lacunes, les variations saisonnières ne peuvent être mises en évidence ici.

Ainsi les fluctuations des matières en suspension font apparaître un système évolutif des exportations au cours de la période hivernale. L'érosion reste la plus active au moment des crues (cf. tableau 3), mais son intensité est modulée par les composantes saisonnières du milieu naturel, à savoir la température (périodes de gel) et l'état du couvert végétal (sol couvert ou nu).

Ces premiers résultats, obtenus pour une période hivernale, montrent que l'érosion, commandée par le régime des écoulements se caractérise par des rythmes différents selon qu'il s'agit des éléments dissous (variations cycliques des teneurs), ou des éléments solides (régime plus saisonnier). Mais ces rythmes s'estompent lorsqu'on considère les masses d'éléments exportés. Ces masses évoluent avec le débit, sans que les corrélations soient toujours bonnes. Elles sont différentes à la montée et à la descente de crue comme le montre l'étude du régime de crue.

III. LE RÉGIME DE CRUE

La période hivernale 1984-85 présente des crues de forte amplitude correspondant à des précipitations concentrées sur une dizaine d'heures. Il en résulte des hydrogrammes généralement bien développés. La présentation d'une crue (du 1 au 4.10.84) est une première approche de l'analyse du régime des transports solides et dissous. Pour cette crue, les périodes de prélèvement (8 heures) correspondent à des phases hydrologiques (montée et descente de crue).

1. Caractéristiques hydro-climatologiques (fig. 5)

La crue, étalée sur 4 jours, est liée à une séquence pluvieuse d'intensité moyenne (2 mm/h) mais d'une assez longue durée (12 h). Le temps de réponse aux stations hydrométriques de la Damusse (BV : 11,5 km²) et de la Cuve (BV : 4,5 km²) est similaire : le début de la montée de la crue se produit une heure après le début de l'averse. Par contre la pointe de crue est nettement décalée par rapport à la

2. Phases de l'écoulement et teneurs en éléments solides et dissous (fig. 6)

Pour une meilleure comparaison des phases hydrologiques des deux bassins, les débits horaires ont été transformés en coefficients horaires de débits en utilisant le débit moyen de la crue (526 l/s pour la Damusse et 180 l/s pour la Cuve). Il faut noter également que la séparation des différentes phases ne peut être qu'imprécise du fait des prélèvements en semi-continu (toutes les 2 h) effectués par période de 8 h. On peut toutefois déterminer les 4 phases suivantes :

1^{re} phase : elle correspond à la montée de la crue avec augmentation de la crue de la teneur en éléments solides (Ts) et diminution de la teneur en éléments dissous (Td) pour la Damusse. Par contre, pour la Cuve, la Ts augmente légèrement ainsi que la Td. Pour la Cuve, la montée de crue correspond donc à une poussée des eaux de nappe, alors que dans le cas de la Damusse un mélange des eaux de ruissellement et de nappe est déjà réalisé, ce qui confirme l'existence d'un réseau karstique plus ouvert et plus dense.

2^e phase : c'est la première période de la descente de la crue, qui se caractérise essentiellement par l'arrivée des eaux de ruissellement aux exutoires, comme en témoigne la forte augmentation de la Ts corrélative d'une diminution rapide de la Td.

3^e phase : cette deuxième période de la descente de la crue correspond au ressuyage des eaux de ruissellement (soutenu par un petit épisode pluvieux dans la nuit du 1.10.84). La Ts diminue conjointement avec la Td, avec cependant une certaine stabilisation de celle-ci pour la Damusse caractérisant un ressuyage plus rapide des eaux de ruissellement comme le montre la courbe des Cqh où le débit moyen (Cqh 1) est atteint plus tôt que dans le cas de la Cuve.

4^e phase : légèrement modifiée par de petits épisodes pluvieux, cette phase est caractéristique du tarissement de la crue, plus accentué pour la Damusse que pour la Cuve. La Ts diminue corrélativement aux débits alors que la Td augmente graduellement. Les eaux de ruissellement sont ainsi peu à peu remplacées par celles de la nappe qui a été mise en charge lors de la séquence pluvieuse.

3. Phases de l'écoulement et dégradations spécifiques

Il ne peut donc y avoir de corrélation unique entre le débit et la masse d'éléments solides ou dissous transportés. Les corrélations (fig. 7) entre les dégradations spécifiques de ces éléments (kg/h/km²) et les rendements hydrologiques (m³/h/km²) permettent de visualiser les différentes phases. Celles-ci sont nettes pour les phases 1 et 2 avec, en phase 2, une évolution inverse des éléments solides et des éléments dissous. Pour les phases 3 et 4, la différenciation est encore nette pour les éléments dissous, elle est par contre plus floue pour les éléments solides. Il se dégage ainsi un cycle de l'érosion en crue commandé par les fluctuations, dans le même sens ou en sens contraire, des charges en éléments solides et en éléments dissous (fig. 8).

Les valeurs des dégradations spécifiques varient de manière importante d'une phase à l'autre et d'un bassin à l'autre comme le montre le tableau 4.

La dégradation tant en éléments solides qu'en éléments dissous, est donc très importante pour les deux premières phases. Elle est plus importante pour le bassin de la Damusse que pour le bassin de la Cuve en raison d'un meilleur rendement hydrologique. Ceci confirme, pour le premier bassin, une morphoge-

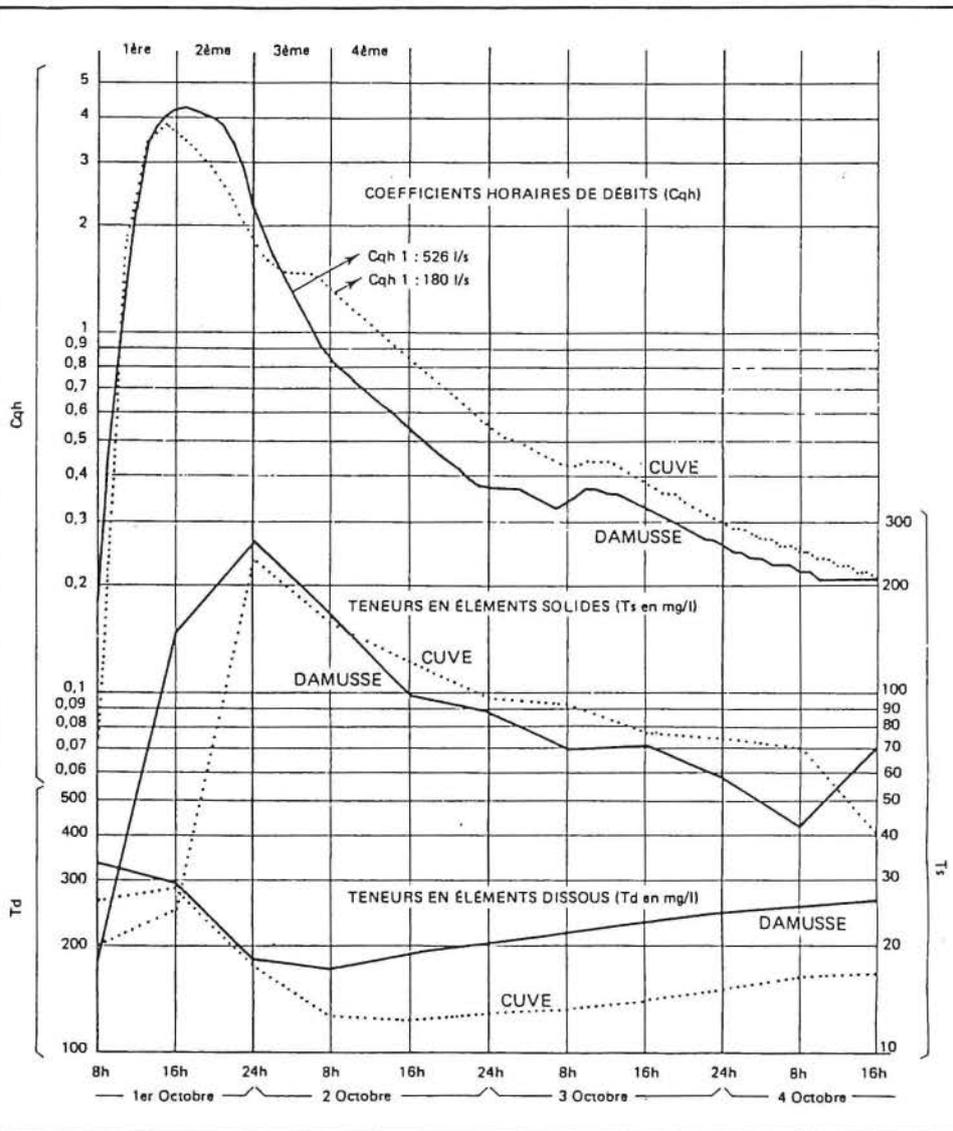


Fig. 6. Crue du 1 au 4 octobre 1984. Phases de l'écoulement et teneurs en éléments solides et dissous

pointe de l'averse : 5 h pour la Damusse et 3 h pour la Cuve. Dans le premier bassin, le débit horaire maximal (2250 l/s) est atteint après 11 h de montée, et dans le second, pour un débit plus faible (690 l/s), après 9 h de montée. Le temps de transfert, plus long pour la Damusse, est dû à la taille de son bassin, 2,5 fois plus grand que celui de la Cuve.

Le rendement hydrologique est également différent pour les deux bassins. En montée de crue, il atteint 100 l/h/km² pour celui de la Damusse et seulement 70 l/h/km² pour celui

de la Cuve. En descente de crue, il est sensiblement équivalent (35 l/h/km²) sur 69 h pour la Damusse et 35 l/h/km² sur 71 h pour la Cuve). De manière globale, sur environ 90 h de fonctionnement, la crue du premier bassin a évacué 45% des précipitations (30 mm pour la période considérée), alors que celle du deuxième bassin n'a évacué que 38% de celles-ci.

Ces valeurs témoignent d'une circulation plus rapide des eaux dans le bassin de la Damusse où la karstification est plus développée que dans le bassin de la Cuve du fait de son contexte géomorphologique.

Phases		1ère	2ème	3ème	4ème	Moyenne de la crue
Cs kg/h/km ²	Damusse	61	160	36	6	24
	Cuve	9	90	35	6	15
Cd cg/h/km ²	Damusse	125	109	37	13	32
	Cuve	100	57	26	9	22
Qs m ³ /h/km ²	Damusse	420	598	214	57	142
	Cuve	348	381	215	66	123

Tableau 4

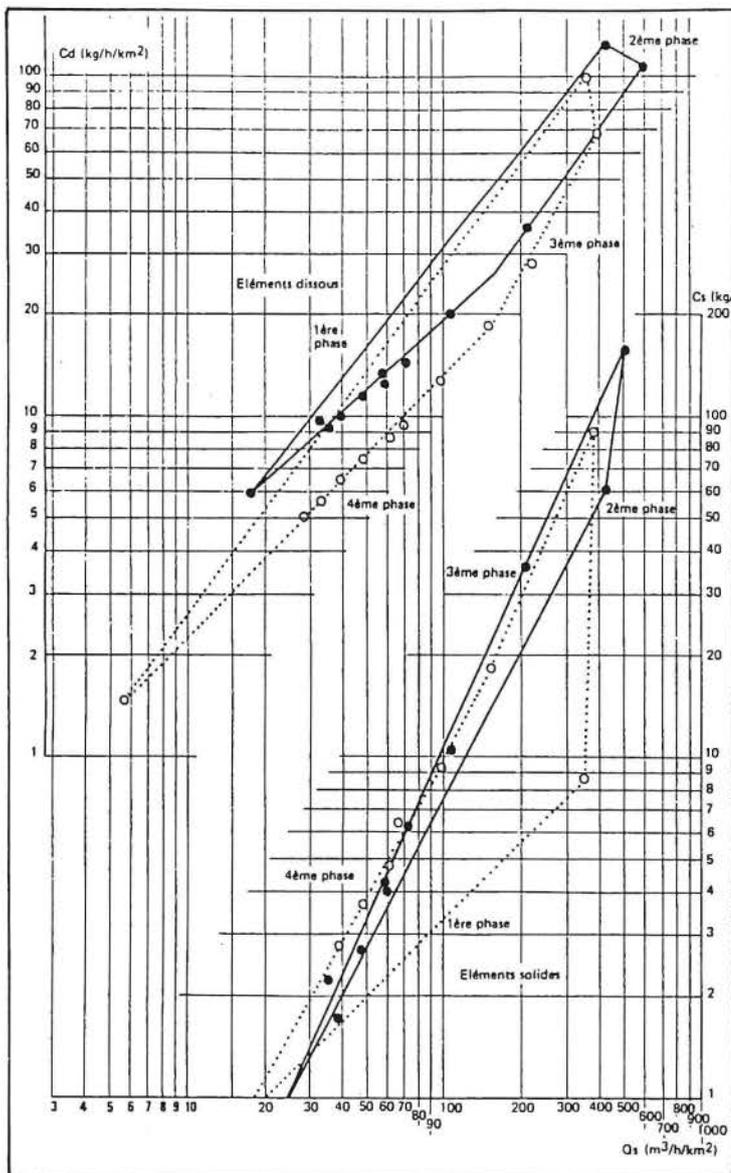


Fig. 7. Dégradations spécifiques et rendements hydrologiques. Crue du 1 au 4 octobre 1984.

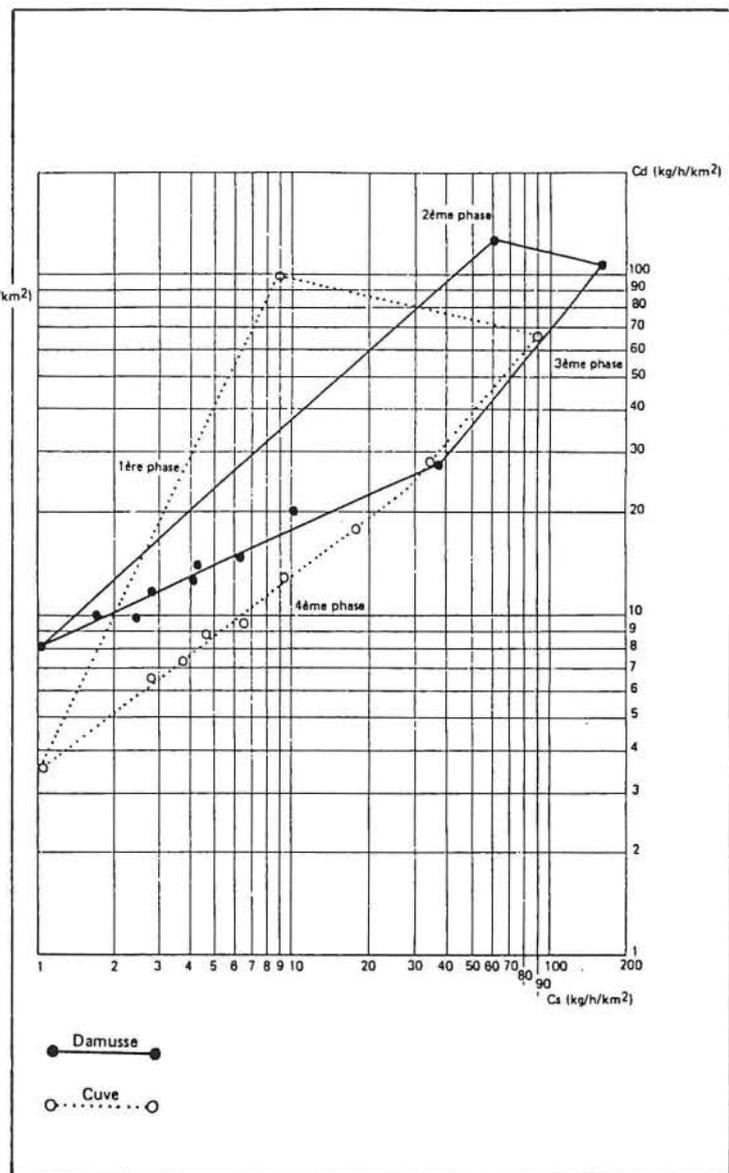


Fig. 8. Cycle des dégradations spécifiques. Crue du 1 au 4 octobre 1984.

nèse de surface plus active (érosion par ruissellement et solifluxion sur les collines argileuses) et une karstogenèse plus intense (réseau karstique dans la Dalle d'Etain plus développé favorisant une meilleure circulation de l'eau et une mise en solution plus efficace).

Delut-Meuse; l'émergence de Mircoussin (cliché P. GAMEZ)



CONCLUSION

Cette étude du régime des transports solides et dissous dans le karst couvert de la Dalle d'Etain est encore partielle. Cependant dès à présent on peut souligner deux aspects fondamentaux :

— dans le cas de karst couvert, peu pénétrable, l'étude comparative de deux bassins permet de mieux apprécier l'intensité de la karstification propre à chacun d'eux, en liaison avec le degré d'évolution de la morphogenèse de surface;

— l'utilisation d'analyses physico-chimiques apparaît comme fondamentale pour la compréhension des hydrogrammes à composantes multiples (nappe, ruissellement...). L'étude est encore imprécise du fait du rythme insuffisant des prélèvements (période de 8 h). On envisage de modifier ce rythme (prélèvements horaires) pour certaines périodes de la saison hivernale 1985-86.

J. CORBONNOIS
P. GAMEZ
M. SARY

BIBLIOGRAPHIE

COLIN (G.), GODARD (A.) - 1962 - Les dépressions fermées en Lorraine. *Revue de Géographie de l'Est*, T. II, n° 3.

GAMEZ (P.), SARY (M.) - 1978 - L'érosion et l'occupation du sol sur le revers karstique de la Dalle d'Etain. *Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen*. Strasbourg-Colmar, 20-23 septembre 1978.

GAMEZ (P.), SARY (M.) - 1979 - Morphogenèse et karstogenèse en Woëvre septentrionale. L'interfluve Loison-Othain. *Mosella*, T. OV, n° 1.

GAMEZ (P.), GRAS (F.), SARY (M.) - 1979 - Le revers de la Dalle d'Etain en Lorraine septentrionale. Un exemple de l'influence du karst sur la géodynamique externe. *Colloque franco-belge de karstologie appliquée*. Liège 24-27 mai 1979.

GAMEZ (P.) - 1982 - Les bouillons de Delut. *Bulletin des Soc. d'Hist. et d'Archéo. de la Meuse*, n° 18.

GAMEZ (P.) - 1984 - Erosion des sols et érosion chimique dans le bassin karstifié de la Damusse (Lorraine septentrionale). *Colloque franco-belge de karstologie appliquée*. Liège 31 mai-2 juin 1984.

CONTRIBUTION DES DONNEES D'HYDROLOGIE DE SURFACE A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DU BASSIN KARSTIQUE DE L'AROFFE

F. LETOUZE

Chef de la division des eaux de surface
S.R.A.E. Lorraine (Ministère de l'Agriculture)

1. INTRODUCTION

On observe sur le bassin de l'Aroffe deux parties relativement indépendantes qui sont dues essentiellement à la nature géologique du substratum. Les écoulements souterrains provenant de la partie amont du bassin superficiel sont bien connus depuis longtemps et de nombreuses études ont été consacrées à ce phénomène qui peut être caractérisé comme une capture de l'Aroffe (Bassin de la Meuse) vers le bassin de la Moselle.

Cependant, jusqu'à présent, les données d'hydrologie de surface n'ont jamais été prises en compte, pour la simple raison qu'elles sont récentes. Ces données ne sont pourtant pas dénuées d'intérêt tant sur la partie amont que sur la partie aval où l'Aroffe superficiel traverse une deuxième formation karstique : les calcaires de l'Argovo-Rauracien.

Cette note présente une première analyse des mesures enregistrées depuis 1969 et propose quelques interprétations.

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DES PAYSAGES HYDROLOGIQUES

2.1. Situation du bassin versant (fig. 1)

Le bassin versant de l'Aroffe, situé entre les vallées de la Moselle et de la Meuse, est orienté SSE-NNW entre la région Toul-Nancy et Neufchâteau.

Le cours de l'Aroffe débute à proximité des villages de Beuvezin (Meurthe-et-Moselle) et le Tramont Lassus mais en réalité il ne devient important qu'après la confluence de l'Aroffe des deux ruisseaux de Vicherey et de l'Aroffe.

Jusqu'à sa confluence avec la Meuse à Rigny La Salle (Meuse), le thalweg principal a un parcours long de 40 km environ.

La particularité de ce cours d'eau tient au fait que son trajet superficiel est profondément marqué par la nature géologique de son substratum qui imprime d'importantes variations tant dans la morphologie que dans le régime des eaux.

2.2. Contexte géologique (fig. 2)

Considéré dans son ensemble, le bassin de l'Aroffe prend naissance sur les marnes et argiles du Toarcien. Il recoupe ensuite une dernière série, celle du Bajocien Bathonien et aboutit dans ces horizons, où alternent calcaires oolithiques et calcaires à Polypiers, des pentes totales immédiatement à l'aval de Gamonville. De nombreux indices de surface : calcaires fissurés, diaclasés, très altérés, pluies gouffres, etc..., jalonnent la vallée sèche qui s'est installée jusqu'au-delà d'Autreville, soit sur 8 km.

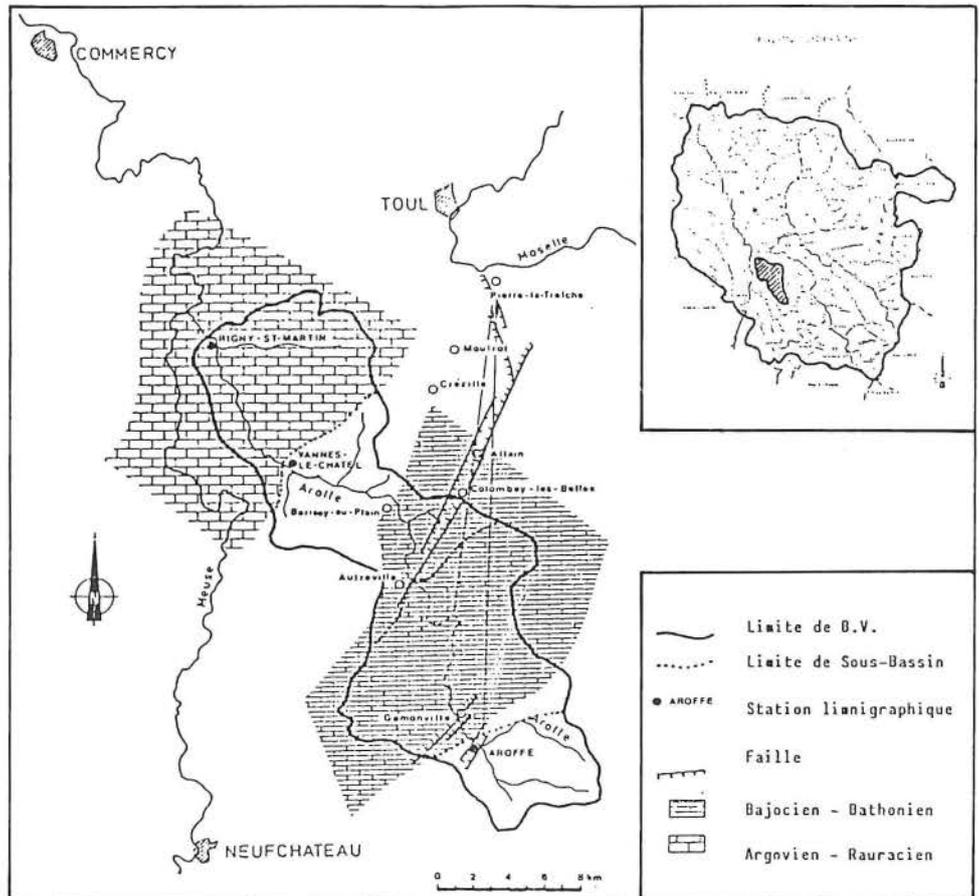


Fig. 1. Bassin versant de l'Aroffe.

