

Université de Liège

INV. : 9629
COTE : TH 0348 (E)

Laboratoire de Géologie et Géographie physique

Camille Michel **E K**

Facteurs, Processus et Morphologie karstiques dans les Calcaires paléozoïques de la Belgique

**A CONSULTER
A LA BIBLIOTHEQUE**

TROISIEME PARTIE

MORPHOLOGIE ET GENESE DES GROTTES

Université de Liège
UNITE DE DOCUMENTATION
DES SCIENCES DE LA TERRE
Esplanade de l'Université B6d
B-4000 LIEGE (BELGIQUE)
Tél. +32-(0)4-366 53 56

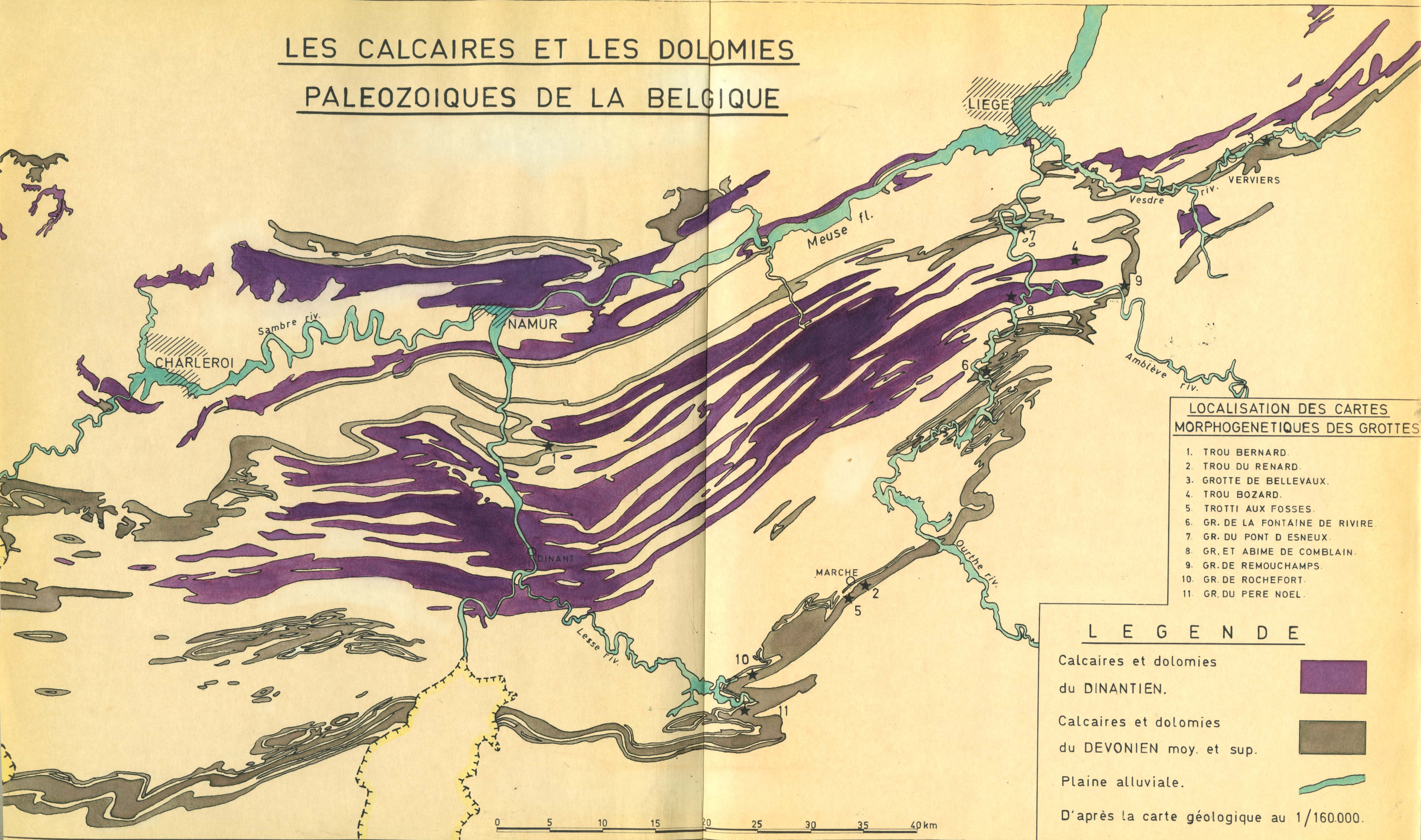
Institut de Géologie
Service Géologie & Géographie Physique

Thèse présentée pour l'obtention
du grade de docteur en sciences
géologiques et minéralogiques.

- 1969 -

038603488

LES CALCAIRES ET LES DOLOMIES PALEOZOIQUES DE LA BELGIQUE



LOCALISATION DES CARTES MORPHOGENETIQUES DES GROTTES

1. TROU BERNARD.
2. TROU DU RENARD.
3. GROTTES DE BELLEVAUX.
4. TROU BOZARD.
5. TROTTI AUX FOSSES.
6. GR. DE LA FONTAINE DE RIVIRE.
7. GR. DU PONT D'ESNEUX.
8. GR. ET ABIME DE COMBLAIN.
9. GR. DE REMOUCHAMPS.
10. GR. DE ROCHEFORT.
11. GR. DU PERE NOEL.

LEGENDE

- Calcaires et dolomies du DINANTIEN.
 - Calcaires et dolomies du DEVONIEN moy. et sup.
 - Plaine alluviale.
- D'après la carte géologique au 1/160.000.

I N T R O D U C T I O N

=====

C'est à la morphologie des cavités karstiques des calcaires paléozoïques de la Belgique et à l'origine de cette morphologie qu'est consacrée la Troisième Partie de ce travail.

L'étude des formes actuelles des cavités est abordée par la description de quelques grottes, mais la recherche de leur genèse fera souvent appel aux résultats de l'étude des eaux (Première Partie) et aux effets des facteurs géologiques (Deuxième Partie).

Les considérations sur la genèse des cavités seront en général limitées à l'action des derniers processus intervenus, car ce sont eux qui sont responsables des formes actuelles : c'est le propre des morphologies d'érosion que de se façonner en effaçant (en tout ou en partie) les formes préexistantes.

Le but de notre travail est l'étude du *creusement* des cavités. Nous n'avons pas négligé pour autant l'appui que pouvait fournir l'observation des dépôts ; ceci a été cependant d'un assez mince secours car ce n'est que dans des cas favorables (dont le plus typique est celui des éboulis) que l'on peut trouver avec certitude la forme d'érosion corrélative d'un remplissage.

Si on s'est ici limité à l'étude des *formes* actuelles, certaines d'entre elles se sont avérées être d'une origine plus ancienne que d'autres et certains éléments d'une chronologie relative ont ainsi pu être établis.

La morphologie karstique a été qualifiée d' "absurde". Elle a, dit P. Birot, "un caractère monstrueux par rapport à la topographie normale" (1).

(1) P. Birot : *Morphologie structurale*, T. I, 168 p., P.U.F., Paris, 1958.

Au terme de notre étude, ce ne sera pas notre avis. Bien des formes s'expliquent simplement, lorsque l'on considère l'action de l'eau sur une roche soluble. Et ce qui reste mystérieux témoigne seulement de la faiblesse de nos connaissances dans le domaine des eaux souterraines.

Les investigations ici rapportées ont été menées seulement dans les formations carbonatées paléozoïques de la Belgique. Le lecteur voudra donc bien se souvenir, si en quelque point nous avons omis de le rappeler, que nos considérations sur la prédominance de telle forme ou de tel processus sur tel autre, se rapportent, a priori du moins, à la région étudiée.

- Plan de l'exposé -

Le chapitre I est consacré à la description morphologique de quelques grottes. Chaque exemple est appuyé sur une carte morphogénétique. Ces cartes sont, à notre connaissance, les premières de ce type dans le domaine karstique. Les onze exemples choisis sont présentés dans un ordre approximatif de complexité croissante dans leur évolution. Ainsi, le premier exemple est celui d'une simple succession de puits étroits où s'engouffrent les eaux d'un plateau ; le dernier est celui d'une grotte à l'histoire très complexe, comportant des vestiges d'un cours d'eau souterrain important, vestiges oblitérés par le développement de vastes salles encombrées d'éboulis.

Le chapitre II est basé sur les formes observées dans les exemples présentés au chapitre I ; ces formes sont groupées en deux catégories suivant qu'elles sont dues à l'action de l'eau ou à l'effet de la seule gravité, en l'absence d'action directe de l'eau, comme les éboulements. Les facteurs et le processus de développement des différentes formes sont recherchés.

A la suite de cette étude apparaissent des différences morphologiques d'ensemble entre les grottes des calcaires dévoniens et celles des calcaires dinantiens.

Le chapitre III est consacré au problème général de la genèse des grottes étudiées. Quelles sont les parts respectives de la corrosion et de l'érosion mécanique dans le creusement ? Quelle partie du développement s'est faite au sein des réserves aquifères ou à leur limite supérieure, et quelle partie s'est opérée au-dessus de ce niveau ? Quel est l'âge des grottes ? Ce dernier problème nous ramènera pratiquement à cette évidence que la karstification a souvent commencé - à une échelle modeste - dès la première exondation des roches solubles.