Toute cette partie concerne ce qu'il est convenu d'appeler l'Aroffe supérieur.

L'écoulement superficiel ne reprend normalement que sur les terrains du Callovien-Oxfordien inférieur («Argiles de la Woèvre») au niveau de Barisey au Plain. De là s'écoule l'Aroffe dit inférieur successivement sur les terrains à chailles de l'Oxfordien et les calcaires et marnes de l'Argovien et du Rauracien (sous-étage de l'Oxfordien s.l.).

La structure géologique est simple : au faible pendage vers l'ouest traduisant l'inclinaison des couches vers le centre du bassin parisien s'ajoutent quelques accidents tectoniques dont le plus important est le fossé de Colombey-les-Belles limité par deux failles NNE-SSW qui affectent les terrains à l'affleurement jusque dans le secteur de Autreville vers le sud.

2.3. Pluviométrie

Le pluviomètre de Martigny-les-Gerbonvaux (Météorologie Nationale) peut être considéré comme représentatif du bassin étudié. Il est situé à environ 3 km au SW d'Autreville, donc de la partie médiane du bassin.

Les données synthétiques de ce poste figurent dans le tableau 1 (en mm).

Elles sont élaborées sur la période 1979-1983 dans un souci d'homogénéité avec les valeurs de débit (cf. plus loin). Elles ne traduisent pas la tendance moyenne du climat lorrain, où classiquement apparaissent deux

Tableau 1. Données synthétiques du pluviomètre de Martigny-les-Gerbonvaux

M O I S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Année
P mensuelle	81	72	89	70	93	90	52	69	70	102	76	115	979

mois station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Année
A	.95	.72	.48	.63	.52	.23	.21	.11	.14	.43	.38	1.12	.49
VLC	1.04	2.24	.97	.76	.64	.33	.15	.08	.06	.26	.32	1.28	.67
RSM	1.21	2.34	.95	1.13	.80	.47	.24	.13	.09	.24	.36	1.24	.76

Tableau 2. Moyenne 1969-1973 pour VLC et RSM
Moyenne 1979-1983 pour A

pointes pluviométriques, l'une en été, l'autre en hiver.

Elles sont le reflet d'une période plutôt humide où l'on remarque comme plus élevés les mois de décembre (conforme à la normale) mais aussi des mois habituellement charnières entre saison d'hiver et saison d'été et qui ici ont un caractère humide accusé : mai et octobre.

3. DONNÉES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES

Trois stations limnigraphiques équipent le bassin de l'Aroffe. Ce sont d'amont en aval :

— Aroffe (A), à la limite Toarcien-Aalénien donc à l'amont immédiat des pertes dans le Bajocien;

— Vannes-le-Chatel (VLC) à la limite Oxfordien inférieur-Oxfordien supérieur soit à la limite entre la plaine argileuse et la cuesta de l'Argovien-Rauracien;

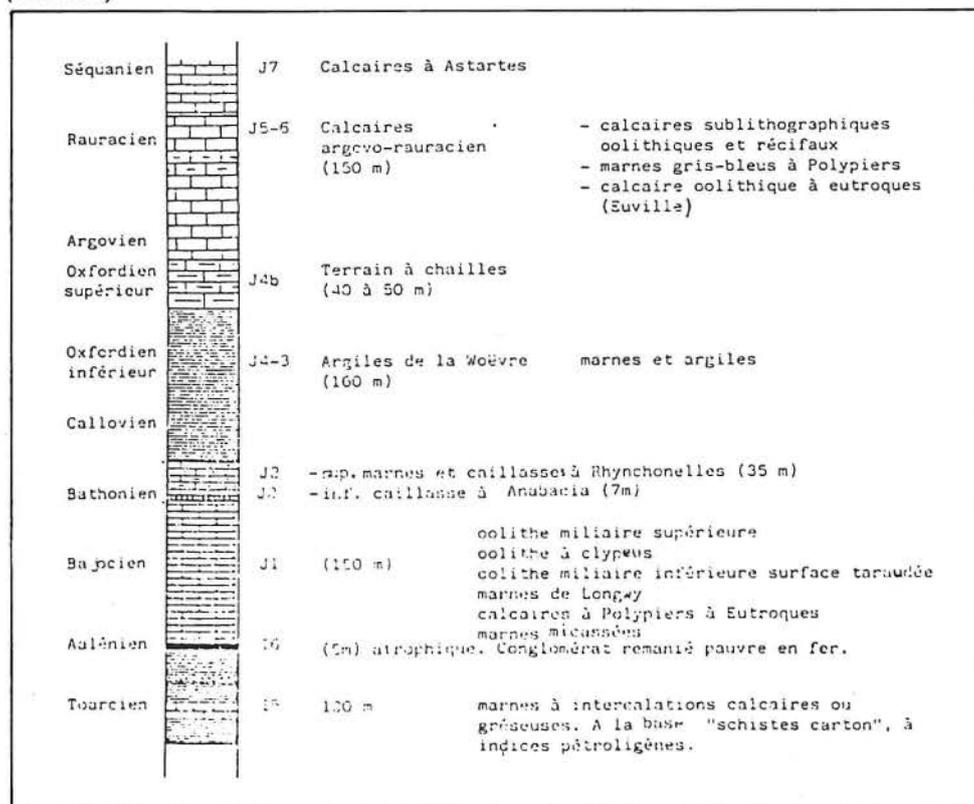
— Rigny-St-Martin (RSM) à l'aval du bassin, peu à l'amont de la confluence de l'Aroffe dans la Meuse.

Toutes les informations hydrométriques sont sur la base de données ARHMA et peuvent faire l'objet de divers traitements élaborés, par voie informatique.

3.1. Débits moyens interannuels

Pour tenir compte des périodes communes aux trois stations, deux périodes d'observation ont été retenues :

Fig. 2. Série stratigraphique synthétique du bassin de l'Aroffe (Meuse)



— 1969-1983, pour les deux stations longues (VLC et RSM);

— 1979-1983, pour les trois stations.

Les données issues de ces stations figurent dans le tableau 2, en valeur absolue (m^3/s).

On note que les débits en A sont du même ordre de grandeur qu'à VLC et RSM. Ceci s'explique parce que la moyenne calculée à A porte sur une période au caractère humide très accusé.

Par ailleurs on observe que les débits varient peu de VLC à RSM. Ils présentent la particularité d'avoir une moyenne interannuelle comparable à celle d'Aroffe mais une plus grande variabilité dans le temps : le débit d'étiage est deux fois plus faible à VLC qu'à A mais le mois au plus fort écoulement est deux fois plus fort.

3.2. Débits spécifiques et surfaces de bassins versants

Pour s'affranchir du facteur «surface du bassin versant» et de l'effet de taille des phénomènes mesurés, il convient, en hydrologie classique, de recourir aux débits spécifiques.

En hydrologie karstique, cette technique présente cependant l'inconvénient que les superficies attribuées à chaque station ne sont pas connues d'une façon absolument rigoureuse. L'hydrologue est contraint de travailler sur des surfaces de bassins topographiques tandis que le bassin réel contrôlé en un point de mesure donné peut intégrer un bassin souterrain différent.

Dans le cas de l'Aroffe, les bassins topographiques sont planimétrés dès l'origine des stations et l'on a rajouté à ces estimations les valeurs des bassins dits effectifs. Ces derniers sont aussi des bassins topographiques mais qui concernent uniquement les deux bassins de l'Aroffe inférieur et pour lesquels on a fait abstraction de l'Aroffe amont.

On peut en effet considérer que sauf événement hydrologique exceptionnel, il n'y a pas de relation directe superficielle (ni a fortiori souterraine d'ailleurs) entre l'Aroffe supérieur et inférieur. Et même dans les cas exceptionnels, les débits de l'Aroffe supérieur sont absorbés par le karst du Dogger dans une proportion telle que seule une infime partie du débit s'écoule vers l'W au-delà de la plaine inondée bien visible au niveau d'Autreville et arrive jusqu'au bassin inférieur.

Dans ces conditions on peut admettre les mesures des superficies des bassins (en km^2), notées dans le tableau 3.

	Bassin versant topographique	Bassin versant effectif
A	38.5	38.5
V L C	198	65.5
R S M	265	129

Tableau 3. Superficies des bassins (en km^2)

Les valeurs des débits spécifiques moyens mensuels et annuels seront alors calculées (QSPE en $l/s/km^2$) et figurent dans les tableaux 4 et 5.

3.3. Débits de crues

L'étude des débits de crues est fondamentale pour l'aménageur. Elle est aussi intéressante dans le cas présent pour préciser les relations entre les trois bassins successifs mesurés sur l'Aroffe.

Historiquement, depuis 1969, date de mise en service des deux plus anciennes stations du bassin, la crue du 28 mai 1983 est la plus importante.

Le tableau 6 récapitule les données des débits maxima instantanés des crues annuelles depuis 1979.

Les valeurs des débits de pointe sont données à la fois en valeur absolue (m^3/s) et en valeur spécifique ($l/s/km^2$) par référence aux surfaces de bassin versant effectives.

Les valeurs spécifiques des débits de crues sont constamment plus élevées à Aroffe qu'à VLC et plus ici qu'à RSM, ce qui tendrait à montrer qu'il n'y a pas, même en cas de crue exceptionnelle de liaison superficielle notable entre l'Aroffe supérieur et inférieur. Ce point est confirmé par l'examen des limnigrammes de crues à VLC où aucune pointe de crue, qui serait décalée dans le temps par rapport à celle du propre bassin de VLC, ne peut être décelée, attribuable à l'écoulement superficiel de l'Aroffe amont.

4. INTERPRÉTATIONS

4.1. Caractères du régime hydrologique

Si l'on se réfère à la période commune aux trois stations, c'est-à-dire à une période courte représentative d'années humides, on observe que :

— les débits spécifiques à VLC sont toujours supérieurs à ceux d'Aroffe uniquement en saison humide, décalée d'un mois (décembre à

uin). En saison sèche (juillet à novembre), les débits spécifiques d'Aroffe sont toujours plus élevés que ceux de l'Aroffe inférieur.

Où met en évidence ici l'effet de taille du bassin versant, où les terrains imperméables occupent sur le plus grand bassin (VLC) une superficie proportionnellement plus importante, où les phénomènes d'évapotranspiration et de déficit d'écoulement sont prépondérants en saison sèche.

— Si l'on compare maintenant les deux stations de l'Aroffe inférieur, les débits spécifiques de VLC sont toujours (sauf en août où l'écart reste cependant inférieur à 10%) supérieurs à ceux de RSM. Ceci est conforme aux phénomènes hydrologiques observés régionalement mais l'écart entre les valeurs mensuelles et surtout annuelles (6,2 l/s/km² soit 0% environ) est tel que seuls des échanges importants «nappe-rivière» peuvent en être l'explication.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Année
V L C	15.9	34.3	14.8	11.6	9.9	4.7	2.3	1.2	0.9	4.9	5.0	19.6	10.3
R S M	9.4	18.1	7.4	8.7	6.2	3.7	1.8	1.0	0.7	1.9	2.8	9.6	6.0

Tableau 4. Série longue (1969-1983)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Année
A	24.5	18.7	12.6	16.4	13.4	5.9	5.6	3.0	3.6	11.4	10.0	29.2	13.1
V L C	27.8	35.4	14.9	16.9	17.4	8.1	3.6	1.4	1.2	7.9	5.8	41.9	15.1
R S M	17.2	20.0	8.9	13.5	9.7	5.6	2.6	1.5	0.9	3.3	4.3	19.8	8.9

Tableau 5. Série courte (1979-1983)

1.2. Estimation des débits infiltrés

a) L'Aroffe supérieur. Les observations de terrain conduisent à conclure que la totalité du débit de l'Aroffe à Aroffe s'infiltré dans le karst bajocien. Ce débit est estimé à 0,500 m³/s, valeur moyenne interannuelle arrondie.

En période de crue maximale, ce débit atteint 12,5 m³/s. Dans ce cas, les pertes ne se situent plus seulement à Gémonville mais s'échelonnent tout le long de la vallée sèche, jusqu'au niveau d'Autreville.

Il est possible qu'une infime partie de ce débit de crue transite par les fossés perpendiculairement à la R.N. 74 de Colombey-les-Belles à Autreville et puisse gagner ainsi le cours superficiel de l'Aroffe inférieur. Mais il s'agit tout au plus d'une fraction minime du débit de crue, estimée à quelques centaines de l/s au maximum.

b) L'Aroffe inférieur. Le problème est ici plus complexe car l'Aroffe inférieur ne subit pas de pertes totales. L'idée la plus couramment répandue est même qu'il serait alimenté par la nappe des calcaires du Rauracien.

Les données hydrologiques acquises depuis 1969 conduisent à imaginer un schéma inverse. En effet, même si l'examen des chroniques de débits moyens journaliers les deux stations montre que les débits de RSM sont en valeur absolue supérieurs à ceux de VLC dans la proportion de 92% en nombre de jours par an, l'examen des débits spécifiques révèle une insuffisance des débits à l'aval du bassin sur la série d'observation longue comme sur la courte.

Sur la série longue, jugée plus représentative de phénomènes moyens, la perte de débit en moyenne interannuelle peut être chiffrée de la façon suivante, en prenant à RSM un débit spécifique théorique égal à celui de VLC :

— Débit théorique à RSM :

$$129 \times 10,3 = 1,328 \text{ m}^3/\text{s}$$

— Débit effectif à RSM :

$$129 \times 6,0 = 0,774 \text{ m}^3/\text{s}$$

La différence, soit 0,550 m³/s en valeur arrondie, représente le déficit de débit au niveau de RSM, en première approximation, donc le débit infiltré dans les calcaires du Rauracien.

A titre indicatif, sur la période humide 1979-1983, cette valeur est portée à 0,800 m³/s.

Au niveau des débits instantanés de crues, la différence de débit évaluée de la même façon conduit à une valeur de 13 m³/s. Cepen-

	A		V L C		R S M	
	Q ABS	Q SPE	Q ABS	Q SPE	Q ABS	Q SPE
6 février 1980	6.95	180	10.5	160	9.95	77
18 décembre 1981	7.64	198	10.5	160	8.67	67
21 décembre 1982	9.69	251	15.1	230	16.0	124
28 mai 1983	> 12.4	> 322	17.6	268	21.6	167

Tableau 6. Données de débits maxima instantanés des crues annuelles depuis 1979

dant, cette valeur est difficilement utilisable car les hydrogrammes ne sont pas identiques aux deux stations.

4.3. Retour sur le problème des superficies de bassins versants

Il est possible également de calculer la surface réelle effective du bassin contrôlé à RSM, en considérant que la superficie effective doit être corrigée par le rapport des débits théorique et effectif, soit :

$$S \text{ réelle} = 129 \cdot \frac{0,774}{1,328} = 75 \text{ km}^2$$

La différence avec le bassin topographique effectif est donc de :

$$D = 129 - 75 = 54 \text{ km}^2.$$

Ainsi, en première approximation, le débit mesuré à RSM peut être considéré comme représentatif d'un bassin de 75 km², au lieu des 129 km² mesurés par planimétrie.

Le déficit de débit enregistré à RSM par rapport à ce qu'il devrait être compte tenu de la valeur mesurée à VLC peut s'expliquer :

— soit par une diminution du bassin d'alimentation souterrain équivalant à 54 km² de bassin versant superficiel ;

— soit, plus vraisemblablement, par une infiltration importante au niveau des calcaires du Rauracien. Il est possible à cet égard — mais cela reste à vérifier — que les sources alimentant l'Aroffe entre VLC et RSM soient dues à

la présence d'un niveau marneux à la base des calcaires du Rauracien (Marnes à Polypiers) et que les infiltrations se produisent dans les calcaires sous-jacents (calcaires oolithiques de l'Argovien).

5. CONCLUSION

Les données hydrologiques acquises par le Service Régional de l'Aménagement des Eaux de Lorraine permettent donc de préciser les échanges nappe-rivière, de l'Aroffe superficiel avec la nappe du Bajocien d'une part et de l'Argovo-Rauracien d'autre part, principalement au plan quantitatif : dans les deux cas on a mis en évidence un débit infiltré au profit de la nappe de 0,500 m³/s en moyenne. Ce chiffre représente des pertes totales sur l'Aroffe supérieur et un déficit de débit d'environ 40% sur l'Aroffe inférieur. En réalité, sur la partie aval du bassin, le débit augmente bien en valeur absolue mais dans une proportion très faible : environ 10% du débit pour une augmentation de 100% de la surface du bassin topographique.

Il s'agit là de données nouvelles, qui vont à l'encontre des idées les plus répandues concernant le fonctionnement de l'Aroffe inférieur.

F. LETOUZE

Fig. 1. Lo stereogramma illustra la successione stratigrafica di tipi A, B e C del Luteziano superiore, medio ed inferiore nei calcari suborizzontali delle colline di Verona. In corrispondenza di intersezioni di faglie si realizzano esempi classici di circolazione idrica verticale a clessidra, che conduce alla formazione in superficie di una dolina ed in profondità di una caverna, collegate tra loro da un inghiottitoio.

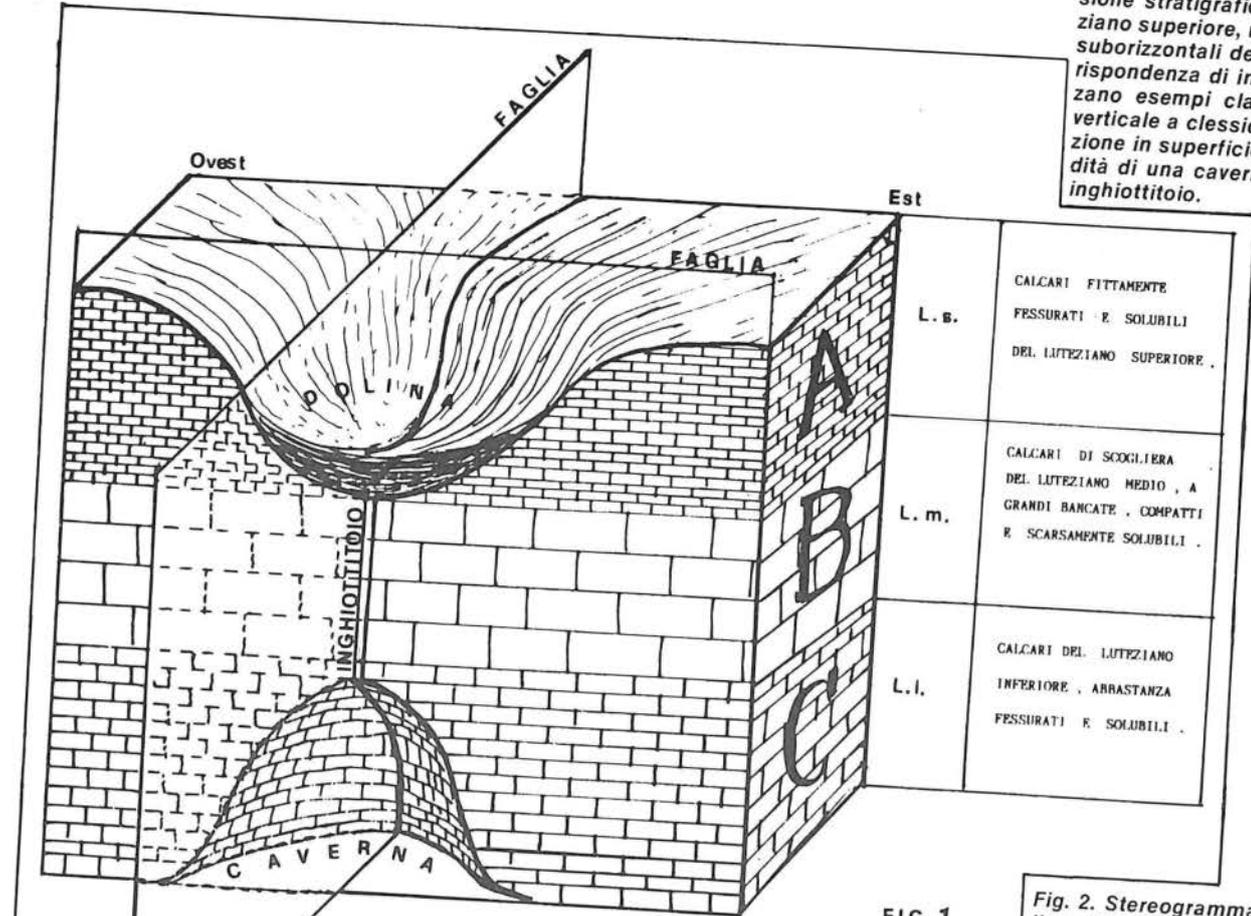


FIG. 1

Fig. 2. Stereogramma di un settore delle colline di Verona, che consente di cogliere la successione stratigrafica del tipo A, B e C realizzata dai livelli del Luteziano superiore medio ed inferiore e la suborizzontalità degli strati calcarei, che presentano infatti una pendenza media di circa 10° verso sud-ovest. Si creano perciò le condizioni adatte per una circolazione idrica a clessidra. La profonda incisione di canyon durante la regressione messiniana ha abbassato i livelli idrici di base locali, favorendo la formazione di doline, ma anche di ripari sotto roccia, ponti naturali monoliti carsici, solchi parietali e diaclastici accentuando al massimo le caratteristiche dei vari livelli calcarei e del tipo di successione stratigrafica.

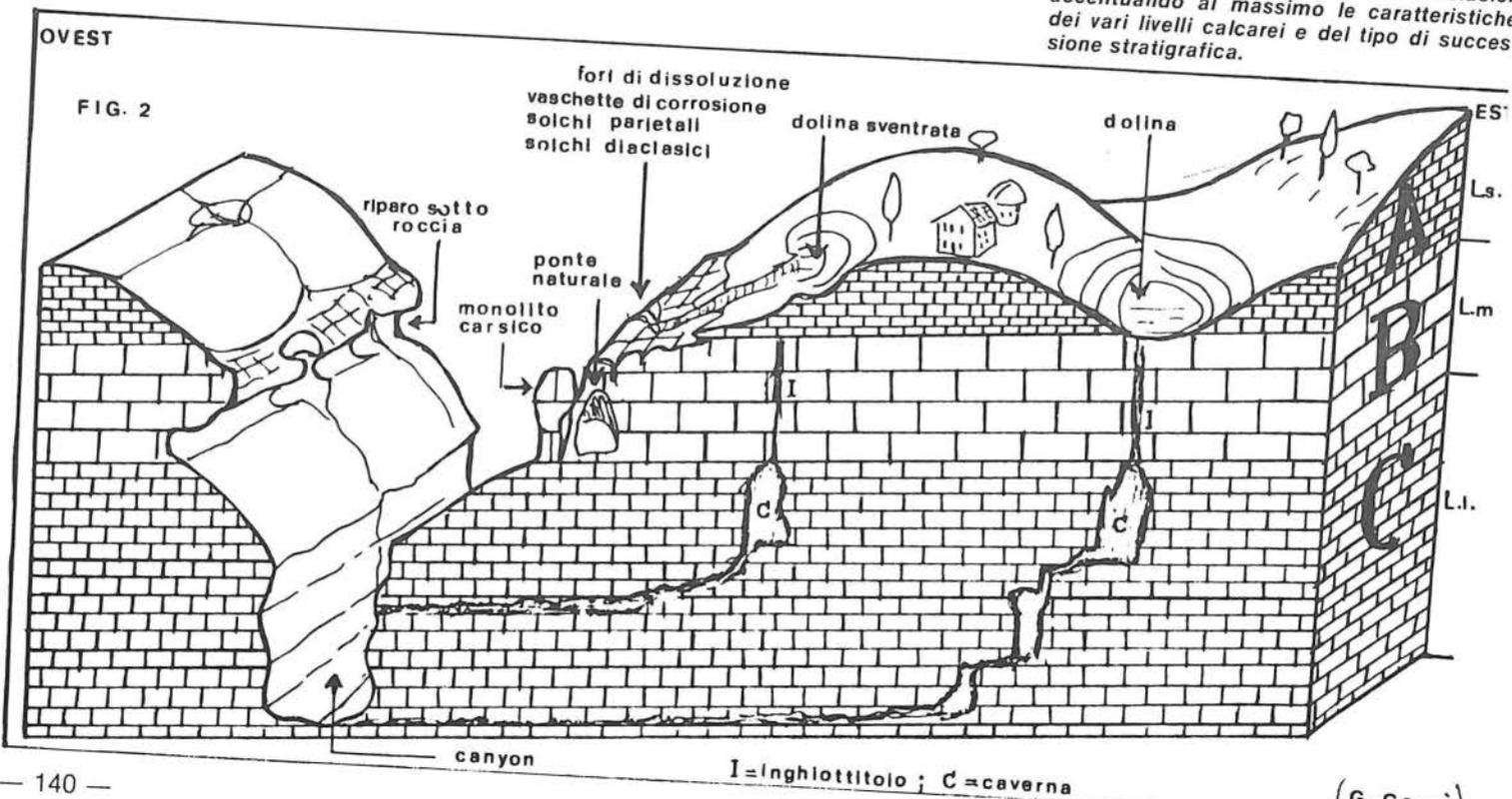


FIG. 2

I = inghiottitoio ; C = caverna

(G. Corrà)

DOLINE E POLJE NELLE COLLINE DI VERONA

Giuseppe CORRA

Istituto di geografia della facoltà di economia e commercio
delle università di Verona

RESUME

La recherche sur les dolines et sur les poljes karstiques de la colline de Vérone donne la possibilité de souligner l'importance des facteurs structuraux dans la genèse et dans le développement de ces morphologies karstiques. Les calcaires locaux du Lutetien supérieur, moyen et inférieur réalisent un type de succession stratigraphique qui permet une circulation hydrique «en clepsydre» qui caractérise très souvent les régions karstiques dont les couches sont horizontales ou modestement inclinées. Elle nous donne la possibilité d'expliquer l'association fréquente entre dolines et cavernes (grâce à la perte) ou bien le mécanisme qui amène à la formation de dolines (normales, d'effondrement et éventrées), ou encore la cause pour laquelle il y a des niveaux avec dolines et des niveaux avec cavernes. La maturité atteinte par les dolines et les poljes de la colline de Vérone permet d'attribuer l'origine de ces morphologies karstiques à la fin du Miocène : conséquence de la remarquable régression marine qui intéresse la Méditerranée pendant le Messinien. La région des collines de Vérone appartient clairement à l'original paysage karstique du bassin de la Méditerranée, caractérisé par une incision fréquente en canyon des fonds de vallée. Le phénomène a abaissé fortement les niveaux hydriques de base locaux, en favorisant au maximum le développement de la circulation hydrique verticale et en mettant, de manière remarquable, en évidence les caractéristiques structurales et les types particuliers de successions stratigraphiques. On a ainsi la possibilité d'expliquer non seulement la présence de dolines, pertes et cavernes, mais aussi d'abris sous roche, de ponts naturels, de monolithes karstiques, de trous de dissolution, de Kamenitza, de lapiés de diaclase et de paroi, et d'expliquer également l'abondance des sources karstiques vaucusiennes dans les zones de piémont, la fréquence et l'appréciable thermalité de ces eaux, dues au fait qu'elles peuvent parcourir aussi des siphons revers qui utilisent des réseaux karstiques messiniens profonds.

1. UN PARTICOLARE TIPO DI SUCCESIONE STRATIGRAFICA

Nelle colline di Verona si riscontra un esteso affioramento di calcari fittamente fessurati e solubili del Lutetiano superiore, che potremmo contraddistinguere come «livello A». Solo dove affiora questo livello, che come quelli sottostanti possiede strati a debole pendenza (circa 10°), si nota la presenza di doline e di alcuni polje. Non sempre però dove affiorano livelli calcarei fittamente fessurati e solubili, orizzontali o a debole pendenza, come quello del livello A e dei livelli sottostanti, si formano le doline. Le caratteristiche della orizzontalità o della debole pendenza degli strati, della fitta fessurazione e della solubilità sono per questo tipo di doline una

condizione indispensabile, ma non sufficiente. Occorre infatti che al di sotto di tali calcari ne seguano altri molto compatti (livello B), adatti alla penetrazione verticale delle acque solo in corrispondenza di rare ed importanti discontinuità della roccia. Il massimo di questa discontinuità si realizza nell'incontro tra faglie o importanti diaclasi. Il Lutetiano medio delle colline di Verona rappresenta proprio un tipico esempio di livello B.

E'costituito infatti da potenti e compatte bancate di calcari di scogliera dello spessore medio complessivo di oltre 20 m e risulta permeabile solo in corrispondenza di discontinuità tettoniche, costituite dalla intersezione di piani di faglia o di diaclasi. Gli ambiti spaziali, interessati da tali intersezioni, diventano, in livelli calcarei orizzontali o a modesta inclinazione, settori preferenziali per la penetrazione in verticale delle acque meteoriche. Il segmento che rappresenta la linea di intersezione tra due piani di faglia, che attraversano livelli calcarei a bancate compatte come quelle del livello B, tende a mantenere una marcata individualità ed è destinato morfologicamente ad assumere il ruolo di inghiottitoio. La zona in cui l'inghiottitoio entra in contatto con la parte basale del livello A diventa praticamente un punto idrovoro preferenziale e di conseguenza un polo di convergenza delle acque meteoriche, che attraversano le fitte maglie dei calcari notevolmente fessurati del livello A. Tutta la massa di tali calcari dovrebbe teoricamente essere oggetto di una circolazione idrica uniforme, ma la citata convergenza delle acque meteoriche verso i punti idrovori preferenziali provoca nel livello A una circolazione idrica che assume la forma di coni capovolti, i cui vertici fanno capo ai punti idrovori preferenziali, costituiti dalla sommità degli inghiottitoi. In questi particolari settori spaziali del livello A si determina logicamente una maggiore erosione chimica e meccanica e di conseguenza anche una maggiore asportazione di materiale roccioso in soluzione ed in sospensione, il cui risultato pratico è la formazione, in seno al livello A, delle conche dolinari (G. CORRA, 1982). Il meccanismo descritto risponde alla osservazione generale di G. ROSSI (1977): «Les dolines apparaissent toujours lorsque la lithologie montre une série karstifiable reposant sur des niveaux relativement imperméables». Tuttavia se al livello B dei calcari compatti segue in basso, come spesso avviene, un livello C a calcari abbastanza fittamente fessurati, come quelli del Lutetiano inferiore delle colline di Verona, le acque che provengono dall'inghiottitoio, sviluppato nel livello B, non si limitano a discendere in verticale, ma, per i fenomeni di capillarità, tendono ad espandersi anche lateralmente ed in parte verso l'alto (G. CORRA, 1978, 82).

La circolazione idrica assume di conseguenza una distribuzione spaziale che si allarga a cono o a campana (fig. 1). Nonostante questo livello calcareo possieda carat-

teristiche adatte ad una circolazione idrica spazialmente uniforme, poiché viene rifornito di acqua prevalentemente dagli inghiottitoi, risulta sottoposto ad una circolazione idrica differenziale, fortemente concentrata in particolari settori spaziali. Solo in questi settori, predisposti dalla tettonica e dal tipo di successione stratigrafica, si ha di conseguenza una maggiore azione solvente ed una maggiore possibilità di asportazione di materiale roccioso in soluzione ed in sospensione. Sintetizzando il problema, potremmo affermare: «le doline e le caverne si formano sempre ed esclusivamente in calcari caratterizzati da una fitta fessurazione e da una elevata solubilità, e capaci di chiamare in causa anche il fenomeno della capillarità. La loro localizzazione spaziale dipende dall'incontro di faglie e diaclasi. Le doline per formarsi richiedono un meccanismo che faccia convergere le acque meteoriche verso un punto idrovoro preferenziale, mentre le caverne richiedono un meccanismo che garantisca l'arrivo in un settore ristretto di una elevata quantità di acque meteoriche» (G. CORRA, 1982). Questo meccanismo è l'inghiottitoio, che può esistere solo in bancate calcaree compatte e scarsamente solubili ed interessate dalla intersezione di faglie o diaclasi. Abbiamo così indirettamente risposto anche alla acuta osservazione di Ph. RENAULT (1970): «tous les niveaux calcaires ne sont pas capables de loger des cavernes».

2. STRUTTURA E VOCAZIONI MORFOLOGICHE

I livelli A e C sono entrambi costituiti da calcari fittamente fessurati e solubili. Si constata che anche il livello C, quando affiora in superficie, può ospitare doline, purché esso sia seguito da un livello D che abbia le stesse caratteristiche del livello B. Nelle montagne calcaree con strati a debole pendenza si nota inoltre che se ai livelli A, B e C seguono altri due livelli D ed E, che posseggono rispettivamente le caratteristiche dei livelli B e C, negli strati del livello D si formano gli inghiottitoi ed in quelli del livello E si originano delle caverne. In questi casi non solo si spiega l'esistenza di caverne sovrapposte, ma non risulta necessario nemmeno ricorrere alla azione speleogenetica profonda per miscela di acque, così egregiamente esposta dal BOEGLI (1968). Le acque vadose, concentrate negli inghiottitoi del livello D, quando raggiungono il livello E, fittamente fessurato e solubile, essendo quantitativamente consistenti, oltre ad esercitare una azione chimica residua, sono in grado anche di esplicare una rilevante erosione meccanica.

3. LA CIRCOLAZIONE IDRICA A CLESSIDRA

Nei livelli stratigrafici A, B e C delle colline di Verona, rappresentati rispettivamente dal

Luteziano superiore, medio ed inferiore, si realizza una particolare circolazione idrica, che, schematizzando, potremmo definire «a clessidra». L'introduzione di questa nomenclatura si rende necessaria, perché i meccanismi erosivi che si riscontrano nelle colline di Verona sono assai frequenti nelle aree carsiche. Essi trovano così finalmente una soddisfacente interpretazione e quest'ultima oltre ad assumere un valore di carattere generale, consente anche di conferire una organica sistemazione ad una grande varietà di fenomeni. Trova particolarmente conferma nella geomorfologia carsica il ruolo fondamentale dei fattori strutturali, compreso quello della successione stratigrafica (G. CORRA, 1973) e si spiega inoltre il fenomeno del frequente accoppiamento tra doline e caverne, già sottolineato da B. GEZE (1974).

Una volta individuata l'esistenza di un tipo di successione stratigrafica come quello dei livelli A, B e C, è possibile, servendosi del meccanismo della circolazione idrica a clessidra, stabilire se l'area carsica in questione possa presentare o aver presentato doline, inghiottitoi e caverne ed inoltre poter distinguere con sicurezza se una dolina è normale o di crollo (G. CORRA, 1972), e spiegare l'esistenza di pozzi di crollo a vari stadi di sviluppo, collegati o meno a cavità ipogee residuali.

Testimonianze di questo tipo si rinvengono nei citati livelli del Luteziano superiore, medio ed inferiore, ma essi risultano particolarmente numerosi ed imponenti nei livelli del Cretaceo inferiore, del Malm e del Dogger dei Monti Lessini, al cui settore meridionale le colline di Verona appartengono.

4. IL RUOLO DEL LIVELLO DI BASE NELLA CIRCOLAZIONE IDRICA VADOSA.

Un sistema di circolazione idrica a clessidra non si realizza però automaticamente quando un incontro di faglie o diaclasi attraversa un tipo di successione stratigrafica, costituito dall'intera serie dei livelli del tipo A, B e C. E' anche necessario che il livello idrico di base carsico della zona in questione sia abbastanza profondo da consentire alle acque vadose di attraversare effettivamente l'intera successione stratigrafica citata. Questa condizione è diffusamente presente quando un territorio è sottoposto ad un consistente sollevamento orogenetico, oppure quando è interessato da una rilevante regressione marina. In entrambi i casi si ha infatti un forte abbassamento dei livelli di base dei fiumi della zona; fenomeno che conduce ad un rilevante ringiovanimento della idrografia e ad una piuttosto rapida e profonda incisione dei solchi vallivi, che tendono ad assumere tipiche forme a canyon (fig. 2). Le colline di Verona hanno potuto usufruire sia dei sollevamenti dell'orogesi alpina, sia delle consistenti regressioni marine verificatesi durante le fasi glaciali quaternarie. Lo stadio evolutivo raggiunto dalle formazioni dolinari e dai canyon, scavati nei solchi vallivi consente però di affermare che la zona collinare di Verona ha risentito soprattutto della eccezionale regressione verificatesi nel Mare Mediterraneo durante il Messiniano. Tale regressione durò infatti circa un milione di anni ed il livello marino sembra si sia abbassato di oltre 2.000 m rispetto a quello attuale. La regressione messiniana ha consentito una diffusa incisione di profondissimi canyon in tutto il bacino del Mediterraneo, favorendo di conseguenza enormemente la circolazione idrica verticale, testimoniata da una diffusa sparizione della idrografia superficiale. Il ritorno del Mare Mediterraneo ai livelli normali ha consentito di mascherare, a seconda dei luoghi, con le acque marine, con i sedimenti marini e con le alluvioni continentali plioceni-

che e quaternarie, proprio le parti più profonde, ampie e spettacolari dei canyon, incisi durante il Messiniano. Tuttavia gli studiosi più attenti, anche prima dell'inizio degli anni 70, precedentemente cioè alla individuazione ufficiale della eccezionale regressione messiniana nel Mediterraneo, avevano già sottolineato la chiara originalità del paesaggio carsico in tutto il bacino del Mediterraneo.

Oggi siamo in grado di attribuire la causa della originalità del paesaggio carsico delle regioni interessate non solo ai tipi di calcari che vi affiorano e alle particolari condizioni climatiche che da lungo tempo vi dominano, ma anche e soprattutto alla accentuata circolazione idrica verticale, consentita dalla regressione messiniana, la quale ha messo in particolare evidenza le varie caratteristiche strutturali dei rilievi calcarei, compreso anche il tipo di successione stratigrafica, segnalata nel caso dei livelli del Luteziano delle colline di Verona. L'impronta originale che presenta il paesaggio carsico delle aree geografiche appartenenti al bacino del Mediterraneo dipende perciò in buona parte dalla escavazione di profondissimi canyon in territori calcarei in cui gli strati si trovano spesso in condizioni di orizzontalità o di modesta inclinazione; situazione infatti ben diversa da quella in cui i sollevamenti orogenetici determinano circolazioni idriche verticali anche in strati fortemente inclinati. In quest'ultimo caso è perciò più raro riscontrare le classiche conseguenze di una circolazione idrica verticale del tipo a clessidra, in cui la successione stratigrafica può svolgere un ruolo fondamentale.

5. INFLUSSI DELLA TETTONICA SULLA FORMA E POSIZIONE DELLE DOLINE

Le doline delle colline di Verona risultano abbastanza vistosamente allineate longitudinalmente agli assi vallivi locali, i quali presentano un chiaro andamento meridiano, essendo disposti nella direzione nord-sud (fig. 2). Questo significa che le doline si trovano allineate in corrispondenza di importanti faglie, vicarianti rispetto a quelle più importanti che hanno determinato la formazione dei solchi vallivi. La distribuzione «a rosario» di queste doline fa pensare ad intersezioni di faglie e diaclasi trasversali a faglie longitudinali agli assi vallivi. Le doline delle colline di Verona non occupano la sommità delle dorsali, ma in genere risultano spostate verso occidente. Anche la loro sezione trasversale non è simmetrica, ma risulta più ripida sul lato occidentale. Queste asimmetrie di posizione e di forma sono entrambe attribuibili alla generale pendenza di circa 10°, verso sud-ovest, che gli strati presentano. La planimetria non è quasi mai circolare e l'asse maggiore è in genere quello meridiano. Le particolari caratteristiche che si incontrano nelle singole doline rispondono chiaramente a fattori strutturali locali. Nel settore occidentale delle colline di Verona si riscontrano anche tracce di polje carsici sventrati ed inoltre il grande polje a gradini della località Ronchi.

Che presenta le caratteristiche di una collisione tra doline allineate, quale risultato di un loro ampio e profondo sviluppo, accelerato dalla posizione marginale del rilievo in questione, vero gradino morfologico, il cui versante esterno si immerge ripido sotto le alluvioni recenti dell'Alta pianura padana.

All'estremità settentrionale del polje dei Ronchi si nota un interessante canyon di crollo, probabile testimonianza di antichi e consistenti fenomeni carsici ipogei, che la serie A, B e C dei livelli stratigrafici del Luteziano prevede. La spettacolarità e freschezza di questo canyon di crollo fa pensare ad una vistosa testimonianza di fenomeni neotettonici.

6. CONCLUSIONI

Questa breve indagine sulle doline e sui polje carsici delle colline di Verona consente di ribadire il ruolo fondamentale dei fattori strutturali nella formazione, localizzazione e sviluppo dei fenomeni carsici. Si coglie inoltre anche l'estrema importanza del grado di pendenza degli strati, del tipo di successione stratigrafica e della presenza di canyon, quali testimonianze di un forte abbassamento dei livelli idrici di base locali ai margini e all'interno dei massicci calcarei. L'individuazione del sistema di circolazione idrica verticale a clessidra, consentita da particolari tipi di successione stratigrafica in livelli calcarei orizzontali o a debole pendenza, permette di individuare le cause che rendono frequenti gli inghiottitoi, le doline e le caverne ed anche di poter stabilire se in una zona potevano un tempo essere presenti delle doline o se una dolina è di tipo normale o di crollo e se certe forme emicircolari o falciformi possono rappresentare veramente delle doline sventrate o se certi ripiani nei versanti vallivi siano dei relitti di polje carsici. Le doline delle colline di Verona rivelano una notevole antichità ed uno stretto collegamento con il paesaggio carsico a canyon, che caratterizza tutto il bacino del Mediterraneo. Le perforazioni e le prospezioni geologiche, effettuate nelle valli alluvionali e sui fondali marini di tale area geografica, confermano che i canyon più importanti si trovano ora sommersi sotto le acque ed i sedimenti marini o sotto le potenti coltri alluvionali plioceniche e quaternarie. La diffusa presenza di Canyon non ha favorito soltanto la circolazione idrica verticale, ma ha messo anche in grande risalto le caratteristiche litologico-stratigrafiche dei singoli livelli e dei vari tipi di successioni stratigrafiche. Si spiega così l'elevata frequenza di doline e di caverne e nello stesso tempo di ponti naturali, di ripari sotto roccia, di monoliti carsici, fori di dissoluzione, vaschette di corrosione, solchi parietali e diaclasici (fig. 2) ed inoltre l'abbondanza di sorgenti carsiche valchiusane nelle zone pedemontane e la frequente apprezzabile termalità di queste acque, che possono percorrere sifoni rovesci, che utilizzano reticoli messiniani profondi.

Giuseppe CORRA

BIBLIOGRAFIA

- BOEGLI (A.) - 1968 - La corrosione per miscela d'acqua. *Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan*, 8, p. 19-33, Trieste.
- CORRA (G.) - 1972 - Origine ed evoluzione delle cavità carsiche. *Escursionismo*, 23, 3, p. 10-12, Torino.
- CORRA (G.) - 1973 - Le rôle de la stratification dans la formation des cavernes. *Coll. Intern. de Karst. et Spél. dans les Pyrénées. Comm. des Phénom. Karst. du Com. Nat. de Géogr., CNRS*, p. 70-82, Aix-en-Provence.
- CORRA (G.) - 1976 - La genèse, l'évolution et le rôle des dolines dans le cycle karstique. *Actes du 102^e Congr. Nat. des Sociétés Savantes de Limoges, Sect. de Géographie. Biblioth. Nat., Paris*, p. 135-145.
- CORRA (G.) - 1982 - La genesi delle doline. Volume «Scritti geografici in onore di A. Sestini». *Soc. di Studi Geografici*, p. 222-230, Firenze.
- GEZE (B.) - 1974 - Relation entre les phénomènes karstiques de surface et de profondeur. *Mém. et Doc. du Service de documentation et de cartographie géogr. nouv. série. Phénomènes karstiques*, 2, 15, p. 195-207, CNRS, Paris.
- RENAULT (Ph.) - 1970 - La formation des cavernes, PUF, p. 126, Paris.
- ROSSI (G.) - 1978 - Quelques aspects des rapports karst-structure en milieu tropical. Vol. «Karst de montagnes, karst et structure», coll. de Grenoble, *Revue de Géographie Alpine*, 2-3, Grenoble.

IL CARSISMO NEI CALCARI PELAGICI DELL'APPENNINO UMBRO

MARCHI GIANO: IL RUOLO DEGLI ORIZZONTI IMPERMEABILI DELLA CANALIZZAZIONE SOTERRANEA IN UNA CATENA DI PIEGHE

Sandro GALDENZI
Via Maratta 10, Jesi (Ancona) ITALIA

ABSTRACT

In the Umbro Marchigiano Apennine limestones usually outcrop in the anticlines, surrounded by terrigenous rocks in the wide synclines. The thin bedded pelagic limestones («Maiolica» and «Scaglia») are interbedded with marly formations, but the role of the discontinuous and low permeable formations underlying the Maiolica should be evaluated in each individual case. The fast morphologic evolution, the interbedding of limestones and marls, the great tectonic dislocations, limited the growth of wide karst caves.

In standard situations karst bearing rocks outcrop in the core and in the limbs of an anticline. Shaft-caves develop in the ridges, coinciding with the anticlines axial zone; they consist of one or more fault shafts which aren't often connected with the actual drainage pattern. These shaft-caves originate from the fast flow of rainwater along joints and faults up to the underlying impermeable formation.

If no faults break the continuity of the impermeable formation, vadose water must flow along the permeability boundary towards a limb of the fold. Here the overlying impermeable formation causes a ground water drainage parallel to the strike towards the rising, that is generally situated where the impermeable formation mantle is covered by a stream talweg.

Centred phreatic flow can originate in this way, lacking a large amount of seepage water too. That gives rise to bedding caves, not integrated with shaft-caves, and formed by a linear tube with an uneven long section.

These tubes originate in the deep phreatic zone and are fossilized following the lowering of watertable.