Enfin viendront les brèves conclusions de cette Troisième Partie, puis les conclusions générales de l'étude.

+

+

+

C H A P I T R E I

La Morphologie de quelques grottes

S O M M A I R E

=====

A. LE BUT ET LA METHODE.

Le but de ce chapitre est de présenter les éléments morphologiques (puits, salles, galeries ...) constitutifs des cavités, en vue d'une étude de leur genèse dans les chapitres suivants.

La méthode de présentation est cartographique, ce qui permet de connaître avec plus de précision et surtout de clarté l'étendue et la forme de chaque élément morphologique, et ses relations spatiales avec les autres éléments.

B. ONZE EXEMPLES DE GROTTES.

On a choisi de cartographier des grottes entières et non des secteurs représentatifs de chaque élément pris séparément, ce qui aurait supposé un classement a priori et aurait mal servi une recherche génétique.

Les onze cartes morphologiques et morphogénétiques présentées le sont dans un ordre approximatif de complexité croissante. Les exemples choisis ont été utilisés pour présenter concrètement divers problèmes généraux.

C. CRITIQUE DE LA METHODE CARTOGRAPHIQUE PRESENTEE.

La méthode est neuve et se révèle utile. Diverses causes sont énumérées, qui ont conduit à une légende plus synthétique peut-être qu'il n'était idéalement souhaitable. La carte a des possibilités limitées dans le domaine de la représentation de la genèse. La légende est améliorable (mais ne pouvait être améliorée a priori).

A. LE BUT ET LA METHODE.

L'étude de la genèse des grottes exige une connaissance préalable suffisante des éléments morphologiques (salles, puits, galeries, ...) constitutifs des cavités. Ce sont ces éléments morphologiques que nous voulons présenter ici. Pour ce faire, on pouvait décrire d'emblée chacun de ces éléments, en chercher des exemples convenables dans diverses grottes et les présenter dans une succession rigoureusement "logique". Mais cette méthode présente le danger de considérer chaque élément séparément, en dehors de son contexte concret, et n'offre guère de garantie contre le risque d'une systématisation injustifiée et d'une vaine abstraction. Nous avons donc choisi de présenter d'abord quelques échantillons des grottes que nous avons étudiées. Ces onze cavités nous paraissent comporter des exemples de tous les éléments morphologiques des grottes des calcaires paléozoïques de la Belgique.

Sur un plan topographique préalable, nous présentons ici pour chacune de ces cavités une carte d'un type entièrement inédit. Cette carte nous permettra : 1°) de décrire les parties constitutives des grottes dans leur contexte réel ; 2°) d'apprécier l'ordre de l'ampleur de chaque élément ou phénomène, et ses relations spatiales avec les autres ; 3°) de tirer certaines conclusions immédiates sur la genèse des différentes parties des cavités, là où la chose est possible.

Les onze grottes sont présentées suivant un ordre de complexité croissante, approximatif bien entendu puisque chaque cas est concret et - on le verra bientôt - complexe.

Nous nous sommes forcé à être bref ; plutôt que de donner une lassante description exhaustive, nous avons choisi de mettre l'accent sur un petit nombre de points importants. Les levés ici présentés ne sont en effet que des exemples sélectionnés, parmi les dizaines de cavités que nous avons

parcourues, dans le double but de présenter les parties constitutives des grottes, et de mettre en avant certaines idées qui nous semblent découler clairement de l'observation directe.

Nous n'avons d'autre part pas hésité à mentionner, dans la description des grottes, les incertitudes ou les interrogations qui subsistent fréquemment dans l'étude de cas particuliers. Une partie des indéterminations sera d'ailleurs levée dans l'étude générale qui suit.

La légende des cartes.


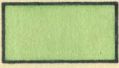

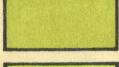


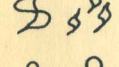

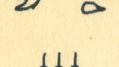
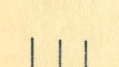
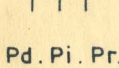
a - Les cartes - et aussi quelques profils qui les accompagnent et pour lesquels nous avons adopté la même légende - décrivent la morphologie actuelle des cavités, et les types d'érosion et de dépôt à l'origine des formes actuelles. Ainsi, seuls les derniers processus ayant contribué à donner à la cavité son aspect actuel peuvent être retrouvés. En effet, si, dans un sédiment, il est toujours possible de creuser ou de sonder pour retrouver d'éventuels dépôts plus anciens, dans une forme d'érosion, par contre, tout nouveau développement efface irrémédiablement la trace des formes anciennes. C'est là une difficulté inhérente à l'étude des formes purement ou essentiellement d'érosion, telles que la plupart des grottes ici étudiées. On verra qu'il a été possible néanmoins, dans certains cas, de déterminer l'ordre de succession de phénomènes dont les effets restent observables, superposés ou juxtaposés sur les parois des grottes.