INTRODUZIONE

E' stata presa in considerazione la parte centrale e settentrionale dell'Appennino Umbro Marchigiano, dalle ultime propaggini dei M. ti Sibillini nella zona di Camerino fino al gruppo di M. te Nerone. Le caratteristiche stratigrafiche, tettoniche, altimetriche e climatiche della zona sono simili così da poterla considerare nel suo complesso; si hanno estesi affioramenti di calcari pelagici mesozoici senza lo sviluppo di vaste cavità sotterranee.

I. SUCCESIONE STRATIGRAFICA E PERMEABILITÀ DELLE FORMAZIONI

L'Appennino Umbro Marchigiano è caratterizzato dall'alternanza di formazioni calcaree e calcareo marnose, delle cui caratteristiche di permeabilità si sono interessati vari AA. FOSSA MANCINI, 1916, 1921; PASSERI, 1972).

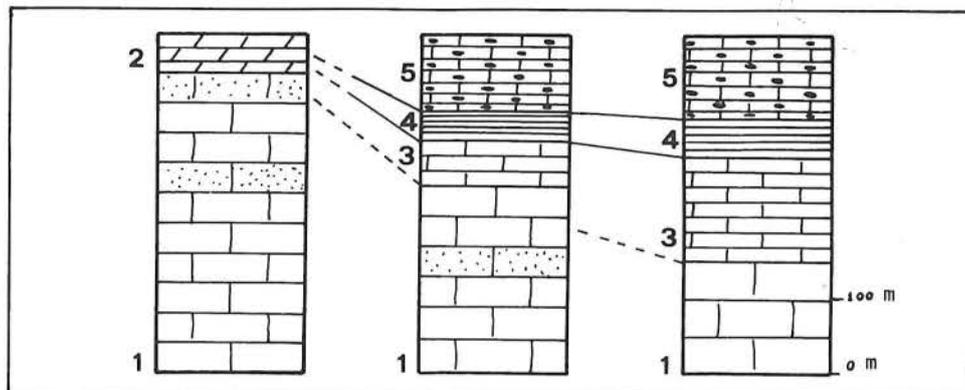


Fig. 1. I rapporti stratigrafici tra le formazioni giurassiche (schema semplificato).

Con la progressiva disarticolazione della piattaforma carbonatica si sono originate successioni stratigrafiche decisamente differenziate per litologie e spessori. Le serie ridotte e condensate, per la minore abbondanza di litotipi marnosi e per l'esiguo spessore possono originare livelli impermeabili di importanza strettamente locale. Nella serie completa invece l'orizzonte marnoso del Rosso Ammonitico - Marne a Posidonia ed i livelli sommitali dei Calcari Diasprini costituiscono un'importante barriera di permeabilità tra Calcarea Massiccio e Maiolica. 1) Calcarea Massiccio. 2) Serie ridotta e condensata. 3) Corniola. 4) Rosso Ammonitico e Marne a Posidonia. 5) Calcari Diasprini.

- **Serie giurassica.** La serie giurassica umbro marchigiana mostra una notevole variabilità sia laterale che verticale di litologie e spessori. Nele Calcarea Massiccio (Lias inf.), potente formazione di piattaforma carbonatica, sono già riconoscibili variazioni laterali e verticali delle caratteristiche litologiche secondo la distribuzione e l'evoluzione degli ambienti sedimentari. E' comunque lo smembramento della piattaforma alla fine del Lotharingiano che causò l'accumolo di successioni decisamente differenziate (COLACICCHI & al., 1969, 1970; CENTAMORE & al., 1971; FARINACCI & al., 1981).

Si originarono infatti depressioni in cui si sono accumulate potenti sequenze (200-300 m) di materiali calcareo selciferi o marnosi (serie completa) e «alti strutturali» con limitati spessori (10-60 m) di sequenze calcaree o calcareo marnose nodulari, talora dolomitizzate e spesso lacunose (serie condensate o ridotte) (fig. 1).

Per l'analisi delle caratteristiche di permeabilità delle formazioni giurassiche si rimanda al lavoro di PASSERI (1972) sulla zona di M. Cucco. In questa sede è opportuno evidenziare che:

- il Calcarea Massiccio, ad elevata permeabilità, è sede di estesi sistemi carsici ipogei, noti in bibliografia ed ancora in studio;
- la «serie completa» contiene un livello intermedio tipicamente marnoso (Rosso Ammonitico e Marne a Posidonia) ed un livello sommitale calcareo selcifero molto compatto a bassa permeabilità (Calcari Diasprini p.p.);
- alcuni livelli delle serie condensate e ridotte, per la loro compattezza e per la scarsa fessurazione possono rappresentare livelli impermeabili;

- i livelli a bassa permeabilità nelle serie condensate e ridotte sono generalmente di importanza solo locale; a causa del loro esiguo spessore infatti sono spesso dislocati dalle faglie del sottostante Calcarea Massiccio.

- **Calcarea Maiolica** (Titoniano superiore-Aptiano p.p.). Lo spessore varia da 70 m in corrispondenza di alcune successioni condensate ai 400-500 m delle serie complete. E' costituito da calcari bianchi micritici (Mudstone, DUNHAM, 1962) in strati regolari e ben distinti di 20-40 cm, con intercalazioni di letti e lenti di selce e rari livelli argillosi o bituminosi.

E' spesso minutamente fratturato o brecciato (Calcarea rupestre Auctorum) in prossimità di faglie e disturbi tettonici: può essere anche notevolmente deformato in zone a stretto raggio di curvatura. E' dunque una formazione molto permeabile per via della diffusa fratturazione e della stratificazione ben marcata.

- **Marne a Fucoidi** (Aptiano p.p. - Cenomaniano p.p.). Hanno uno spessore abbastanza costante di 80-100 m; la parte basale è interamente marnosa mentre quella sommitale, calcarea marnosa, fa da transizione alla Scaglia.

Le Marne a Fucoidi possono essere laminate per cause tettoniche in particolar modo nei versanti orientali delle pieghe anticlinali. Nel complesso però mantengono una buona continuità laterale e rappresentano un'importante barriera di permeabilità.

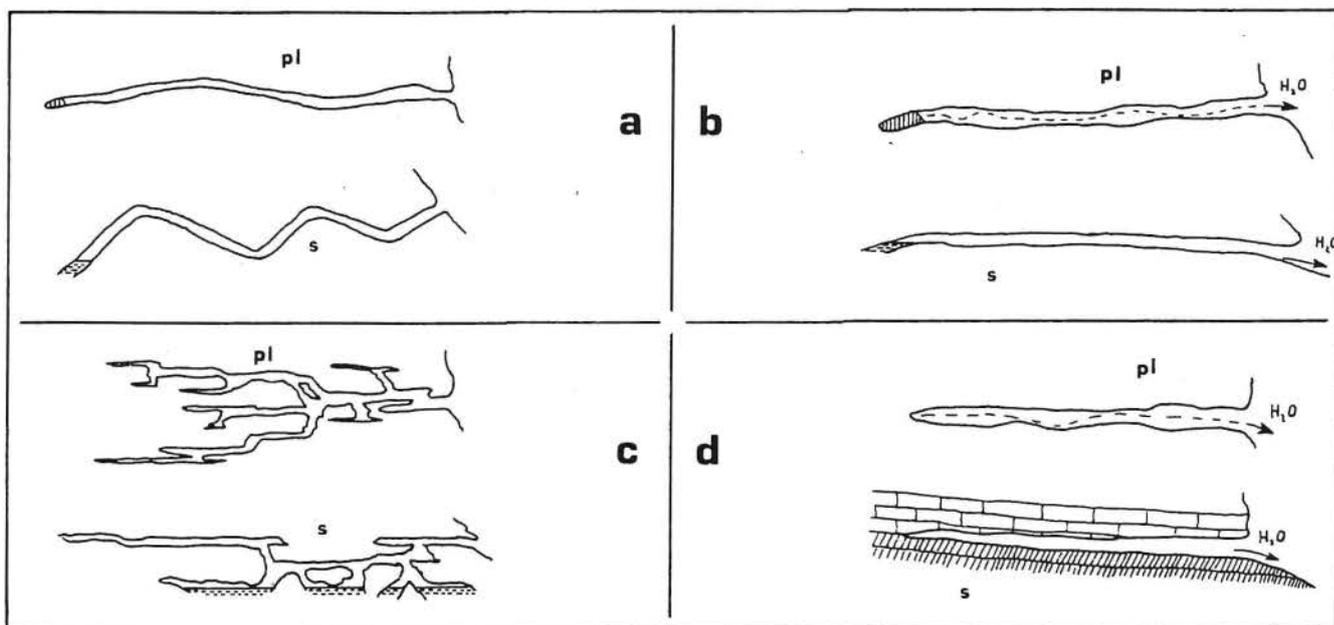


Fig. 2. Schema dei tipi di grotta sub-orizzontale definiti nel testo: a) risorgente a tubo semplice (fossile). b) risorgente a tubo semplice (attiva). c) risorgente complessa. d) risorgente su limite di permeabilità. pl. planimetria. s. sezione longitudinale.

- **Scaglia s.l.** (Cenomaniano p.p. - Eocene superiore p.p.). Comprende le formazioni di Scaglia Bianca (30 m) e Scaglia Rosata (100-400 m); è costituita da calcari selciferi o marnosi con stratificazione sottile e spesso irregolare. Si possono distinguere una parte basale calcarea con selce, una medio alta calcarea marnosa ed una sommitale calcarea selciferi. Lo spessore varia notevolmente e nelle zone in cui si hanno le sequenze più potenti si trovano comunemente slumps, slides e intercalazioni detritiche, tutti fenomeni indotti dalla sedimentazione in condizioni di subsidenza differenziata.

La Scaglia è frequentemente deformata da pieghe a stretto raggio di curvatura che rendono gli strati discontinui e ad andamento irregolare. È meno permeabile del Calcarea Maiolica per effetto della maggiore plasticità e dei residui insolubili più abbondanti.

- **Scaglia Cinerea** (Eocene superiore p.p. - Oligocene). Dalla Scaglia Rosata si passa gradualmente alla Scaglia Cinerea (spessore 100-200 m), costituita da calcari marnosi, marne e argille marnose in alternanze, con progressivo aumento dei litotipi argillosi verso l'alto stratigrafico.

L'importanza di questo orizzonte impermeabile, continuo e potente, è accentuata dal fatto che i sedimenti mioceni, prevalentemente terrigeni, sono in genere ugualmente impermeabili.

I litotipi carsificabili della Scaglia s.l. sono quindi compresi entro due formazioni impermeabili; per la Maiolica invece le condizioni locali vanno analizzate caso per caso: infatti mentre l'orizzonte impermeabile al tetto (Marne a Fucoidi) mantiene una buona continuità laterale, le serie giurassiche al letto hanno caratteristiche ampiamente variabili da zona a zona; è quindi possibile che in corrispondenza delle serie ridotte e condensate si formi un unico acquifero tra Calcarea Massiccio e Maiolica (PASSERI, 1972; CATTUTO & PASSERI, 1974).

III. Assetto tettonico e geomorfologico

La parte settentrionale dell'Appennino Umbro Marchigiano è costituita da una serie di pieghe disarmoniche orientate da NO-SE a NNO-SSE, asimmetriche e con vergenze orientali. Il rigido piastrone basale del Calcarea Massiccio è spesso interessato da faglie: i

terreni calcarei più recenti, sottilmente stratificati e più plastici, danno pieghe a raggio di curvatura più o meno ampio.

I Litotipi calcarei costituiscono i maggiori rilievi ed affiorano nelle strutture anticlinali: nella aree sinclinali normalmente si hanno i depositi marnosi e terrigeni oligoceni e miocenici, che circondano così i massicci calcarei...

La presenza di orizzonti marnosi (Marne a Fucoidi e Rosso Ammonitico) o comunque a bassa permeabilità (Calcari Diasprini, serie ridotte e condensate) all'interno della sequenza calcarea favorisce la formazione di numerosi piccoli baccini idrogeologici, mentre le maggiori sorgenti rimangono legate agli affioramenti di Calcarea Massiccio.

La rete idrica di fondovalle è ben sviluppata ed i fiumi nell'attraversare le strutture anticlinali incidono profonde gole; il progressivo affossamento della rete idrica ha causato successivi abbassamenti del livello di base carsico originando cavità disposte tipicamente su piani sovrapposti.

IV. Il carsismo

I fenomeni carsici superficiali non sono ben sviluppati per la presenza di coperture detritiche e suoli; si hanno doline e depressioni (piani) di origine tettonica tipo «polje» con inghiottitoi ai limiti meridionali dell'area considerata. Neanche il carsismo profondo, nonostante lo scarso drenaggio superficiale, è molto sviluppato: delle circa 60 grotte note soltanto una decina raggiungono i 100 m di sviluppo.

IV.1. Grotte verticali

Nessuna tra le circa 25 cavità conosciute supera i 100 m di profondità; sono costituite da uno o più pozzi, impostati su piani di fratturazione, senza estese diramazioni orizzontali. Possono essere interpretate come inghiottitoi, generalmente fossili, di piccoli corsi d'acqua temporanei: più spesso però non esistono elementi che le possano collegare all'idrografia superficiale. Di norma non esistono rapporti diretti con le grotte orizzontali che si sviluppano ai piedi dei massicci montuosi: unica eccezione è rappresentata dalla G. di Caprelle, la cui parte iniziale, verticale, si immette in rami sub-orizzontali (cfr. IV.2).

Un altro tipo di grotte verticali va ricondotto al tipo dolina di crollo: un esempio può essere il P. zo di Sasso Porci (363 Ma-Mc), profondo 10 m e sviluppato nella Maiolica. Quest'ultimo tipo è più noto nella vicina Umbria (ANGELUCCI & COCOZZA, 1962; LIPPI BONCAMPI, 1941; CATTUTO & PASSERI, 1974). Sempre in Umbria si hanno numerosi inghiottitoi in prossimità del contatto tra Scaglia Cinerea e Scaglia s.l. (PASSERI, 1973; CATTUTO & PASSERI, 1974): questa situa-

zione è solo parzialmente estendibile alle zone in esame poiché per le condizioni del rilievo (cfr. III) la Scaglia Cinerea affiora raramente a quote più elevate che la Scaglia Rosata.

IV.2. GROTTA SUB-ORRIZONTALI

La grotte ad andamento sub-orizzontale presentano una maggiore varietà di caratteristiche geomorfologiche ed uno sviluppo generalmente maggiore: delle oltre 25 cavità note soltanto tre comunque superano 500 m di sviluppo complessivo.

- **Risorgenti a tubo semplice.** È il tipo più comune, riconducibile ad una semplice condotta tubolare, generalmente ellittica, dal diametro di 1-2 m. Queste grotte sono generalmente sopraelevate rispetto alla rete idrica di fondovalle e terminano con sifoni (BOCCHINI & al., 1980, 1983).

L'andamento della sezione longitudinale può essere irregolare tipo «deep phreatic

Fig. 3. Nei diagrammi sono state rappresentate le grotte in base alla loro posizione rispetto agli assi delle pieghe ed alla loro quota; sono state distinte con simboli differenti le cavità che si sviluppano su Maiolica (-) e su Scaglia (+). In ascissa è riportata la posizione della grotta nella piega, ponendo la distanza tra gli assi dell'anticlinale e della sinclinale uguale all'unità; in ordinata viene rappresentata la quota relativa di ogni grotta, considerando unitario il dislivello tra il fondovalle e la superficie sommitale di ciascuna dorsale.

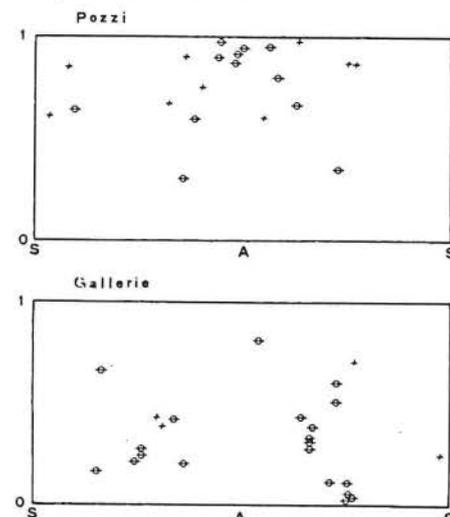
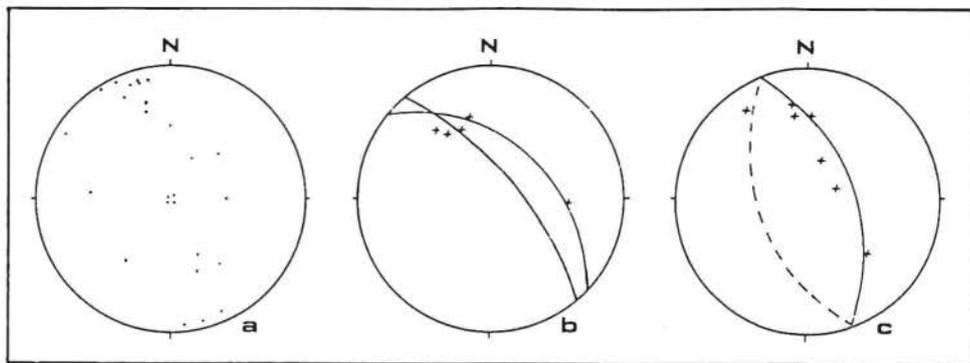


Fig. 4. Proiezione sul reticolo di Wulff di gallerie considerate come elementi lineari (da GALDENZI, 1983, 1984, semplificato).

1) Grotta di Caprelle. I condotti sub-orizzontali sono con centrati sulla direzione di stratificazione, intorno a NNO-SSE: gli strati sono verticalizzati sul fianco di una piega e la formazione impermeabile al letto condiziona soltanto il drenaggio delle acque freatiche. I condotti inclinati di origine vadosa hanno infatti in andamento piuttosto disperso.

2) Caverna dell'Inferno, parte iniziale. Tutta la grotta si sviluppa al contatto tra Calcarei Diasprini e Maiolica sul fianco di un'anticlinale. In questa prima parte la giacitura è irregolare na la dipendenza dei condotti dalla stratificazione è evidente.

3) Caverna dell'Inferno, parte finale. La giacitura è più regolare ed i condotti sono strettamente legati ai piani di stratificazione; la aglia di direzione (linea tratteggiata) interseca i condotti ma non ne condiziona l'andamento.



poste che seguono il contatto tra Calcarei Diasprini e Calcare Maiolica (GALDENZI, 1984).

V. IL RUOLO DELLE CONDIZIONI GEOLOGICHE NELLA SPELEOGENESI

V.1. Distribuzione delle grotte nelle pieghe

Mediante l'utilizzo dei due diagrammi di fig. 3 è stato possibile confrontare la distribuzione delle grotte rispetto agli assi delle pieghe ed alla loro posizione altimetrica nella dorsale montuosa. Nell'interpretazione dei diagrammi si possono evidenziare alcuni punti particolarmente significativi.

— I pozzi si sviluppano quasi esclusivamente al centro delle strutture anticlinali sulla sommità delle dorsali: alcune eccezioni sono legate all'esistenza di strutture antiformali complesse che includono pieghe sinclinali.

— I pozzi sono distribuiti in uguale misura in Scaglia e Maiolica: quelli su Maiolica sono ubicati più spesso verso l'asse delle pieghe: questo perché, coincidendo dorsali ed anticlinali, i terreni più antichi affiorano più spesso nella zona assiale delle anticlinali.

— Le grotte sub-orizzontali si aprono sui fianchi delle strutture anticlinali, dal livello di base fluviale a quote relative medio-basse.

— Le grotte sub-orizzontali sono molto più diffuse del Calcare Maiolica che nella Scaglia; il differente grado di carsificazione potrebbe però essere solo apparente. Anche nella Scaglia infatti si hanno estesi sistemi sub-orizzontali (Gagliole, Caprelle, Figareto); il minor numero di grotte note potrebbe quindi essere spiegato per via della maggiore alterabilità della Scaglia, che rende più probabile l'occlusione degli ingressi di gallerie normalmente piuttosto anguste.

V.2. Il ruolo dei piani di discontinuità nella speleogenesi

— Grotte verticali. Si è visto come i pozzi si aprono al nucleo delle strutture anticlinali: in queste situazioni la stratificazione si mantiene sub-orizzontale e pertanto, in mancanza di veri livelli poco permeabili entro le formazioni carsificabili, non può costituire una via di drenaggio per i flussi idrici della zona di percolazione. Se si aggiunge che i piani di fratturazione esistenti sono prevalentemente verticali o molto inclinati è comprensibile perché le grotte sono piuttosto semplici e costituite da uno o più pozzi senza diramazioni orizzontali o inclinate.

— Grotte sub-orizzontali. In precedenti lavori (1983, 1984) ho dimostrato la dipendenza delle gallerie dai piani di strato per la Grotta di Caprelle e per la Caverna dell'Inferno mediante la rappresentazione sul reticolo di Wulff (fig. 4); la stessa situazione è verificabile qualitativamente in larga parte delle grotte considerate, almeno in linea generale.

In altri casi (G. del Monaco, Buco Tonante) è una faglia di direzione che ha condizionato il drenaggio.

Nel complesso quindi le grotte sub-orizzontali, ubicate sui fianchi delle pieghe, si mantengono parallele all'asse della struttura ed al versante, seguendo i piani di disconti-

nuità con la stessa orientazione (generalmente piani di strato variamente inclinati).

Quanto sopra affermato ovviamente non è valido per le risorgenti su limite di permeabilità, il cui orientamento può essere normale all'asse delle pieghe.

VI. DISCUSSIONE

Già da un superficiale esame possiamo distinguere delle cavità assorbenti sulle dorsali e risorgenti localizzate ai piedi delle dorsali. Non può essere invece riconosciuta una diretta relazione tra i due tipi di grotta: la loro origine è anzi indipendente e solo casualmente si verificano comunicazioni dirette tra grotte assorbenti e risorgenti.

Nelle grotte sub-orizzontali si può infatti constatare l'assenza di passaggi derivanti dall'azione di acque vadose: anche nell'unico caso di confluenza (G. di Caprelle) si ha a che fare con un sistema verticale che si immette, modificandolo, in un sistema orizzontale indipendente: neanche in questo caso esiste una connessione tipo fiume sotterraneo tra un inghiottitoio ed una risorgente.

Nei pozzi prevalgono fenomeni di clastesi e solo limitati tratti sono interessati da ruscellamento, seppure temporaneo: solo in alcuni casi, come si è visto si hanno relazioni con corsi d'acqua superficiali mentre più spesso mancano elementi per collegare la grotta ad un paleoinghiottitoio ben localizzato. Bisogna quindi ammettere un'origine sufficientemente antica da cancellare le tracce dell'idrografia superficiale o una derivazione da un'area di assorbimento diffusa, per confluenza sotterranea di filetti idrici. In entrambi i casi l'attuale comunicazione con l'esterno è da collegare con l'arretramento dei versanti.

Se si considera la limitata estensione areale degli affioramenti di rocce impermeabili nelle strutture carsificabili (cfr. IV. 1) diviene evidente come il voler ricondurre l'origine dei sistemi verticali alla cattura di corsi d'acqua superficiali sia oltremodo semplificato.

Bisogna anzi ammettere che una buona parte delle grotte verticali si sia originata in quelle discontinuità (principalmente faglie) dove venivano a concentrarsi le acque piovane assorbite in superficie direttamente o dopo limitato ruscellamento. In un modello di questo tipo la capacità «erosiva» aumenta in profondità per successive confluenze fino a ridursi ed annullarsi alla superficie freatica per diminuzione di pendenza e velocità.