b - Les cartes différencient et délimitent, dans chaque grotte, des secteurs ayant une même morphogénèse. Malgré la grande échelle des levés (la plupart ont dû être réduits pour être présentés à 1/500, 1/400 ou 1/200), il était impossible de représenter chaque banc en creux ou en relief, chaque pan de roche détaché du plafond. La carte offre donc déjà forcément


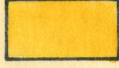
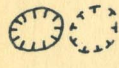

LEGENDE GENERALE DES CARTES

I. LES TYPES DE CREUSEMENT

A - ACTION DE L'EAU

-  Creusement par l'eau stagnante ou en mouvement très lent ("action phréatique").
 -  Creusement par un cours d'eau souterrain ("érosion fluviale").
 -  Creusement par un cours d'eau en conduite forcée ("tube").
 -  Creusement en siphon.
 -  Autres types de creusement par l'eau (eaux de ruissellement ou de condensation, courants multiples ou de direction indéterminée).
 -  Creusement par eau courante dans des fissures, puits et cheminées (mouvements à composante verticale prédominante).
 -  Chenaux anastomosés. Pendentifs rocheux.
 -  Cupules: régulières; irrégulières.
 -  Creux cupuloïdes. Coups de gouge.
 -  Lapiés en cannelures.
 -  Cannelures de puits.
- Pd. Pi. Pr. Plafond; Paroi; Plancher: localisation des phénomènes cartographiés.

B - ACTION DE LA GRAVITE

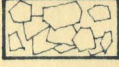
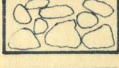

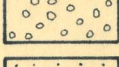
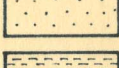



-  Effondrement provoqué par rupture mécanique.
-  Effondrement provoqué par dissolution (de fissures).
-  Effondrement du plancher: dolines souterraines; tassement, affaissement.
-  Fissures actuelles importantes.

C - ACTION DE L'HOMME

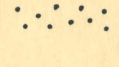
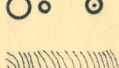
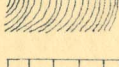
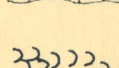
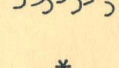

-  Creusement anthropique.

II. DEPOTS

A - DEPOTS PHYSIQUES

-  Blocs éboulés anguleux.
-  Blocs éboulés émoussés par la corrosion.
-  Gravier (anguleux).
-  Cailloux roulés.
-  Sable.
-  Limon, argile.
-  Vermiculatons argileuses (argiles et parfois limons de plafonds et de parois).
-  Vase lacustre.

B - DEPOTS PHYSICO-CHIMIQUES

-  Stalactites.
-  Stalagmites; stalagmite sous stalactite.
-  Plancher stalagmitique.
-  Coulée de plafond ou de paroi; draperie.
-  Gours.
-  * Mondmilch.

C - DEPOTS ANTHROPIQUES

-  Remblai ou recouvrement par l'homme.

un début de synthèse - la synthèse "minimum" - et représente des secteurs dont le "paysage" est homogène, et dont la genèse (de l'état actuel) apparaît uniforme.

c - Les grands traits de la légende commune des cartes présentées sont les suivants : on a distingué essentiellement d'une part les types d'érosion à l'origine des formes actuelles, d'autre part les dépôts.

Les types de creusement à l'origine des formes actuelles sont représentés par quelques sigles signalant des formes d'érosion bien déterminées, mais surtout par des couleurs. Il y a des formes dues essentiellement à l'action directe (érosion mécanique et/ou corrosion) de l'eau, comme les "tunnels" des rivières souterraines, par exemple, et des formes dues à l'action directe sur les roches de la gravité, comme les salles formées par éboulement. Dans certaines grottes aménagées, nous avons aussi dû distinguer les creusements anthropiques, allant du simple élargissement d'une étroiture au creusement de galeries entièrement artificielles.

L'action de l'eau a été représentée par des teintes vertes, l'action de la gravité par des teintes jaunes, et les actions anthropiques en gris.

Les dépôts sont, en eux-mêmes, absolument en dehors du but de notre travail. Néanmoins, ils peuvent parfois, par leur nature ou leur agencement, donner des indications sur les agents d'érosion, et ils ont donc été représentés, en noir exclusivement, par une série de sigles. Comme dans les cartes géologiques, lorsqu'il y a plusieurs dépôts, c'est le dépôt supérieur qui est représenté. On a distingué les dépôts physiques (sédiments fluviaux, etc.), des dépôts physico-chimiques (concrétions diverses). Il a bien fallu, pour éviter toute confusion, distinguer aussi dans quelques grottes les dépôts anthropiques (éboulis provoqués par l'homme, remblais, empierrements ...).

Les rubriques de la légende sont donc les suivantes :

I. Type d'érosion à l'origine des formes observées.

- A. Action de l'eau
- B. Action de la seule gravité
- C. Action de l'homme

II. Dépôts.

- A. Dépôts physiques
- B. Dépôts physico-chimiques
- C. Dépôts anthropiques.

Il faut évidemment prendre ici chacun de ces termes dans un sens global ; il est évident que la gravité est aussi à l'origine du mouvement de l'eau, et, d'autre part, nous signalerons des endroits où l'action de l'eau a préparé des écroulements.

De même les dépôts physiques comprennent parfois un enduit (manganèse, par exemple) précipité.

Nous ne donnerons pas ici le détail du contenu de chacune des rubriques : chaque terme constitutif de la légende sera décrit au fur et à mesure de la description des cavités. Ainsi d'ailleurs, l'exposé correspondra à la méthode de travail car la légende n'a pas été "conçue" ab initio : c'est au cours des levés qu'elle est née, qu'elle s'est développée et transformée pour aboutir à sa forme actuelle qui cristallise en fait un degré d'évolution que nous espérons bien n'être pas un stade terminal.

B. ONZE EXEMPLES DE GROTTES.

C'est à la fin du paragraphe consacré à chaque grotte que l'on trouvera la carte morphologique qui s'y rapporte(1).

1. Le Trou Bernard, à Maillen, Province de Namur.

Sur le plateau qui domine la rive droite de la Meuse, à une dizaine de km au S de Namur, il y a dans le calcaire frasnien, près de Mont, un grand nombre de dolines et de points de perte. Dans l'une de ces dolines, située vers 230 m d'altitude, s'ouvre une cavité très étroite qui plus bas s'élargit en une "cascade" de puits, descendant de plus de 120 m, et se terminant ainsi à moins de 20 m au-dessus de la plaine alluviale actuelle de la Meuse.

La comparaison de la vue en plan et de la coupe (profil développé) montre qu'il s'agit d'une cavité à développement essentiellement vertical. Le Trou Bernard est un exemple très typique de perte de plateau.

La teinte mauve, que nous avons adoptée pour les puits, les cheminées et les fissures, domine nettement sur la carte et le profil. Les premiers passages (Puits Franz, Chicanes) apparaissent comme des fissures élargies, les puits suivants (Salle du Bec, Grand Puits) ont une forme en plan plus arrondie.

Les puits et les fissures constituent ici une même famille de formes, où le mouvement de l'eau est essentiellement vertical (*d'où l'emploi de la même teinte*). D'ailleurs le Puits Franz, fissure large d'environ un mètre, présente les mêmes larges cannelures verticales que présente le Grand Puits ; ces cannelures larges, régulières, lisses,

(1) *Dans les descriptions de grottes qui constituent cette section B, on trouvera en italiques dans le corps du texte les passages relatifs aux questions de représentation cartographique.*



PHOTO 1 : Grandes cannelures dans le Grand Puits du Trou Bernard (Photo J. Courtois).

témoignent de l'action de l'eau dévalant dans les puits (photo n° 1). Certaines des cannelures sont si profondes, que les arêtes qui les séparent s'avancent comme des lames vers le milieu du puits (1).

On attribue la forme en ogive ou en cloche du haut de certaines hautes salles à l'établissement progressif, par les éboulements, d'une forme stable, que l'on calcule d'après les lois de la résistance des matériaux : tant que la forme optimum n'est pas atteinte, des effondrements continueraient à se produire au plafond. Dans le Trou Bernard, il n'en est rien : on a affaire à des formes dues à l'action (chimique et mécanique) de l'eau. Nous pensons que la plus grande taille des puits inférieurs est due à l'accroissement du débit par des confluences successives (voir sur le profil les sommets des puits). Ce terme concerne l'accroissement du débit d'un puits à l'autre car, dans chaque puits, l'eau dévale verticalement sans que les filets "confluent" : les cannelures verticales l'indiquent clairement. P. Chevalier (1944) a expliqué que l'augmentation de la section de chaque puits vers le bas est due à l'augmentation de l'énergie cinétique de l'eau en fonction de la hauteur de chute ; cela nous semble très plausible et, s'il en est ainsi, la morphologie des puits serait surtout due à l'action mécanique de l'eau (2). La fine blocaille qu'on trouve au fond de certains puits ne représente pas le mode d'accroissement principal, mais vient d'ailleurs en partie de l'extérieur de la grotte. Quelques éboulis impressionnants témoignent, eux, d'une tardive coalescence des puits (voir profil, entre la Salle Olive

(1) *Ces grandes cannelures évoquent fortement les "lapiés à grandes cannelures" observés et décrits par A. Bögli en surface, en Suisse (A. Bögli, 1960a, 1960b).*

(2) *E.A. Martel avait en fait déjà décrit ce processus avec beaucoup de détails en 1890 (p. 357) à propos des avens des Cévennes.*

et la Salle du Bassin, entre la Salle du Bec et le Grand Puits).