Le grotte sub-orizzontali sono localizzate sui fianchi delle anticlinali, dove piccole valli trasversali o gole fluviali abbassano le coperture impermeabili; in entrambi i casi questi orizzonti affiorano attorno a quote più elevate e si originano quindi punti di risorgenza ben localizzati (fig. 5). Poiché la Scaglia è spesso anche la Maiolica sono comprese entro livelli impermeabili le linee di maggiore drenaggio nell'acquifero sono necessariamente parallele all'orientamento degli strati e, nel complesso, delle pieghe.

Come si è visto, le grotte orizzontali anche dove si addentrano maggiormente nei massi non sono integrate con i sistemi verticali; la loro origine è quindi riferibile alla evoluzione per canalizzazione carsica dei tratti

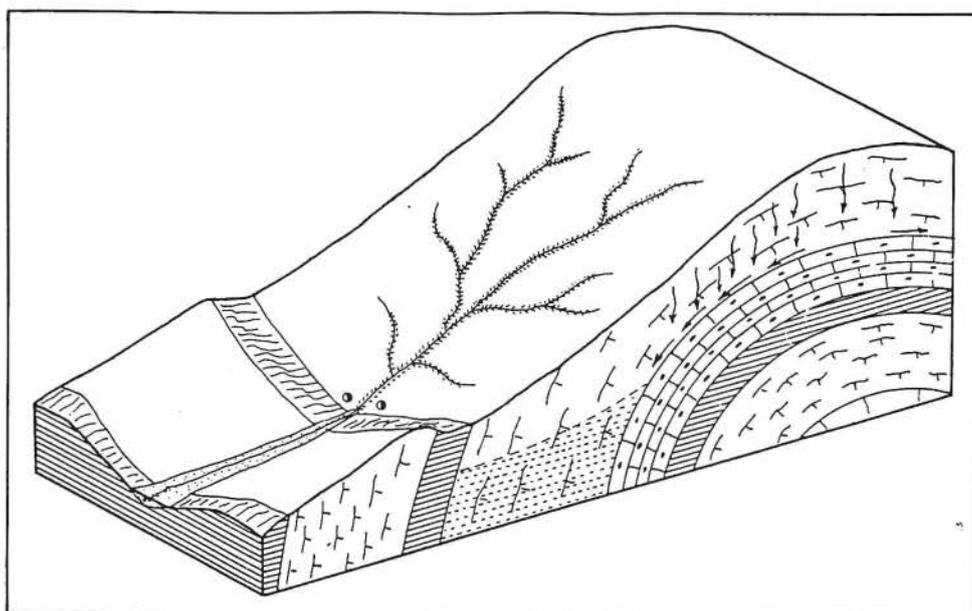


Fig. 5. Schema idrogeologico di un'anticlinale.

Al nucleo della piega le acque meteoriche possono originare corsi d'acqua temporanei infiltrarsi direttamente; le acque assorbite continuano la discesa verso il basso fino a che non insistono su di una formazione impermeabile. Qui, in assenza di faglie, scorrono verso un fianco della piega, alimentando una falda compresa entro due livelli impermeabili. Le risorgenti sono generalmente ubicate dove i corsi d'acqua abbondano maggiormente in coperture impermeabili; si originano così drenaggi concentrati lungo direttrici parallele all'asse dell'anticlinale.

dell'acquifero con drenaggio più intenso.

Questa situazione si verifica più facilmente in prossimità di risorgenti, dove le condizioni morfologiche ed idrogeologiche favoriscono il drenaggio lungo precise direttrici. L'ampliamento dei condotti procederebbe quindi dalla risorgente verso l'interno dell'acquifero via che aumenta la canalizzazione.

Questa situazione è solo apparentemente contraddittoria con quanto riscontrato nella zona vadosa, in cui i condotti si amplierebbero dalla profondità alla superficie: in ogni caso si tratta infatti della zona con flussi più concentrati.

Con il progredire della carsificazione sarebbe dunque possibile arrivare all'intersezione di sistemi verticali ed orizzontali sviluppati indipendentemente, permanendo condizioni di equilibrio. Un'evoluzione di questo tipo è stata notevolmente ostacolata dall'approfondimento progressivo della rete idrica di fondovalle, che ha causato successivi abbassamenti del livello di base carsico, come ben testimoniato nella Gola di Frasassi (CATTUTO, 1976; BOCCHINI & COLTORTI, 1978b; COLTORTI & GALDENZI, 1983; AGOSTINI, 1983).

In ogni caso va anche tenuto presente che le grotte-risorgenti sono alimentate da piccoli bacini, dell'ordine del km² o poco più. L'alternanza di rocce carsificabili e non preclude infatti lo svilupparsi nei calcari pelagici di grandi acquiferi. Inoltre al nucleo delle pieghe l'intensa tettonizzazione del Calcarea Massiccio disloca anche gli orizzonti impermeabili più profondi (Marne a fucoidi e sequenza giurassica) di modo che le linee di drenaggio principali sono condizionate dalla giacitura del C.M., anche dove questo affiora limitatamente (FOSSA MANCINI, 1916).

VII. Conclusioni

La presenza di orizzonti marnosi nella serie pelagica ha senz'altro ostacolato la formazione di estesi sistemi verticali interrompendo la continuità dei litotipi carsificabili. Il limitato spessore e le condizioni di affioramento degli orizzonti marnosi non hanno inoltre consentito lo sviluppo di una rete idrica superficiale che potesse alimentare inghiottitoi al passaggio con i calcari carsificabili. I sistemi verticali esistenti si sono quindi generalmente formati nelle discontinuità in cui si concentravano le acque di percolazione.

Le acque assorbite sui fianchi e nella cerniera delle anticlinali continuano la percolazione verso il basso finché non vengono ad insistere sugli orizzonti impermeabili, su cui possono scorrere fino al livello di base: nei fianchi delle anticlinali le acque freatiche, costrette entro due formazioni impermeabili, sono drenate parallelamente ad esse verso i punti di

risorgenza, ben localizzati nelle valli trasversali. Pure in mancanza di grandi apporti vengono quindi a crearsi condizioni di flusso freatico concentrato con gradienti idraulici anche elevati. In questa situazione si formano cavità lineari che seguono i giunti di strato e faglie di direzione. Le grotte si originano e si evolvono essenzialmente al di sotto del livello freatico e vengono fossilizzate in seguito all'abbassamento della falda.

L'unico esempio noto di «watertable cave» (cfr. IV. 2) non a caso è legato a condizioni particolari come acque mineralizzate e collegamento con l'acquifero principale del Calcarea Massiccio.

Era già stato osservato che in linea generale le grotte di origine freatica profonda sono più comuni in zone a strati molto inclinati (FORD & EWERS, 1978); nell'Appennino Umbro Marchigiano va però sottolineato che la causa fondamentale dello sviluppo di questo tipo di grotta deve essere ricercata nella reciproca distribuzione spaziale degli orizzonti permeabili e non, piuttosto che nell'inclinazione dei piani di strato o nella frequenza di fessure.

BIBLIOGRAFIA

AGOSTINI (S.) - 1983 - Tipologie carsiche nell'Appennino Centrale e assetto strutturale: ipotesi di correlazioni tra discontinuità carsiche e deformazioni tettoniche nelle rocce carbonatiche. *Le Grotte d'Italia* (4) XI, p. 457-465, Bologna.

ANGELUCCI (A.) & COCOZZA (T.) - 1962 - Cenni di Geologia del M. Cerrentino e studio stratigrafico del Pozzo Vorgozzo. *Geol. Rom.*, 1, Roma.

BOCCHINI (A.) & COLTORTI (M.) - 1978a - Rilievo topografico e geomorfologico del complesso carsico Grotta del Fiume (8 MA AN). XIII Congr. Naz. di Spel., Preprints, Perugia.

BOCCHINI (A.) & COLTORTI (M.) - 1978b - Considerazioni sulla speleogenesi della zona carsica di Frasassi (Ancona) in relazione all'evoluzione geomorfologica esterna. XIII Congr. Naz. di Spel., Preprints, Perugia.

BOCCHINI (A.) & FONTANA (A.) - 1983 - Cavità della zona di affioramento nella formazione della maiolica dell'Appennino Umbro Marchigiano. *Le Grotte d'Italia*, (4) XI, p. 265-279, Bologna.

BOCCHINI (A.), FONTANA (A.), MELELLI (P.) - 1980 - Note di confronto tra le cavità 29 V.T. Bus del Diaol e 93 MA MC risorgente di Gagliole. *Atti del 1° Congr. Triveneto di Spel.*, Treviso.

CATTUTO (C.) - 1976 - Correlazioni tra piani carsici ipogei e terrazzi fluviali nella Valle del F. Esino. *Boll. Soc. Geol. It.*, 95, p. 313-326, Roma.

CATTUTO (C.) & PASSERI (L.) - 1974 - Relazioni tra idrologia carsica e litologia nell'area Umbro Marchigiana. *Rass. Spel. It.*, Mem. XI, Vol. 1, p. 227-238, Como.

CENTAMORE (E.) CHIOCCHINI (M.), DEIANA (G.), MICARELLI (A.) PIERUCCINI (U.) - 1971 - Contributo alla conoscenza del Giurassico dell'Appennino Umbro-Marchigiano. *Studi Geologici Camerti*, 1 Camerino.

COLACICCHI (R.), PASSERI (L.), PIALLI (G.) - 1970 - Nuovi dati sul Giurese umbro-marchigiano ed ipotesi per un suo inquadramento regionale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 9 (4), p. 839-874.

COLACICCHI (R.) & PIALLI (G.) - 1969 - Relationship between some peculiar features of Jurassic sedimentation and paleogeography of the umbro marchigiano basin (central Italy). *Preprints del Mediterranean Jurassic Colloquium*, Budapest.

COLTORTI (M.) & GALDENZI (S.) - 1983 - Geomorfologia del Complesso Carsico Grotta del Mezzogiorno (4 MA-AN). Frasassi (1 MA-AN) con riferimento ai motivi neotettonici dell'anticlinale di Monte Valmontagna (Appennino Marchigiano). *Studi Geologici Camerti*, VII (1981-82), p. 123-132, Camerino.

DAVIES (W.E.) - 1960 - Origin of caves in folded limestones. *Nat. Spel. Soc. Bull.*, 22, p. 5-18.

DUNHAM (R.J.) - 1962 - Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: HAM W.E., Classification of carbonate rocks. *A.A.P.G. Mem.* 1, p. 62-84.

FARINACCI (A.), MARIOTTI (N.), NICOSIA (U.), PALINI (G.), SCHIAVINOTTO (F.) - 1981 - Jurassic sediments in the Umbro-Marche Appennines: an alternative model. In: FARINACCI (A.) & ELMI (S.), *Rosca Ammonitico Symposium Proceedings*. Edizioni Tecnoscienza, Roma.

FORD (D.C.) & EWERS (R.O.) - 1978 - The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *Int. J. Speleol.*, 10, p. 213-244.

FOSSA MANCINI (E.) - 1916 - Studio Geologico di tre risorgenti proposte per l'acquedotto di Jesi. *Mem. Soc. Tosc. Sc. Nat.*, XXXI.

FOSSA MANCINI (E.) - 1921 - Geologia ed idrogeologia della Gola del Sentino nella Marca di Ancona. *Giorn. Geol. Prat.*, 16, p. 37-74.

GALDENZI (S.) - 1978 - Osservazioni sulle cavità nei pressi della sorgente solfurea di Frasassi. XIII Congr. Naz. Spel., Preprints, Perugia.

GALDENZI (S.) - 1983 - Geomorfologia delle grotte di Caprelle. *Le Grotte d'Italia*, (4) XI, p. 443-452, Bologna.

GALDENZI (S.) - 1984 - Un inghiottitoio tuttora attivo nella zona di Frasassi: la Caverna dell'Inferno (12 MA-AN). In stampa.

LIPPI BONCAMPI (C.) - 1941 - La pedologia nella catena Martana. *L'Universo*, XXII (10), Firenze.

PASSERI (L.) - 1972 - Ricerche sulla porosità delle rocce carbonatiche nella zona di M. Cucco (Appennino Umbro Marchigiano) in relazione alla genesi della canalizzazione interna. *Le Grotte d'Italia*, (4) III, p. 5-44, Bologna.

PASSERI (L.) - 1973 - Canalizzazione sotterranea in regime di fluttuazione freatica nel travertino della Piana (Umbria). *Rass. Spel. It.*, Anno XXV, Fasc. 1-4, p. 83-97.

EAUX ET CIRCULATION KARSTIQUE SUR LE PLATEAU DE L'ALPE D'HUEZ (ISERE)

M. CHARDON

Il peut paraître paradoxal de parler de karst et de réseau souterrain à propos de l'Alpe d'Huez et du massif des Rousses. Les formes karstiques de surface tiennent en effet une place restreinte, cependant elles donnent lieu à une circulation encore mal connue : ce n'est qu'à l'automne dernier que trois spéléologues suizats ont révélé l'existence d'un réseau de 100 m de profondeur, à partir du puits Théophile.

Les formes karstiques de surface ont une extension très limitée et sont liées à la présence d'une couche peu épaisse : les calcaires dolomitiques à patine rousse, ou dolomie capucin, surmontées de cargneules ocreuses ou de vin. Au total de 10 à 30 m, attribués au Muschelkalk (T2, carte géologique au 1/50.000, Vizille), les assises du Trias inférieur arkoses et dolomies sableuses, 2 m) ou les chistes dolomitiques du Trias supérieur sont négligeables. Le Trias dolomitique s'intercale entre le socle des Grandes Rousses très fracturé et charrié vers l'Ouest d'une part et une épaisse série sédimentaire du Lias (L3a-2) représenté par des calcaires bleus et d'importantes passées de schistes noirs qui forment les sommets du signal ou de la Grande Sure (2114 m).

Les formes de surface dans la dolomie capucin sont médiocres (fig. 1), tables après de corrosion plus ou moins arrondies. Par contre dans la couverture liasique de la cuvette de l'Alpe d'Huez, et également lorsqu'existe une couverture morainique, on remarque de petites dépressions fermées de dimensions métriques, voire d'une dizaine de mètres de diamètre : col du Poutran, versants de la Balme, zone de l'Altiport et de Brandes.

Il s'agit de dépressions d'origine cryptokarstique, en relation avec la dissolution qui s'exerce en profondeur sur les dolomies capucines. De petites cavités d'ordre métrique çà et là sur les placages de la bordure occidentale des Rousses, et la découverte, puis l'exploration du puits Théophile en ont donné la confirmation. Ces dépressions ne se développent que lorsque la couverture liasique est peu épaisse.

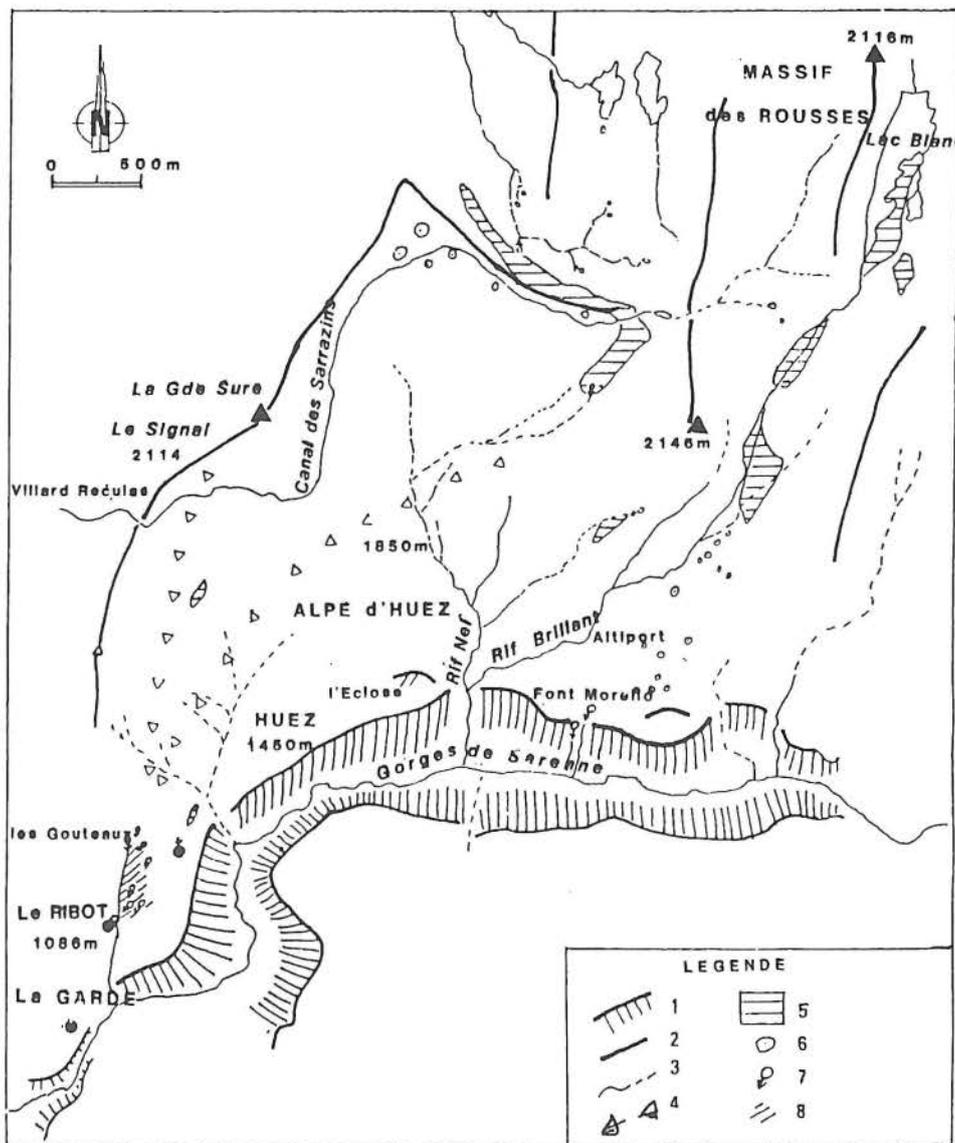


Fig. 1. Carte d'ensemble de la région de l'Alpe d'Huez. 1. Gorges. 2. Crêtes. 3. Réseau hydrographique permanent ou temporaire. 4. Ecoulement souterrain probable. 5. Affleurements de dolomie du Trias. 6. Doline. 7. Source. 8. Tufs du Ribot.

LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS ET LE KARST PROFOND

Le réseau hydrographique de surface est assez abondant sur le versant ouest des Rousses où les eaux sont collectées entre l'Altiport et la station par deux petites rivières Rif Nel et Rif Brillant) dont le débit varie de quelques litres/seconde pendant les sécheresses extrêmes (1976, 1983) à quelques centaines de litres/seconde pendant la période de fonte des neiges en mai-juin.

De plus les sources abondantes montrent l'existence d'un réseau souterrain : ce sont celles de Font Morelle, en contrebas du plateau de Brandes, et l'ensemble des émergences du Ribot d'Huez, au-dessous du vieux village d'Huez entre 1080 et 1350 m. Ces sources sont pérennes même si leur débit de fin d'été est relativement faible. Leurs eaux ont des caractères différents.

Font Morelle est au contact du socle et des importants dépôts morainiques du plateau de Brandes. Les débits varient de quelques litres à une centaine de litres au maximum. La température de l'eau oscille entre 2° en hiver et 8 à 9° en été. Située à 1800 m, ses eaux montrent un pH voisin de 7,5, une forte résistivité (entre 8 100 et 11 700 Ω/cm²) une faible teneur

en Ca++ et en Mg (15,2 et 11,2 mg/l de Ca++ 5,1 et 3,3 mg/l de Mg respectivement sur deux analyses). Ces eaux peu minéralisées prouvent un parcours rapide à travers le Trias dolomitique et la couverture morainique. La fusion des neiges fournit l'essentiel des eaux mais le transit rapide et les eaux de tourbières superficielles expliquent les contrastes thermiques

entre printemps et automne. Une partie des eaux du lac Blanc s'écoulerait souterrainement vers cette source : une coloration faite par E.D.F. à la fin des années 40 l'aurait prouvé. Cela expliquerait le maintien d'un certain débit pendant la saison chaude. Certainement une partie des eaux du Rif Brillant, émissaire du lac Blanc, alimente également Font Morelle à travers la couverture morainique de l'Altiport-Brandes. Les apports de surface l'emportent apparemment sur ceux d'une circulation karstique dans la dolomie triasique. Cette dernière brève et rapide ne minéralise pas beaucoup les eaux.

Au contraire, les multiples sources, dites du Ribot d'Huez, présentent les caractéristiques d'émergences karstiques (fig. 2). Celles-ci s'étagent depuis les abords du hameau du Ribot à 1086 m (virage n° 12) jusqu'à une source temporaire située à une vingtaine de mètres au-dessus du virage 8 (altitude 1355 m). En réalité il y a une suite d'émergences : en hiver, les températures de l'eau restent de l'ordre de 6° C à ces différents emplacements alors que la neige recouvre le sol et que la température de l'air est négative ou voisine de 0° C. Les venues d'eau pérennes sont près du Ribot d'Huez et la source des Goutteaux, à l'aval du virage 8. Elles se localisent sur une fracture. Toutes ces sources prennent naissance dans le Trias dolomitique ou à la base du Lias dans une zone très fracturée, hachée, entre le socle formé d'amphibolites et la masse de calcaires noirs et de schistes liasiques très comprimés.

En périodes de basses eaux (automne, début de l'hiver) seules les deux sources pérennes fonctionnent. A la fonte des neiges, et avec les pluies de fin d'hiver et de printemps, les émergences voisines et latérales se mettent en charge progressivement tandis que s'accroît le débit des Goutteaux. Au moment des crues, les sources déversent au maximum, et progressivement la source située à 1360 m se met en charge. On peut observer la mise en charge progressive de celle-ci.

Le caractère karstique de ces sources apparaît d'abord dans la constance des températures. Celles-ci varient de 6° 5 en hiver à 8° 5 en été, prouvant, avec les débits, la présence d'un aquifère profond et un transit assez long des eaux de pluie et de fonte. Les débits sont difficiles à estimer : de l'ordre d'une dizaine de litres lors des sécheresses, ils atteignent sans doute plusieurs centaines

Fig. 2. Les sources du Ribot. En trait plein : les sources permanentes, en trait discontinu : les sources temporaires, en hachures : les dépôts de tufs.