Aux puits où l'eau dévale (ou, en période moins humide, où l'eau ruisselle), on peut opposer les cours d'eau souterrains, qui sont représentés en vert, et dont le Trou Bernard présente trois types d'empreintes différents.

A l'entrée même du trou, un étroit couloir, relativement calibré, amène vers le Puits Franz les eaux de l'extérieur. Mais il n'a que quelques mètres de long et nous décrirons en détail ce type de "galerie de cours d'eau" plus loin, dans les commentaires des cartes du Trou Bozard et de la Grotte de Remouchamps, où ce genre de conduit est beaucoup mieux développé. Plus typique du Trou Bernard est la seconde sorte d'empreinte de cours d'eau : une étroite et profonde rigole, avec un fond en auge, qui sillonne le fond des Chicanes en présentant une série de paliers ; cet étroit sillon témoigne de l'action actuelle de l'eau, qui ne remplit pas, même en crue, l'entièreté du volume des chicanes, mais qui dévale le long de leurs pentes très rapides, en une suite de cascades avec "plunge-pools" et reprises d'érosion successives. Une troisième empreinte, très puissante, s'observe au bas du Grand Puits, au lieu-dit "le Labyrinthe" ou mieux "les Méandres". C'est en effet une série de méandres de quelques mètres de rayon qui constituent par eux-mêmes en cet endroit l'entièreté du conduit. Ils sont hauts de 5 à 7 m, et si étroits dans le bas qu'on ne peut les y parcourir, et qu'il faut les suivre à leur sommet, où ils présentent d'étroits replats, encoches d'érosion. Nous pensons que ces méandres puissamment creusés dans la roche résultent de la brutale diminution de la pente et du ralentissement ainsi imposé à l'eau. Une dizaine de mètres plus bas, la cavité cesse d'être pénétrable : une nappe d'eau permanente constitue un obstacle jusqu'ici non franchi.

Le Trou Bernard constitue donc un aven d'absorption (cf. B. Gèze, 1965), où s'engouffrent des eaux "sauvages", eaux de pluie ou de fonte des neiges. C'est l'exemple le plus schématique de l'enfouissement des eaux au sein du calcaire. Dans la même région, le Trou Wéron, le Trou Dury, le Trou de l'Eglise, tous à Mont, et, ailleurs, le Trou-qui-fume, à Furfooz, en sont d'autres exemples, mais généralement beaucoup plus complexes et un peu moins spectaculaires.