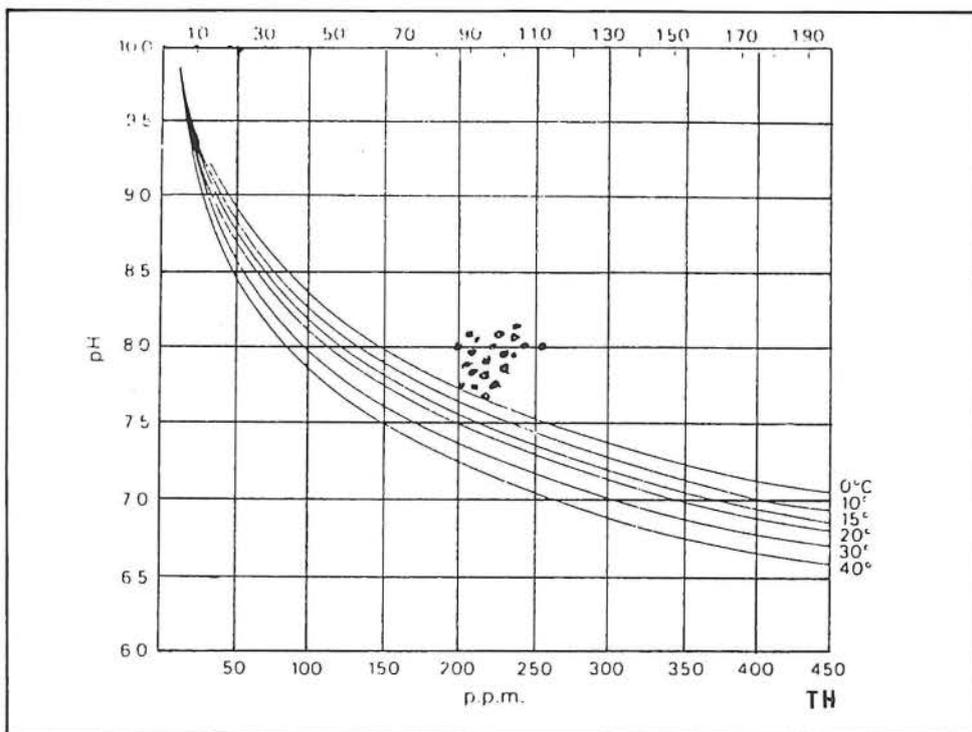
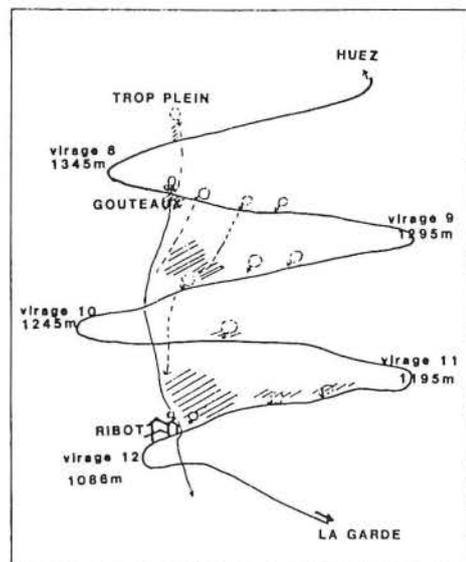


Fig. 3. Relation entre le TH (titre hydrométrique, somme de la dureté calcique et magnésienne), le pH et les courbes de saturation à différentes températures. On voit nettement que les eaux du Ribot sont sursaturées.

de litres au moment des grandes fontes et des pluies de printemps.

Les mesures effectuées confortent l'hypothèse d'une origine karstique. Le pH, comme la température et les autres données, sont homogènes au cours de l'année sur toutes ces venues d'eaux :

- ph compris entre 7,6 et 8,3
- Résistivité faible : 1300 à 2300 Ω/cm^2
- Ca⁺⁺ en mg/l : 65 à 91
- Mg en mg/l : 14 à 18
- TH en ° français : 22 à 30

D'une façon générale, les émergences du bas (Ribot) sont plus chargées que celles du haut (Goutteaux) qui fonctionnent comme trop-plein, mais l'écart reste minime : la résistivité est un peu plus faible, le pH un peu plus élevé au Ribot. Ces nuances bien explicables ne doivent pas masquer la réalité : le pH élevé, la forte minéralisation de ces eaux qui sont sursaturées en toutes saisons (fig. 3).

C'est ce qui explique les grands dépôts de tufs qui drapent ce versant particulièrement à Ribot. Tufs anciens, subactuels sans doute en bonne partie puisque le réseau actuel en est à l'écart. Les tufs continuent à se former : la source des Goutteaux, la fontaine récente du Ribot en sont revêtues, mais également les murs de soutènement et les puits de récupération des eaux bâtis lors de la construction de la nouvelle route pour les jeux olympiques de 1968.

L'origine de ces eaux pose un premier problème : leur forte teneur en Ca et en Mg dans un milieu de haute altitude montre une longue circulation : celle-ci se fait sans doute — en l'absence de traçage — depuis le versant occidental des Rousses, à travers l'assise de Trias dolomitique, sous la station de l'Alpe d'Huez, jusqu'au Ribot. Mais vraisemblablement les calcaires noirs du Lias alimentent également par une percolation profonde le réseau des émergences Goutteaux-Ribot. Le bassin versant englobe la cuvette de l'Alpe d'Huez et les pentes du Signal - la Grande Sure. La forte concentration en Ca et Mg, comme les températures, sur ce versant en plein adret, s'expliquent par cette double origine. La cuvette de l'Alpe d'Huez barrée par le verrou de l'Eclosé joue un rôle régulateur dans le transit des eaux sur un parcours de 4-5 km, entre l'arrivée du 1^{er} tronçon du téléphérique et Ribot. La masse irès enneigée du

Signal - Grande Sure apporte aussi une importante contribution.

Sur le versant du Ribot, la précipitation des carbonates apparaît certes liée aux conditions locales : situation en adret, ensoleillement favorisant une partie de l'année un réchauffement rapide de l'eau, présence de mousses et de plantes hygrophyles.

Le contexte bio-climatique actuel, vu l'altitude, est peu favorable à une intense dissolution et au dépôt des tufs : à 1850 m d'altitude l'Alpe d'Huez a une température moyenne annuelle de 4°C, des précipitations de l'ordre de 1200 mm/an, un ensoleillement de l'ordre de 2500 h/an. La formation végétale dominante est une prairie alpine d'origine anthropique, maintenant en voie de reboisement spontané (épicéas, bouleaux, hêtres) ou organisé (mélèzes, pins) entre 1400 et 1900 m.

Le fait primordial semble être la convergence d'eaux circulant dans les assises calcaires et dolomitiques, ce qui expliquerait la sursaturation et la précipitation rapide des carbonates. Les tufs du Ribot apparaissent comme un des rares cas, dans les Alpes françaises, de formation actuelle de tufs, sur des sources se situant au-dessus de 1000 m. On retrouve ici un des aspects de la précipitation de CaCO₃ évoqués lors du colloque de Paris le 9 mai 1981.

CONCLUSION

Les phénomènes karstiques sur le plateau de l'Alpe d'Huez paraissent avoir une importance insoupçonnée, moins par les formes superficielles que par l'existence d'une circulation en profondeur sous une station de sports d'hiver qui se développe et s'étend. Une circulation karstique mal connue s'est établie en profondeur entre le socle surélevé des Rousses et les bordures sédimentaires. La formation des tufs du Ribot est liée à ce concours exceptionnel de circonstances.

M. CHARDON

DESCRIPTION D'UN CONDUIT EN EPONGE ET D'UN MODE DE CIRCULATION, APPROCHE DE LA SPELEOGENESE DANS UN HORIZON CALCAIRE LUTETIEN DE PERMEABILITE TOTALE ELEVEE DANS L'EST PARISIEN

Jacques CHEDHOMME

Un conduit de 40 cm de diamètre rempli d'une texture spongieuse a été recoupé par une carrière souterraine à Antilly (Oise). Il ne s'agit pas d'un remplissage sédimentaire mais d'une multitude d'alvéoles centimétriques coalescentes concentrées dans un volume tubulaire de roche.

Le conduit s'est largement développé dans un banc de porosité élevée (46%) en marge de la fracturation. Un examen détaillé a révélé qu'il avait pris très discrètement naissance à la base du banc, à l'intersection du joint de stratification avec une fissure du banc inférieur.

Souvent les lèvres des joints de strates et des diaclases sont intensément perforées sur de grandes surfaces par des circulations en zone noyée. L'action superficielle de cette «corrosion en éponge» incite à la considérer comme un simple phénomène d'altération. Le conduit d'Antilly est bien un drain et illustre un mode de creusement et de circulation particulier déjà décrit. Son étude, complétée par des observations effectuées dans des cavités d'autres régions, permet une approche plus précise de la génèse et du fonctionnement des réseaux en éponge. L'existence de deux modes circulatoires intermittents, l'un de sens continu, l'autre alternatif, conduit à distinguer les réseaux implantés sur le drainage principal, de ceux établis dans les systèmes

annexes. Les deux types se développent conjointement dans les régions de plateaux peu surélevés comme l' le-de-France.

D'autres textures spongieuses, plus fréquentes, associées à des remplissages permettent de mieux cerner le rôle de la porosité. En France, plusieurs descriptions de cavités, telles que la grotte de la Bosse (Beauce, commune de Mor e, Loir-et-Cher) et la grotte de Coufin (gruyère de Coufin, Vercors, commune de Choranche, Isère), mentionnent des textures et des structures en éponge. En Amérique du Nord, les formes pariétales et les réseaux en éponge ont été très attentivement étudiés depuis longtemps par J.H. Bretz (1942) et A.N. Palmer (1975). L'assemblage morphologique et les marqueurs tectoniques d'Antilly, bien que rassemblés sur un site ponctuel, sont particulièrement utiles pour préciser la génèse des réseaux en éponge.

I. LE RÉSEAU KARSTIQUE D'ANTILLY

A. LOCALISATION

La carrière est située à Antilly (Oise)   la sortie du village en direction de Boullarre. Elle est accessible par une courte tranchée à 30 m de deux anciens silos à m rne (carte I.G.N. 1/25 000, n  2512 W, X = 647,540 m. Y =

161,160 m. Z = 85 m).

B. LITHOLOGIE

La carrière exploitait pour la construction le banc royal du Lutétien moyen épais de 3 m qui fournit un calcaire tendre régulier beige (packstone à miliolites)   porosité élevée (46%). La coupe du Lutétien moyen, observable dans la carrière, comprend la succession suivante exprimée de bas en haut :

— calcaire compact tendre en bancs décimétriques (wackestone à miliolites reconnu sur 65 cm);

— banc royal constituant une séquence calcaire élémentaire négative :

a) packstone fin compact (0,01 m);
b) packstone à porosité élevée (46%; 2,20 m);

c) laminites micritiques adhérentes au banc, révélées par la corrosion (0,25 m).

Elle est surmontée par les marnes et caillasses du Lutétien terminal, visibles sur 4 m d'épaisseur à l'entrée et à la traversée des fontis. Ce sont surtout des calcaires marneux blancs fins en bancs décimétriques d'épaisseurs différentes avec des joints marneux, des chenaux accentuant l'irrégularité du dépôt. En surface, les sables du Bartonien s'amenuisent   proximité des vallées.

C. DESCRIPTION

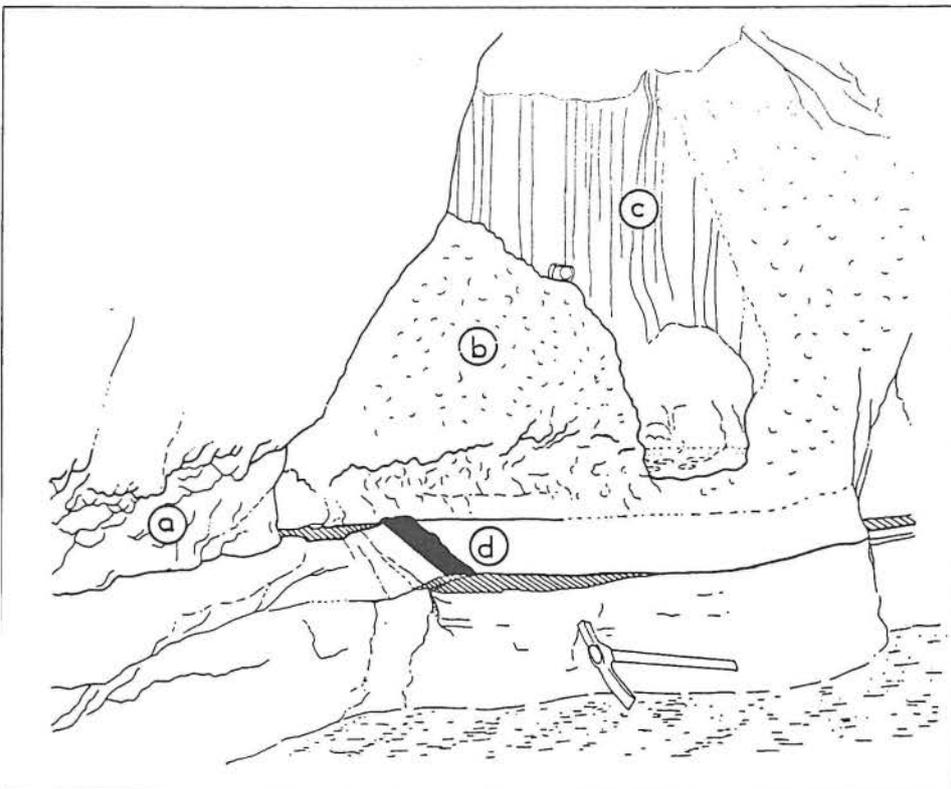
Le réseau karstique fossile, recoupé à plus de 100 m du pied du versant, se développe à quelques mètres au-dessus du niveau de la vallée (fig. 1).

Il comprend :

- une cheminée de 2,85 m de haut,
- un conduit spongieux de 0,30 m de diamètre moyen (fig. 2),
- un plan de fracture subvertical corrodé associé à l'exutoire de la cheminée.

1. La **cheminée** prend naissance dans la base des marnes et caillasses du Lutétien, se développe dans le banc royal qu'elle ne traverse pas entièrement, et enfin se déverse dans le conduit tangent à sa base. Les laminites corrodées du sommet du banc royal dessinent une fenêtre au contour sinusoïdal. La chute de l'eau tombant goutte à goutte a généré des parois en tuyau d'orgue. Le fond plat, circulaire marque d'une encoche à la base des tuyaux. Quelques cupules en bénitier traduisent des retouches par des infiltrations localisées.

Fig. 1. Carrière d'Antilly :
a) flanc dégagé du conduit spongieux
b) plan de fracture corrodé
c) cheminée
d) glissement banc sur banc.



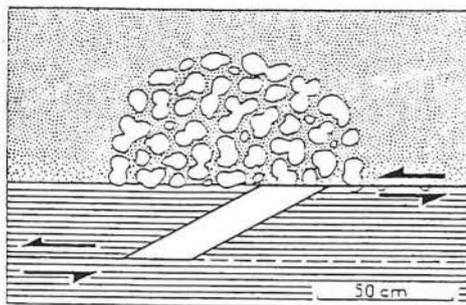


Fig. 2. Représentation schématique du conduit à texture spongieuse.

2. Le conduit, appliqué à la surface supérieure d'un banc plus compact, est formé par une forte concentration de vides centimétriques coalescents répartis dans une section en demi ellipse de $0,48 \times 0,24$ m. La section présente une texture semblable à celle d'une éponge ou d'une champignonnière de termites. Le tissu spongieux est d'une fragilité extrême.

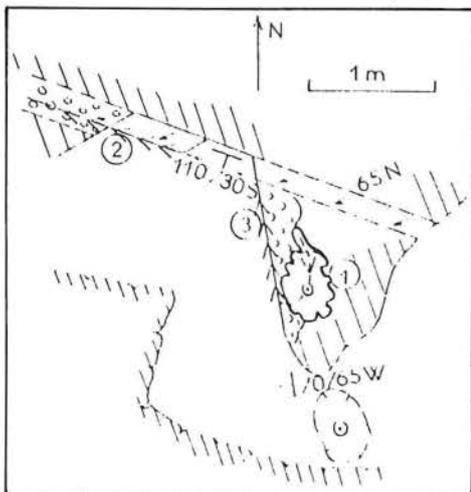
Les alvéoles sphériques ou tubulaires ont un diamètre variant de 0,5 à 2 cm. Nous n'avons pas pu déceler de pores isolés et par conséquent, il apparaît que les alvéoles forment un réseau unique développé à partir d'une voie initiale. Lorsque des alvéoles de deux chapelets différents parviennent à se recouper, le raccordement s'effectue par une pupille ceinturée par une arête vive. Les tubes de section constante sont rares. Il n'existe pas de réseau de fissures déterminant la position de chaque alvéole.

La paroi des alvéoles présente un aspect rugueux car la corrosion exploite un faciès déjà poreux. La surface de contact roche-eau est ainsi beaucoup plus grande que pour une roche parfaitement cimentée. La porosité est accrue dans les septes séparant les alvéoles les plus proches. Elles sont très fragiles. La base du banc plus compacte sur 1 cm s'oppose au faciès poreux car elle contient très peu d'alvéoles.

3. Le plan de fracture corrodé limitait une face d'un bloc que l'exploitation a dégagé. Sa direction est parallèle à l'allongement de la cheminée qu'il intersecte sans se poursuivre au-delà du plan axial. La paroi est piquetée par une multitude d'alvéoles hémisphériques dont les centres demeurent, par conséquent, au voisinage immédiat du plan de fracture. Le secteur corrodé contient l'exutoire de la che-

Fig. 3. Plan, données structurales :

- 1) cheminée
- 2) conduit à texture spongieuse
- 3) plan de fracture corrodé (70/65 W), 110/130 S, déchirure du banc de base N 65, direction de rotation du bloc supérieur.



minée et son raccord avec le conduit décrit plus haut. L'exploitation a fortement endommagé ce raccordement et la coupe longitudinale du conduit à texture spongieuse.

D. INTERPRÉTATION

1. DONNÉES STRUCTURALES

La fracturation naturelle très réduite a pu être distinguée de la fracturation dense résultant de l'exploitation. Le réseau karstique est régi seulement par deux directions (fig. 3). La cheminée et son conduit de raccordement sont orientés par une fracturation N.170 dans les marnes et caillasses et par le plan corrodé N.170/56 W.

Le conduit bien conservé longe la ligne de rupture d'une strate résultant d'un glissement banc à banc de direction N.65 (fig. 2). Le déplacement calculé au pied de la cheminée atteint 11 cm. L'ouverture irrégulière de cette déchirure produit un vide qui se ferme à l'opposé du conduit. Le phénomène correspond donc à la rotation de blocs autour d'axes verticaux.

L'absence de corrosion sur la surface totale des parois du vide créé montre qu'il s'est ouvert après l'abandon du réseau de drainage. Mais quelques alvéoles éclatés au sommet du vide révèlent l'antériorité de la fissuration (fig. 4).

2. MORPHOLOGIE FONCTIONNELLE

a) Le conduit est d'une grande fragilité. L'absence de retouches vadose et de comblement impose un régime noyé permanent et une circulation très lente.

b) La cheminée est du type vadose que caractérisent ses parois verticales générées par la direction de la gravité. L'encoche basale est attribuable à une laisse d'eau permanente profonde de quelques centimètres à la base de la cheminée. Les retouches en bénitier correspondent à l'amenuisement de cette laisse.

La pratique spéléologique et le sens de l'écoulement définissent plus aisément cette unité morphologique comme un puits vertical à base elliptique ($0,7 \times 0,9$ m) dont l'affluent a incisé un bord en créant un canyon subvertical fragmenté par deux paliers.

c) Le plan de fracture corrodé porte l'empreinte d'un conduit très aplati, occupant presque toute sa surface. n'ayant pu fonctionner qu'en régime noyé.

d) Rôle de la corrosion en éponge :

L'aspect de surface du plan de fracture est attribuable à la corrosion pariétale subaquatique en éponge dont l'action est, dans ce cas, effectivement accessoire car les alvéoles ne participent pas à la circulation de l'eau et à la régularisation du conduit. Tandis que la texture spongieuse du conduit constitue un réseau de segments de chapelets d'alvéoles emprunté par la circulation. La corrosion en éponge est alors le mode de creusement qui permet le développement d'une circulation.

3. SPELEOGENESE

a) Le conduit s'est formé aux dépens de la fracturation naissante avant que les blocs ne se disjoignent. L'eau a circulé à l'intersection du joint de stratification et de la ligne de rupture du banc inférieur. Celui-ci, très compact, a rejeté la croissance du conduit vers le haut. La base du banc supérieur est sur 1 cm de même nature que les bancs inférieurs mais comporte des anomalies positives de porosité. Cette disposition a sans doute permis au

conduit initial de développer rapidement des petites cloches de dissolution avant d'atteindre le faciès poreux (ces anomalies ont été relevées au cours du sciage du tissu spongieux).

Au contact de la porosité primaire les eaux agressives ne rencontrent pas des possibilités de fuite bien supérieures à celles offertes par le joint de stratification. Cependant, les premières intersections d'alvéoles créent un cheminement hors du joint et permettent définitivement l'établissement d'un flux dans la masse du banc. Les alvéoles et leurs connexions sont ensuite multipliées pour former le conduit observé.

b) Le plan de fracture bien que contemporain du conduit spongieux a évolué différemment. L'ouverture de la fracture semble s'être exprimée plutôt vers le bas.

Le plan de fracture, par nature, est beaucoup plus irrégulier que le joint de stratification et par conséquent les conduits qui les empruntent sont dissemblables :

— la planéité du joint a pour corollaire son étanchéité, seul un défaut supplémentaire, la ligne de rupture permet l'établissement d'un conduit linéaire ;

— la surface gauche des lèvres de la fracture a généré dans le banc un vide de section très aplatie ayant une grande surface projetée.

Une couverture même minime, affectant progressivement un banc de 2,2 m d'épaisseur, produit rapidement un vide appréciable ; pour cette raison, il n'est pas concevable d'envisager une concurrence entre la porosité primaire du banc et la fissure, comme pour le conduit spongieux. Dans ces conditions, la texture spongieuse s'est répartie sur un grand périmètre mouillé sans modifier la structure du conduit plan initial.

c) La cheminée de type vadose est plus tardive mais elle semble bien avoir remplacé le plan de fracture corrodé, très incliné, lors de l'abaissement du plan d'eau. Elle a fonctionné ensuite avec le conduit spongieux sans le détruire, puis l'a sans doute délaissé avant de se fossiliser.

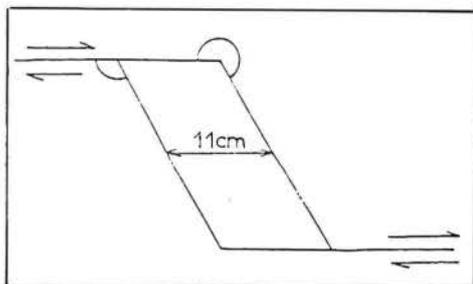


Fig. 4. Formation du diastème par glissement banc sur banc

d) Approche spéléogénétique générale

Les faits tectoniques que nous avons observés dans la carrière d'Antilly, résultent de mouvements régionaux ; les effets de l'exploitation et de la détente du versant ont pu être distingués. De l'apparition des fissures à la rotation d'un bloc, la fracturation s'exprime avec insistance aux mêmes points traduisant l'application progressive d'une contrainte suivant une direction constante. Les relations étroites entre le réseau hydrographique subaérien et le drainage karstique, qu'impose la proximité relative du versant, impliquent une évolution rapide et récente de la fracturation et de la karstification en accord avec les dernières étapes du façonnement de la vallée. Cette précision ne permet, cependant, aucune évaluation de la vitesse de croissance des conduits.

Les fissures initiales générées par cette contrainte ont été rapidement exploitées par le drainage qui a ouvert un conduit aplati dans une fracture subverticale et un conduit «tubulaire» que nous décrivons à l'intersection de deux discontinuités. La contrainte s'est perpétuée et a provoqué la rotation de blocs entiers en rabattant de 3 m au moins le niveau de l'aquifère. Le rabattement est étroitement corrélé avec l'encaissement du réseau hydrographique subaérien, sans quoi, les parois de la déchirure inférieure auraient subi l'empreinte de la corrosion sur toute leur longueur, si le niveau de base était resté stable, ou bien dans le cas contraire, le gradient hydraulique aurait été notablement modifié, entraînant des aménagements de type vadose dans le conduit spongieux.