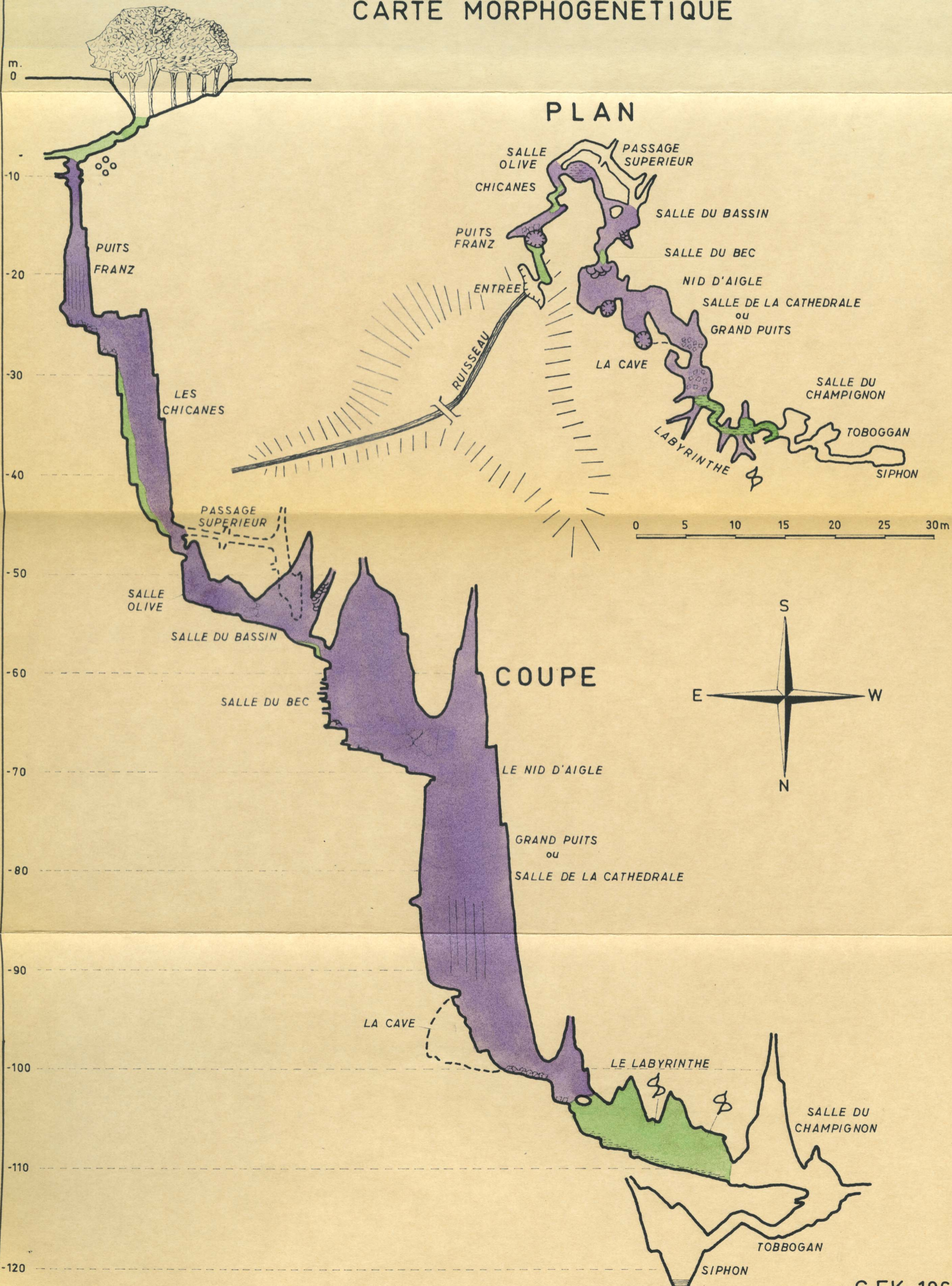
Parmi les phénomènes actuels - ou se poursuivant actuellement - dans le Trou Bernard, nous noterons : l'action de l'eau, qui dévale en lourdes chutes les jours de forte pluie, et qui parcourt le profond sillon des chicanes en temps normal, et dépose du limon au fond des "méandres" ; la chute de fine blocaille (probablement des débris de gélivation) qui est entraînée par l'eau (et par les spéléologues) jusqu'au fond du Grand Puits. Le concrétionnement - la carte le montre - est dans l'ensemble infime.

TROU BERNARD

à MAILLEN

PROVINCE DE NAMUR

CARTE MORPHOGENETIQUE



Fond topographique: Levé par P. VANDERSLEYEN.

C.EK, 1969.

2. Le Trou du Renard, à Marche, Province du Luxembourg.

Le Trou du Renard, beaucoup plus petit que le Trou Bernard, présente pourtant une morphologie plus complexe. Deux puits relient entre eux trois étages de grottes, dont deux s'ouvrent sur le versant de rive droite du Fond de Vaux.

Les puits sont, en section horizontale (voir les plans), très étroits et allongés. Ce sont véritablement des fissures élargies, où de larges redans, allongés verticalement, témoignent du cheminement vertical de l'eau.

Les trois étages subhorizontaux sont très peu développés. Tous trois témoignent clairement, par la morphologie de leurs parois, que leur état actuel n'est pas dû aux éboulements (sauf en partie dans l'étage inférieur), mais à l'action de l'eau. En deux endroits (à l'étage supérieur et à l'étage moyen), l'eau a creusé des conduits tubulaires. Celui de l'étage moyen, le mieux développé (visible sur 20 m de long), présente un diamètre constant d'environ 60 cm ; la forme cylindrique témoigne que, au moment de sa formation, l'eau le remplissait intégralement ; de tels "tubes" sont généralement considérés comme creusés "en conduite forcée" (P. Chevalier, 1944) et nous apporterons plus loin (§ 10 : Grotte de Rochefort) un appui à l'idée que le courant y était rapide ; de toute façon, le diamètre constant de la section de ces tubes concorde bien avec l'idée d'une eau s'écoulant rapidement, et érodant davantage les passages plus étroits, jusqu'à calibrage.