La cheminée traduit une brève étape charnière entre la période noyée et l'abandon total du réseau observé. Les circulations se font actuellement au niveau de la Grivette, ruisseau qui court devant Antilly. La surface piézométrique est observable à quelques mètres sous le sol de la carrière dans les puits forés par les carriers.

I. COMPARAISONS AVEC QUELQUES RÉSEAUX KARSTIQUES

I. LE BASSIN PARISIEN

1. Basse vallée de la Seine

La surface piézométrique des nappes anciennes et actuelles de la craie est soulignée par un «horizon à potentialité karstique» (A. Tomat, 1984). Nous avons relevé des exemples fossiles de ces horizons en discordance avec la stratification dans les falaises du pays de Caux. Ils s'infléchissent vers le bas à proximité des vallées. La densité de la fissuration n'oblige pas l'écoulement à se concentrer comme à Antilly. Ces horizons correspondent probablement au niveau d'étiage de la nappe.

2. Grotte de la Roche percée au Thuit (Les Andelys, Eure)

Cette grotte s'ouvre dans la craie. La portion du réseau qui nous intéresse forme un ensemble labyrinthique horizontal composé d'une galerie principale flanquée de nombreux conduits méandriformes anastomosés.

Photo 1. Le conduit à texture spongieuse de la carrière d'Antilly.



La croissance des conduits, tous paragenétiques, a été régulière comme le montrent les sections. La forme en baquet de la base sédimentaire fine s'accorde avec l'aire de circulation elliptique. Le remplissage occupe près de la moitié de la section.

L'alimentation est locale car le réseau est bloqué en amont par une zone de broyage empruntée ultérieurement par des puisards remplis de varves de sable et de limon, puis plus récemment, par de l'argile à silex. Cette cavité a fonctionné en régime noyé avec un écoulement lent, sans possibilité de crue importante entraînant un écoulement rapide. Les étiages poussés ne sont pas écartés. Les crues saisonnières d'une paléo-Seine ont pu contrecarrer celles de la cavité et maintenir des circulations lentes.

Ce préambule était indispensable pour mentionner la présence d'un grand nombre de petits réseaux en éponge sous alluviaux dans les galeries. En attendant que le sens de l'écoulement soit partout clairement établi dans cette cavité complexe, nous attribuons ces réseaux en éponge non envahis par les alluvions aux prémices annonçant l'enfoncement du drainage ou à l'alternance d'envolements ou d'étiages.

3. Grotte de la Bosse (Morée, Loir-et-Cher)

Cette cavité de la craie du Turonien a été décrite par Th. Le Roux (1981). Le réseau à tendance labyrinthique est constitué par des conduits paragenétiques de section très aplatie. Il s'est développé dans un banc bioclastique grossier fossilifère poreux surmonté par de la craie blanche litée comportant un niveau à silex. La corrosion subaquatique en éponge couvre entièrement la surface du plafond des galeries par des cupules décimétriques. Lorsque la base de la craie blanche litée est atteinte par les conduits, le foisonnement des petits bancs et la corrosion forment de grandes coupoles. La corrosion est néanmoins responsable de quelques coupoles métriques dans la craie bioclastique.

Les galeries empruntent des fractures souvent observables à la surface des plafonds. La recherche précise des éléments déterminant la position d'un conduit initial est rendue difficile, par la présence au sol d'un dépôt argileux épais finement laminé, comme dans toutes les galeries paragenétiques. L'implantation préférentielle des galeries dans le banc bioclastique montre l'importance du rôle de la

porosité, sans qu'il soit fait appel à des relations étroites entre la circulation interstitielle de la craie et celle des conduits karstiques. Les puits creusés dans la craie ne fournissent des débits appréciables qu'à la faveur de la rencontre de diaclases ou de rivières souterraines.

La susceptibilité des roches à l'érosion chimique et mécanique (fontis) est réglée par les facteurs suivants :

- porosité,
- épaisseur,
- résistance à la flexion.

L'eau, atteinte dans les puits d'accès, est présente sous le réseau à 3 m de profondeur moyenne, et visible en quelques points bas. La vallée du Loir, distante de 1,5 km, coule 30 m plus bas. La grotte de la Bosse est peu influencée par l'encaissement du Loir. Les possibilités de drainage vers le Loir, situé au NW, paraissent contrecarrées par la diversité des formations du Turonien et la structure synclinale de Ménars qui s'enneige, vers le SE, sous la Sologne.

Dans la grotte de la Bosse, la corrosion en éponge, très bien développée, reste un phénomène pariétal.

4. Carrière de Saint-Vaast-les-Mello (Oise)

Le calcaire grossier, qui repose sur les formations sableuses du Cuisien, est perforé par des puits naturels appelés «puisards» comblés par des sables de l'Auvervien. La coupe relevée à Yvillers (commune de Villeneuve-sur-Verberie, Oise) par Ch. Pommerol (1968, in J. du Mouza, 1975) montre les perturbations affectant la sédimentation pendant le Marinésien, le Priabonien et le Stampien inférieur à faciès sannoisien qui résultent d'une karstification sous couverture. Actuellement, l'activité de ces puisards paraît limitée à la périphérie des buttes témoins oligocènes.

Dans les grandes carrières de Saint-Vaast-les-Mello, l'exploitation est entravée par de nombreux puisards et quelques galeries. Les puisards sont comblés par des sables argileux ocres, mêlés parfois de blocs provenant des caillasses du Lutétien terminal lagunomarin. Les galeries et certains puisards sont remplis par des dépôts varvés de sable et d'argile sableuse. Les dépôts de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène ont été érodés, les sables de l'Auvervien rubéfiés recouvrent seuls la dalle calcaire. Le banc royal (grainstone, packstone), épais d'une quinzaine de mètres et très massif, est limité par deux discontinuités majeures. Les structures intraformationnelles, topsets et foresets créent des discontinuités plus discrètes à l'intérieur du banc, exploitables par la corrosion.

Un exemple de corrosion exploitant une structure sédimentaire figée dans l'épaisseur d'un banc est fournie par J. du Mouza (1975, p. 104), dans une carrière dont le nom n'est pas mentionné, montre des vides décimétriques anastomosés presque contigus alignés horizontalement, remplis de sable et soulignant un topset. A St-Vaast-les-Mello, ce phénomène ne prend jamais cette ampleur, mais en plusieurs points, la corrosion porte très loin son action hors des conduits et des diaclases. Il est très fréquent d'observer, dans le front de taille, à proximité des puisards et des conduits horizontaux sur diaclase, des alvéoles pluricentimétriques s'organisant en chapelet le long des topsets, et en nuage parmi les foresets. Ces alvéoles de petites dimensions ne sont pas, en général, envahies par le sable. Quelquefois un conduit fantôme s'exprime par une section de roche pourrie s'écrasant sous la pression d'un doigt. Le remplissage sableux a accompagné avec quelque retard la karstification du banc royal sous les sables auverviens car le sable est fréquemment classé et stratifié dans les puisards et les galeries.

Les voies de pénétration peuvent être clas-

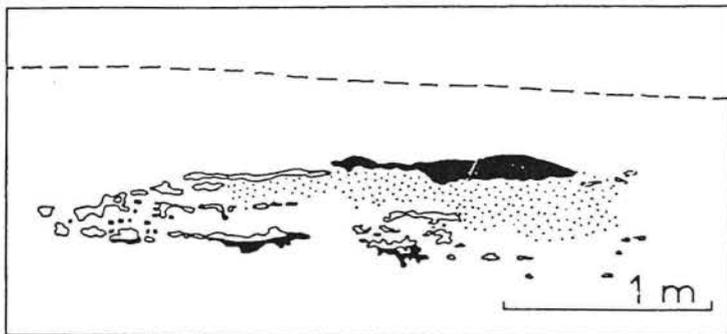


Fig. 5. Section d'un conduit de la carrière de St-Vaast-les-Mello :

- à plat noir : dépôts sableux laminés
- points : texture spongieuse
- non poché : alvéoles simples et coalescents
- tirité : figuration d'un topset accusé.

sées par ordre de difficulté croissante :

- diaclases verticales,
- topsets,
- foresets,
- niveaux bien vannés (grainstones typiques).

Les nuages d'alvéoles constituent en bordure des puisards et sous un conduit (fig. 5) de véritables petits réseaux en éponge s'affranchissant de la fracturation et du litage. Avec le remplissage les différences entre les conduits et l'encaissant à porosité d'interstices s'estompent. Certains aspects caractéristiques d'un karst typique persistent comme l'existence de conduits, cependant la mise en charge d'un drain ne peut provoquer une accélération considérable de la vitesse d'écoulement. Les relations entre les conduits et les blocs s'apparentent à celles des drains et des systèmes annexes décrits par A. Mangin (1974). La formation des alvéoles en chapelets ou en nuages résulterait de l'alternance de mises en charge « statiques » saisonnières et de décrues lentes, ne provoquant pas nécessairement leur invasion par du sable ou de l'argile. Il n'existe pas, à St-Vaast-les-Mello, de fossilisation de l'image d'un niveau piézométrique ancien par ce mécanisme, seuls les sites les plus favorables ont été exploités.

B. LE SUD-EST DE LA FRANCE

L'illustration sera restreinte à deux cavités ardéchoises comportant des formes en « éponge » mentionnées par Y. Callot (1979). La porosité totale des faciès urgoniens est généralement faible et s'oppose à celle de la craie et des calcaires lutétiens du bassin parisien.

1. Aven de la Forestière (Orgnac l'aven, Ardèche)

Nous avons observé personnellement une fracturation intense dans l'aven situé sur la crête d'un anticlinal pris en écharpe par un décrochement sénestre passant plus au Nord. La texture en éponge s'est développée à partir de joints de stratification, puis s'est insinuée dans le diaclasage de pas décimétrique. La roche prend effectivement l'aspect d'une éponge, mais la texture demeure contrôlée par la fracturation.

L'aven de la Forestière s'ouvre à 367 m d'altitude dans le bois de Ronze dont le sommet se raccorde à une surface d'érosion ancienne. Les traces de creusement phréatique héritées, très bien conservées, sont attribuables soit à l'Albo-cénomannien, soit plus vraisemblablement selon Y. Callot (1979) au Quaternaire pendant lequel un pergélisol aurait permis la réactivation d'une cavité proche de la surface.

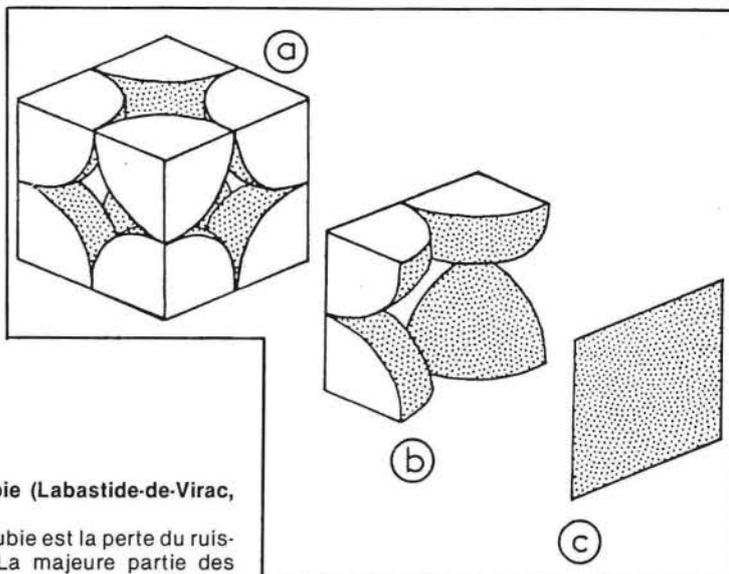


Fig. 6. Variation de l'aire de contact roche-eau selon la texture (figuration de la rugosité d'un arrangement cubique) :

a) pore central (grainstone : $R = \pi$)

b) demi-maille (grainstone : $R = \pi/2$)

c) face de référence (mudstone : $R = 1$)

Selon le recul de la paroi, la rugosité varie de $\pi/2$ à $3\pi/2$.

2. Goule de Foussoubie (Labastide-de-Virac, Vagnas, Ardèche)

La Goule de Foussoubie est la perte du ruisseau de la Planche. La majeure partie des eaux et la charge solide abondante qui transitent dans les réseaux pénétrables de la Goule proviennent du cours superficiel. Ils confèrent un cachet subaérien au réseau principal amont qui mime le Rieussec. Ce cours d'eau allogène, qui rejoint l'Ardèche en amont de l'Event de Foussoubie, entaille profondément le massif calcaire en aval-pendage du réseau. Ces particularités régressent par paliers et, arrivé au camp de base, le réseau souterrain retrouve son identité.

L'aval de la galerie principale de la Goule est très corrodé, Y. Callot emploie le terme de corrosion en éponge pour le décrire. Il nous paraît nécessaire de compléter cette description en distinguant la présence de deux types de corrosion :

a) la corrosion subaquatique façonne le périmètre mouillé dans les laisses d'eau. Elle ne participe à la création de nouveaux conduits qu'au voisinage des seuils. Les formes sphériques élémentaires de tailles diverses peuvent être métriques. La rugosité des surfaces ne dépend que du grain de la roche.

b) La corrosion aérienne et atmosphérique impressionne les parois d'une multitude de cupules centimétriques au-dessus du plan d'eau. Elle résulte d'échanges entre les parois et l'eau tels que les embruns et les condensations. La corrosion atmosphérique hypogée peut engendrer une texture en éponge superficielle mais le toucher rugueux extrême des parois exclut toute confusion.

Ces distinctions énoncées, il apparaît que la corrosion subaquatique, qui donne aux conduits un aspect en éponge spectaculaire, est représentée dans tout le réseau de Foussoubie à chaque laisse d'eau importante. La corrosion atmosphérique hypogée est seule caractéristique du réseau principal aval même si la corrosion subaquatique en éponge y est mieux développée (galerie du Gruyère). Il semble d'après les mesures de reconnaissance effectuées sur le terrain (G.R.B., 1972) pendant l'été que l'eau des vasques, provenant du ruisseau de la Planche, acquiert une légère agressivité. Elle est créée et entretenue par les infiltrations et l'ambiance confinée. Des sites de percolation importante localisée, comme le puits de l'Hexagonaria de morphologie acérée, permettent d'opposer les eaux des retenues proches de la saturation aux eaux d'infiltration directe beaucoup plus agressives.

Nous retiendrons que la corrosion en éponge, subaquatique, est liée à la stagnation d'eau peu agressive et que le creusement est proportionnel au temps et dépend de l'entretien d'une agressivité très modérée. Les formes considérées caractérisent l'aspect du réseau sans modifier son tracé.

III. REMARQUES SUR LA POROSITÉ ET LA DISSOLUTION

DÉFINITIONS ET DONNÉES GÉNÉRALES

1. La porosité

On distingue les terrains à perméabilité directe d'interstices des terrains à perméabilité indirecte de fractures ou de fissures acquises secondairement. Selon la prépondérance de la porosité ou de la fracturation, le drainage des roches calcaires est assuré par des circulations phréatiques interstitielles ou par des réseaux aquifères karstiques.

La porosité ouverte participe seule aux échanges, elle demeure le plus souvent très inférieure à la porosité totale. Ainsi des mesures dans la craie révèlent une porosité totale élevée (30 à 40%) et une porosité efficace très réduite sous les plateaux (0,5 à 1%). Dans les thalwegs la porosité efficace est multipliée par 10 (J. Rodet, 1981) sans doute accrue par le transit phréatique horizontal et la détente des versants.

Les deux modes de circulation dans les calcaires sont bien distincts. Un mode transitoire utilisant activement la porosité et la fracturation, ne semble pouvoir se développer car ces deux facteurs paraissent antagonistes. En effet, lorsque la fracturation est dense, la porosité voit son rôle restreint tandis qu'une porosité ouverte élevée n'impose pas la concentration de l'écoulement. De plus la porosité fragilise la roche quand le gradient hydraulique est faible, et participe au colmatage des fractures. Ce dernier cas est bien illustré par la craie où les réseaux karstiques sont rares, et s'installent à la faveur de versants escarpés. Ils sont généralement de petites dimensions et tronqués par le recul des versants.

2. La rugosité

Les eaux, parcourant les réseaux décrits, circulent très lentement ou subissent de longues périodes de stagnation. Dans le cas d'un réseau noyé, l'interface eau-air disparaît et les eaux tendent vers la saturation. La vitesse des réarrangements ioniques dans la phase liquide devient bien plus grande que la vitesse de transfert de matière à l'interface solide-liquide (H. Roques et A. Girou, 1974). La disso-

tion est contrôlée par l'aire de contact roche-eau et dépend, par conséquent, de la rugosité (A. Burger, 1975 citant A. Gerstenauer et al., 1966).

La rugosité peut être évaluée en calculant dans le matériau isogranulaire, le quotient de surface exposée d'une maille élémentaire par celle de sa section. En prenant le système cubique comme exemple (fig. 6), nous constatons que la rugosité peut s'accroître considérablement si le pore central est exposé avec la roche. Le rapport s'établit à $\pi/2$ pour une face $3\pi/2$ si le pore contigu participe aux échanges. Ces valeurs de comparaison sont des constantes vérifiables à l'intérieur des systèmes orthorhombique et rhomboédrique. L'arrangement commande les dimensions de la maille, sa densité et sa porosité. Le calcul approché des sections permet d'exprimer la rugosité en fonction système présentant la porosité maximale. Les valeurs fournies sont complétées par celles de la porosité :

- amorphe	0,64	0%
	(calcaire lithographique)	
- cubique	1	48%
- orthorhombique	1,15	40%
- rhomboédrique	1,26	26%

La maille la plus compacte est la plus perméable mais son pore central est moins accessible.

Les conditions naturelles sont bien plus complexes, cependant nous relevons l'importance particulière de pores nombreux partiellement interconnectés n'entraînant qu'une perméabilité efficace réduite, mais suffisante pour la formation d'un épiderme de roche « pourrie » semblable à celui observé à Antilly et à St-Vaast-les-Mello.

Expérimentations sur la dissolution

Dans un calcaire pur ou un marbre, A.N. Palmer (1981) a montré qu'au-delà d'un certain seuil la vitesse de circulation ne pouvait accroître la dissolution dans les conditions d'agressivité des eaux naturelles. Le temps était donc le seul facteur de la dissolution aboutissant à la création de vastes conduits indépendamment des limites et insuffisances et autres facteurs. Le calcaire d'Antilly comporte une porosité mesurée dans les septes atteignant 46%. Ces vides participent au moins passivement au recul des parois, mais si ne peuvent par leur ordre de grandeur modifier les conclusions de l'expérimentation précédemment citée.

D'après nos indices, la vitesse de dissolution d'un calcaire poreux en eau stagnante pourrait être 6,2 fois supérieure à celle d'un marbre très pur. Des expériences réalisées notamment sur un calcaire à milioles et un marbre des Pyrénées (P. Verdeil, 1961) fournissent des résultats de même ordre de grandeur. Elles révèlent également l'importance d'une part de la fragmentation, et d'autre part, et la composition chimique et de la cristallinité :

- les vitesses d'attaque maximales sont obtenues sur des matériaux peu karstifiables dans les conditions naturelles, car ils contiennent trop d'impuretés comblant la fissuration;

- les vitesses minimales correspondent aux matériaux calcaires les plus purs et les plus paritiques. A l'encontre de ce constat défavorable, les massifs de calcaire métamorphique ont une remarquable aptitude à la karstification, sans doute parce qu'il n'existe pas de relation directe entre le potentiel d'un conduit et celui d'un massif.

De ces expériences, nous retiendrons les principaux caractères pétrographiques suivants favorables à la croissance d'un conduit :

- présence discrète d'impuretés,
- hétérogénéité souvent d'origine granulaire,
- cristallisation fine (micritique).

En cet énoncé, nous ajoutons la porosité

ouverte ou non qui participe passivement au retrait des parois selon le rapport des densités :

$$- \text{Antilly} : \frac{2,7}{1,47} = 1,84$$

IV. LES RÉSEAUX EN ÉPONGE

A. REVUE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS

1. Définitions en usage

Parmi les réseaux labyrinthiques caractérisés par leurs multiples interconnexions, les réseaux en éponge forment un groupe distinct dont la description suit :

- imbrication de cavités, comme les pores d'une éponge, s'observant à diverses échelles, dues à la dissolution dans la zone saturée (noyée) sans courant défini (J.N. Jennings, 1971) apparemment commandée par le hasard (A.N. Palmer, 1975). Les cavités les plus spacieuses proviennent d'un réseau en éponge initial dont les pores se sont accrues jusqu'à la disparition des septes (J.H. Bretz, 1942).

2. Classification des sites

A.N. Palmer a relevé les trois situations suivantes et leurs particularités :

a) buttes résiduelles dans les plaines alluviales,

- recharge globale par la nappe alluviale,
- infiltrations diffuses depuis la surface;

b) tronçon d'un réseau de drainage submergé disposé en amont d'un obstacle ou d'une étroiture,

- submersion temporaire pendant les crues,
- augmentation locale du périmètre mouillé et ralentissement important de l'écoulement;

c) porosité primaire centimétrique entrant en compétition avec la fracturation dans les calcaires récifaux.

B. COMPLÉMENTS

1. Morphologie et drainage

a) alvéoles, cupules, coupoles de corrosion

Dans les roches compactes, les alvéoles naissent le long de la fracturation et atteignent souvent de grandes dimensions (coupoles). Il en est de même dans les roches poreuses mais elles sont principalement caractérisées par la multiplication de petites alvéoles sur toute la surface des parois.

Une retenue, en amont d'un seuil, équivaut à une alvéole de grande dimension. La capacité de stockage par unité de surface mouillée croît avec l'importance de la retenue et assure sa prédominance sur les alvéoles adjacentes de taille inférieure. Les fissures ouvertes, les anomalies sédimentaires (joints, progredations, cavités intrarécifales) semblent seules pouvoir porter l'action de la corrosion, au-delà de la paroi, sans être rapidement digérées. Il est possible qu'à Antilly la formation des alvéoles ait été précédée par celle d'un tube de roche « pourrie » comme ceux observés à St-Vaast-les-Mello.

Il est possible qu'à Antilly la formation des alvéoles ait été précédée par celle d'un tube de roche « pourrie » comme ceux observés à St-Vaast-les-Mello.

b) Drainage

L'emploi du terme réseau suggère l'existence d'un drainage et d'un sens d'écoulement. Or, les conduits aveugles caractérisent les réseaux en éponge. Parallèlement, les étroitures et les élargissements se succèdent en défiant les règles de calcul d'un réseau artificiel.

A Antilly, la fonction du conduit a évolué de l'origine de la fissure à l'ouverture des alvéoles, la fonction de drain est supplantée par celle de magasin. En règle générale, lorsque la section d'un conduit de drainage s'élargit,

la hiérarchie du réseau s'affirme et entraîne l'accroissement des débits instantanés. L'épaisseur réduite du massif et la couverture de sables du Bartonien n'ont pas permis une extension notable de l'aire d'alimentation du conduit. La croissance du conduit initial s'est donc bornée à créer une fonction de stockage sans modification sensible de la capacité de drainage. Cette évolution éclaire l'absence de remplissage et la préservation des septes. Par ailleurs, la couverture doit estomper les différences entre le fonctionnement des drains de l'aquifère épikarstique et celui des effluents (A. Mangin, III, p. 95).

c) Principales remarques

- Les réseaux en éponge constituent des ensembles capacitifs peu transmissifs.

- L'accroissement des sections n'entraîne pas une modification importante du drainage.

- Les réseaux de drainage maillés ou anastomosés noyés sont aussi exploités par la corrosion en éponge.

- Dans un conduit noyé de taille métrique, l'écoulement intermittent est le mode susceptible de produire les vitesses moyennes annuelles de circulation les plus faibles avec le minimum de contraintes.

2. Classification des sites

La classification a été établie d'après les caractéristiques du réseau de drains principaux des systèmes karstiques :

- **réseaux à faible pente, ennoyables** : Les systèmes capacitifs, peu transmissifs, susceptibles d'accroître leur volume sans modifier l'efficacité du drainage, sont localisables entre la tête et l'exutoire (A. Mangin, III), accolés au réseau le long des portions horizontales et en amont des étroitures où ils subissent alternativement irrigation et drainage pendant les crues successives. Nous ne connaissons pas d'exemples importants hormis le cas où de petits massifs sont ceinturés par une nappe alluviale, reproduisant le mécanisme cité plus haut.

- **réseaux à pente moyenne à forte** : Les réseaux de drainage principal peuvent être ennoyés soit pendant leur parcours, soit vers leur exutoire, à cause d'une hétérogénéité géologique affectant le massif, ou bien à l'extérieur par le comblement alluvial de la vallée. Les crues doivent être violentes et espacées par des étiages sévères nécessaires à la création de vides aberrants qui par la suite allègeront les contraintes de fonctionnement. Ces réseaux suivent fréquemment le pendage au plus près.

- **réseaux des tables calcaires peu surélevées** : Les structures géologiques horizontales atténuent les différences entre les drains principaux et les systèmes annexes. Ils participent conjointement à la création de morphologies spongieuses. Ces tables ne doivent pas comporter une couverture de roche imperméable ou indurée concentrant les infiltrations.

V. CONCLUSION

Le rôle de la porosité n'est pas négligeable, elle participe passivement par l'intermédiaire de la densité de la roche et de la rugosité des parois. Lorsque les échanges entre deux milieux perméables en petit, comme le calcaire poreux d'un conduit et son remplissage finement sableux, sont capables d'engendrer des réseaux de conduits spongieux (sans remplissage) en l'absence de fissuration ou de structure sédimentaire perceptible, l'origine karstique ou phréatique devient équivoque. La participation de la porosité efficace aux échanges et à la concentration des effluents n'est attestée que par la présence de sections

de roche «pourrie», observable en carrière, dans la masse de bancs poreux.

Dans les réseaux de plateau, la rugosité et la lenteur des circulations concourent à l'épuisement du potentiel d'agressivité chimique, compensant la faiblesse du potentiel mécanique. Ce rôle pourrait être particulièrement important dans les systèmes annexes.

Pour compléter la description et l'interprétation des réseaux en éponge, nous proposons la distinction de deux types :

— **les réseaux primaires**, parcourus par des circulations faibles, lentes, intermittentes et de sens alternatif, formant les systèmes annexes d'un drainage souterrain ou sous-alluvial subaérien ;

— **les réseaux secondaires**, parcourus par des circulations rapides, intermittentes marquées par de longues périodes de stagnation, développés aux dépens d'un réseau de drainage principal noyé. Ce type est secondaire car il prend son essor quand les drains délaissent leur rôle.

Les deux processus collaborent étroitement, dans les régions de plateaux structuraux peu surélevés, à la formation de grands réseaux mixtes.

REMERCIEMENTS

Nous remercions très vivement Pierre Mouriaux qui nous a assisté fréquemment sur le terrain et dans la rédaction.

Malgré la brièveté de l'exposé, réduit à 10 mn lors du congrès, MM. P. Renault et J. Rodet ont pu formuler des remarques portant respectivement sur la porosité et les études antérieures, nous en avons tenu compte dans la rédaction définitive.

Jacques CHEDHOMME

BIBLIOGRAPHIE

BIBI (A.) - 1978 - Appunti di geomorfologia ipogea. **Atti V Cong. reg. speleol., Trentino.** Alto Adige, Lavis, p. 19-46.

BRETZ (J.-H.) - 1942 - Vadose and phreatic features of limestone caverns. *J. Geol.*, 50 : 675-811.

CALLOT (Y.) - 1978 - A propos des plateaux ardéchois... Univ. de Reims, 429 p.

BURGER (A.) - 1975 - Chimisme des roches et de l'eau karstiques. Hydrology of karstic terrains. Chap. VII, p. 79-89, *Int. union of geol. sc., ser. B, 3*, Paris.

GERSTENHAUER (A.), PFEFFER (K.H.) - 1966 - Beiträge zur Frage der Lösung-freudigkeit von Kalkgesteinen. *Abhandl. z. Karst u. Höhlenkunde, Reihe A, H. 2*, 48 s.

JENNINGS (J.N.) - 1971 - Karst. An introduction to systematic geomorphology. Vol. 7. The MIT Press, London.

LE ROUX (Th.) - 1981 - La grotte de la Bosse, **Spe-lunca**, 5 (2) : 10-11.

MANGIN (A.) - 1974 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse d'Etat, *Ann. de spéléo.*, 29 (3) : 282-332, 29 (4) : 495-601, 30 (1) : 21-124, CNRS Paris.

MOUZA (J. Du) - 1975 - Les cavités souterraines de la région parisienne. Classification, conditions d'existence, méthodes de détection. Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VI, 287 p. 100 pl.

PALMER (A.N.) - 1975 - The origin of maze caves. **Nation. Speleological soc. bull.**, 37 (3) : 56-76.

PALMER (A.N.) - 1981 - Hydrochemical factors in the origin of limestone caves. **8th Inter. Congr. of speleol.**, Bowling Green 1 : 120-122.

RENAULT (Ph.) - 1967 - Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse. **Ann. de spéléo.**, 22 (1) : 5-21, 22 (2) : 209-267, 23 (1) : 259-307, 23 (3) : 529-593, 23 (3) : 594-596, CNRS Paris.

RODET (J.) - Contribution à l'étude du karst de la craie : l'exemple normand et quelques comparaisons. Thèse 3^e cycle géogr., Paris I, 427 p.

ROQUES (H.) - 1967 - Chimie des carbonates et hydrologie karstique. **Mém. et doc.**, nouv. ser., vol. 4, Phénomènes karstiques I : 114-141, CNRS Paris 1972.

ROQUES (H.), GIROU (A.) - 1974 - Etude cinétique de la précipitation des carbonates de calcium. **Mém. et doc.**, nouv. ser., vol. 15, Phénomènes karstiques II : 27-38.

SCHNEEBELI (G.) - 1966 - Hydraulique souterraine. **Coll. centre de rech. et d'essais de Chatou.** Eyrolles éd.

TOMAT (A.) - 1984 - La grotte Ornée d'Orival. **Spe-lunca** 5 (13) : 36-39.

VERDEIL (P.) - 1961 - Principes généraux de la karstification. **Spelunca Mémoires** 1 : 19-21.

Remarque de J. RODET : l'exemple présenté illustre parfaitement une morphologie de conduits à genèse phréatique, à écoulement très lent, donnant cet aspect vacuolaire, carié, des parois. C'est le témoignage d'une phase d'ennoiement (élévation du niveau de base) comme le karst de la craie du Bassin de Paris en offre de très nombreux exemples. Il ne me semble pas nécessaire de faire appel à la porosité pour expliquer cette morphologie puisqu'on observe des exemples comparables dans l'aven de Combe-Albert (Causse Bégon, Gard) dans les calcaires jurassiques des Causses majeurs et dans le «gruyère» de la grotte de Couffin (calcaires crétacés inférieur à faciès Urgonien du Vercors). Il s'agit d'un aspect important des karsts de plateau.

A PROPOS DES ACTES

En mai 1985, les spéléologues lorrains ont reçu le XVI^e Congrès National de Spéléologie. Celui-ci proposait le déroulement suivant :

- *L'Institut de Géographie de Metz (M. Sary et J. Corbonnois) recevait du 23 au 25 mai, les «Journées Jean Corbel», organisées avec l'A.F.K. et la Commission de la Dénudation Karstique de l'U.I.S. (Pr. J. Nicod).*
- *L'Université de Nancy I (M. Bareth) accueillait une réunion de Biospéologie, les 23 et 24 mai.*
- *L'Université de Nancy II (M. Bur) abritait, aux mêmes dates, la réunion d'Archéologie souterraine, particulièrement orientée vers le Nord-Est français.*

Le Congrès proprement dit se tenait du 25 au 27 mai à Saint-Nicolas de Port, organisé par les Lorrains. Dans ce congrès, se tenaient le 25 mai après-midi, les tables rondes, conclusions des journées scientifiques.

La réussite de cette importante manifestation reposait sur une profonde collaboration entre :

- *la LISPEL (Ligue Spéléologique de Lorraine, région L),*
- *la Commission Scientifique de la F.F.S.,*
- *les Archéologues,*
- *la Commission Presse Fédérale de la F.F.S.,*
- *et plusieurs commissions fédérales et les régions voisines.*

Les trois colloques scientifiques mis en place par Daniel Prévot, Jean-Paul Fizaine et moi-même, sous la direction de Gérard Aimé (archéologie), Jacques Chauvin (biospéologie) et Patrice Gamez (karstologie), ont connu des succès divers, en fonction des soutiens que nous avons obtenus, mais des succès certains.

La réussite globale de ces journées scientifiques, à laquelle il convient d'associer nos collègues lorrains qui avaient pris en charge toute l'organisation du congrès fédéral, a largement dépassé nos espérances. Tellement dépassé, qu'elle nous a dépassés, largement. Et le soir de fermeture, nous nous sommes trouvés confrontés à l'énorme problème de la publication. Bien sûr, nous avons eu des propositions de nos collègues universitaires, mais elles ne répondaient pas alors, dans l'esprit, à ce que nous souhaitions réaliser.

Malheureusement, alors qu'une tâche énorme nous attendait, un maillon majeur de notre organisation fédérale nous lâchait, victime de son dévouement et du surmenage. Il nous a fallu parer au plus pressé, et malheureusement la Fédération a dû sauver le quotidien, Spelunca, avant d'éditer les Actes. Cette expérience, malheureuse, car elle ne nous a pas permis de respecter nos engagements envers les participants, aura montré notre faiblesse. Il reste beaucoup à faire pour que la F.F.S. redevienne une organisation sans raté, malgré le bénévolat qui est sa cheville ouvrière.

Alors au moment de livrer enfin ces Actes, au nom des organisateurs, je présente les excuses de la Fédération à tous ceux qui nous avaient fait confiance, et j'adresse mes remerciements à ceux qui ont su mener jusqu'à terme l'ouvrage : Bernard Bordier, Roger Laurent et les autres...

Joël RODET
Commission Scientifique de la F.F.S.

TABLE DES MATIERES DU XVI^e CONGRES NATIONAL DE SPELEOLOGIE ET DES COLLOQUES SCIENTIFIQUES

G. DUCLAUX (<i>Président de la FFS</i>) : Editorial	p. 2
D. PREVOT (<i>Responsable du congrès</i>) : Présentation du XVI ^e congrès	p. 3
J. RODET (<i>Directeur de la commission scientifique</i>) : A propos des Actes	p. 155

1 - COLLOQUE D'ARCHEOLOGIE

G. AIME : Introduction	p. 6
Liste des participants	p. 6
B. ANCEL : Le secteur minier du Neuenberg : architecture, organisation et évolution dynamique d'exploitations minières de la seconde moitié du XVI ^e siècle	p.7
M.-Ch. BAILLY-MAITRE : L'Argenterie de Brandes, une exploitation minière médiévale (XIII ^e -XIV ^e siècles)	p.9
J. et Y. GRANDEMANGE : Archéologie minière à Sainte-Marie-aux-Mines, le secteur de l'Altenberg	p. 11
B. ANCEL : Les puits de mine au XVI ^e siècle, architecture et boisage	p.14
B. BOHLY, P. FLUCK et F. LIBELIN : Le problème de l'exhaure dans les mines vosgiennes	p.15
P. BENOIT: Le roulage dans les mines européennes aux XV ^e et XVI ^e siècles	p. 21
C. MOURET : Les griffades d'Ursidés de la grotte de Fontille Chasteaux, Corrèze	p.22
L. GRATTE : Plaidoyer pour un art dégénéré	p. 33
G. AIME : Les abris sous roche de Bavans (Doubs),une chronostratigraphie de plus de douze millénaires	p. 36
A. THEVENIN : La grotte, principale source de données chronostratigraphiques en Préhistoire : l'exemple du Tardiglaciaire et du début du Postglaciaire en France	p. 41

2 - COLLOQUE DE BIOSPEOLOGIE

J. CHAUVIN : Introduction	p. 46
Liste des participants	p. 46
C. BARETH : <i>Campodea (C) leclerci</i> N.S.P. de la grotte de Puechredon (Gard) (Diploures Campodéidés)	p. 47
J. CHAUVIN : Etude des biocénoses de quelques puits artificiels du département de la Marne : comparaison avec les peuplements du massif karstique de la Montagne de Reims	p. 49
J.-P. HENRY : Présence de l'Isopode cavernicole <i>Proasellus cavaticus</i> en Seine-Maritime dans la zone Intertidale	p. 53
G. MAGNIEZ : Les Crustacés Isopodes aquatiques souterrains du SW de la France : faunistique et biogéographie	p. 55
J. CHAUVIN : Une nouvelle espèce de Collembole dans des cavités lorraines	p. 57
Ph. DROUIN : Les chauves-souris calcitées du gouffre du Petit-Clamart, la Burbanche, Ain	p. 59

3 - COLLOQUE DE KARSTOLOGIE

J. NICOD : Introduction _____ p. 62

Liste des participants _____ p. 63

I - JOURNEES INTERNATIONALES EN SOUVENIR DE JEAN CORBEL (Président de séance: M.M. SWEETING)

P. RENAULT : Jean CORBEL (1920-1970) et l'évolution des idées sur le karst
au cours de la période 1955-1965 _____ p. 65

M.M. SWEETING : The work of Jean CORBEL In the British Isles _____ p. 68

R. LAURENT : Les travaux scientifiques de Jean CORBEL sur le karst ; rétrospective
et orientation bibliographique _____ p. 69

II - LIVRET-GUIDE DES EXCURSIONS (extraits)

P. GAMEZ : Morphogenèse et karstogenèse en Woevre septentrionale: l'interfluve
Loison-Othain _____ p. 73

J. RODET : Karst de la craie de la Cuesta d'Ile- de-France: la Montagne de Reims
orientale _____ p. 75

P. GAMEZ, F. LETOUZE et M. SARY : Le bassin karstique de l'Aroffe _____ p. 78

P. GAMEZ : Etude géochimique et hydrodynamique de l'Aroffe et de l'Aar
(Thèse de 3° cycle: Michelle THILLAY) - Résumé par P. GAMEZ _____ p. 79

III - ABLATION KARSTIQUE (Président de séance: J. NICOD)

A. KRANJC : Un exemple de corrosion sur les galets carbonatés _____ p. 80

J.-J. DELANNOY : Contribution à l'étude hydrodynamique et de l'ablation karstique
dans le géosystème Coulmes-Choranche _____ p. 81

J. MAZET : Mesure de la décarbonatation dans les sols fersiallitiques du massif
de la Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône, Var) _____ p. 85

F. CUCCHI, F. FORTI, S. STEFANINI et F. ULCIGRAI : Mesures de dégradation
de roches carbonatées et d'accroissement de stalagmites _____ p. 87

S. STEFANINI, F. ULCIGRAI, F. FORTI et F. CUCCHI : Résultats expérimentaux
sur la dégradation des principaux lithotypes du karst de Trieste _____ p. 91

U. SAURO : La recherche sur l'érosion karstique en Italie _____ p. 95

P. FLUCK : Eléments de climatologie du milieu souterrain minier d'autrefois _____ p. 97

C. EK, A. BRIFFOZ et M. GEWELT : L'élargissement des conduits karstiques
sous l'action d'eaux saturées _____ p. 100

IV - CONCRETIONNEMENT (*Président de séance* : C. EK)

- J.-P. ADOLPHE et A. WEISROCK : Différentes formes de concrétionnement carbonaté d'origine biogénique au Maroc Atlantique et leur logique de développement _____ p. 101
- J.-P. ADOLPHE et al. : Etude expérimentale de la redistribution du ⁴⁵Ca par intervention de microorganismes _____ p. 106
- M. BAKALOWICZ : Le concrétionnement souterrain dans les grottes de Niaux-Lombrives et Sabart (Pyrénées ariégeoises) au cours du Quaternaire. Mise en évidence des facteurs favorables et défavorables _____ p. 109
- C. MOURET : typologie des gours du karst tropical de Sagada (Philippines) _____ p. 113

V - BASSINS KARSTIQUES (*Président de séance*: U. SAURO)

- C. MOURET et Y. BOUSQUET : La partie centre-ouest du karst de Sagada (Luzon, Philippines) _____ p. 117
- C. GRIOLET et M. HALLER : Le réservoir karstique de la cote de Delme _____ p. 123
- J. CORBONNOIS, P. GAMEZ et M. SARY : Le régime des transports solides et dissous dans le karst couvert de la Dalle d'Étain (interfluve Loison-Othain, Lorraine septentrionale) _____ p. 129
- F. LETOUZE : Contribution des données d'hydrologie de surface à l'étude du comportement du bassin karstique de l'Aroffe _____ p. 137

VI - GENESE DU KARST (*Président de séance*: H. TRIMMEL)

- G. CORRA : Doline e polje nelle colline di Verona _____ p. 140
- S. GALDENZI : Il carsismo nei calcari pelagici dell'Appennino umbro Marchi Giano il ruolo degli orizzonti impermeabili della canalizzazione sotterranea in una catena di pieghe _____ p. 143
- M. CHARDON : eaux et circulation karstique sur le plateau de l'Alpe d'Huez (Isère) _____ p. 147
- J. CHEDHOMME : Description d'un conduit en éponge et d'un mode de circulation, approche de la spéléogenèse dans un horizon calcaire lutétien de perméabilité totale élevée dans l'Est parisien _____ p. 149



SPELUNCA (4° série) Mémoires (série reprise depuis 1961)

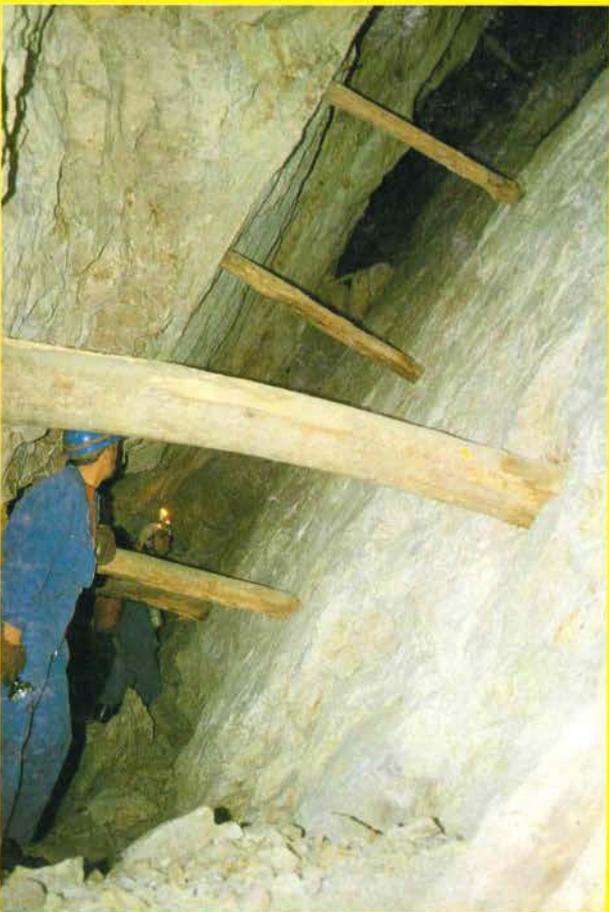
numéro	Actes des Congrès nationaux de spéléologie	diffusé par
1	III° Congrès (Marseille 3-6 juin 1960) 107p.	X
2	IV° Congrès (Belfort-Belvaux - 9-11 juin 1962) 160p.	X
3	V° Congrès (Millau, 1-4 juin 1963) , 252p.	X
4	VI° Congrès (Valence 16-18 mai 1964) ; 224p.	X
5	VII° Congrès (Bordeaux 28-30 mai 1966), 356p.	X
6	VIII° Congrès (Draguignan, 7-9 Sept. 1968) ,95p. ne comporte que le résumé des communications avec les principaux résultats scientifiques.	X
7	IX° Congrès (Dijon, 16-18 mai 1970), 154p.	X
8	XI° Congrès (Périgueux, 1-4 mai 1974), 262p.	épuisé
sans n°	XII° Congrès (Grasse, 5-7 juin 1976), 200p.	X
10	XIII° Congrès (Thonon-les-Bains, 13-14 mai 1978) ronéo, 136p.	X
11	XIV° Congrès (Istres, 3-4 juin 1980) , 120p.	X
12	Colloque de Seyssins (6-8 juin 1981) , 148p. (intitulé à tort n° 11)	X
Spelunca (5° série) Mémoires (*)		
13	XV° Congrès (Hyères, 21-23 mai 1983), 120p.	X
14	XVI° Congrès (Nancy-Metz, 23-26 mai 1985).	X
15	Antipodes 1985 - rapport des expéditions nationales "Papou 85" et "Niugini 85" en Papouasie Nouvelle-Guinée	sous-presse
16	GUIZHOU, rapport expédition en Chine (Club des Jeunes Années, Vénissieux)	sous-presse
Formats: du n°1 au n°8 - in 8° raisin (16x25) - ensuite in 4° int. (21x29,7)		
Publications en vente à la FFS : X 130 , rue St.Maur - F - 75011 Paris X 23 rue de Nuits - F - 69004 Lyon		

(*) **LAURENT, R.** et **GRATTE, L.** (1984) : A propos des Spelunca Mémoires - Buts et perspectives offerts à la V° série de nos Spelunca Mémoires. - Spelunca Mémoires n°13, Actes XV° Cong. Nat. Spéléol., Hyères 1983, p.3-4

Illustrations dernière page de couverture:

- 1 *Camille EK (Secrétaire-adjoint de l'UIS) buvant le verre de l'amitié avec Henri Paloc dans une cave champenoise (Cliché RL)*
- 2 *Niphargus virei O (Crustacé Amphipode) - (Cliché J.L.Reygrobelle)*
- 3 *Ancienne mine du VERDY (Rhône) - (Cliché J.Cl. Garnier)*
- 4 *Rassemblement à St-Nicolas-du-Port: de gauche à droite Y..AUCANT - B.LISMONDE - C.LOCATELLI - P.RIAS, de dos LE PENNEC. (Cliché RL)*
- 5 *"Bouillons" dans le village de DELUT (Meuse) - (Cliché RL)*

Actes du XVI^e Congrès national de spéléologie (NANCY-METZ 1985)



1

5

2

3

4