Ces tubes mis à part, la morphologie actuelle des trois étages de la grotte ne témoigne pas à proprement parler de l'action de cours d'eau ; il semble plutôt que de l'eau ruisselant sur les parois (eau d'infiltration et/ou eau de condensation) ait modifié une forme antérieure, en partie due à la gélifraction, si l'on en juge par l'actuel dévelop-

pement des cavités qui sont plus spacieuses à leurs orifices qu'à l'intérieur (voir le bloc-diagramme, fig. 1).

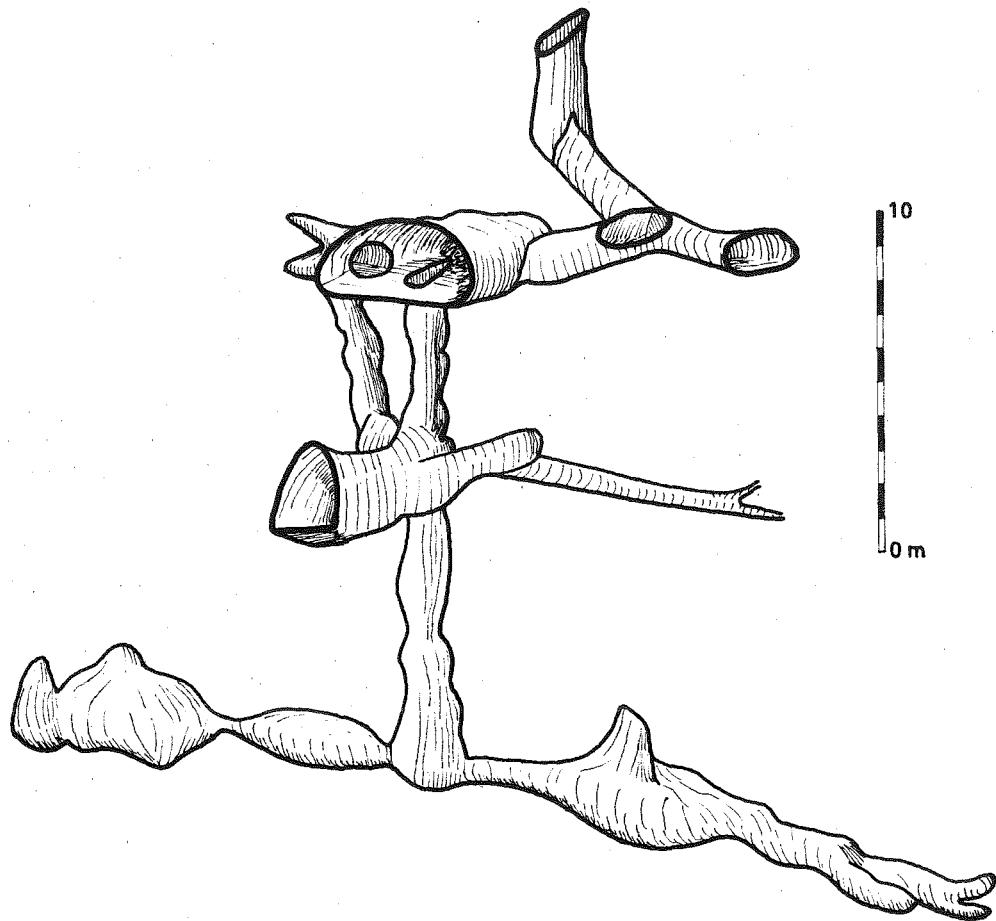


FIG. 1 : Trou du Renard, à Marche. Bloc-diagramme, vu du S.E.

L'observation du bloc-diagramme montre que l'étage supérieur présente cependant peut-être des conduits anciens, irréguliers, tronqués par la topographie actuelle ; mais les vestiges sont trop minimes pour en juger, et les détails morphologiques actuels n'offrent pas de traits typiques des cours d'eau.

C'est pourquoi, en dehors des puits et des fissures (en mauve), l'action de l'eau dans la grotte a été représentée par deux teintes vertes (l'une pour les conduites forcées, l'autre pour le reste) différentes de la teinte consacrée, au Trou Bernard, à l'action morphologique des cours d'eau souterrains.

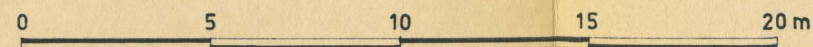
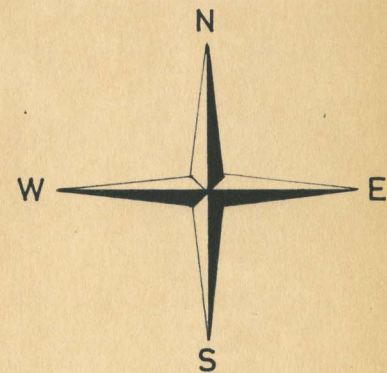
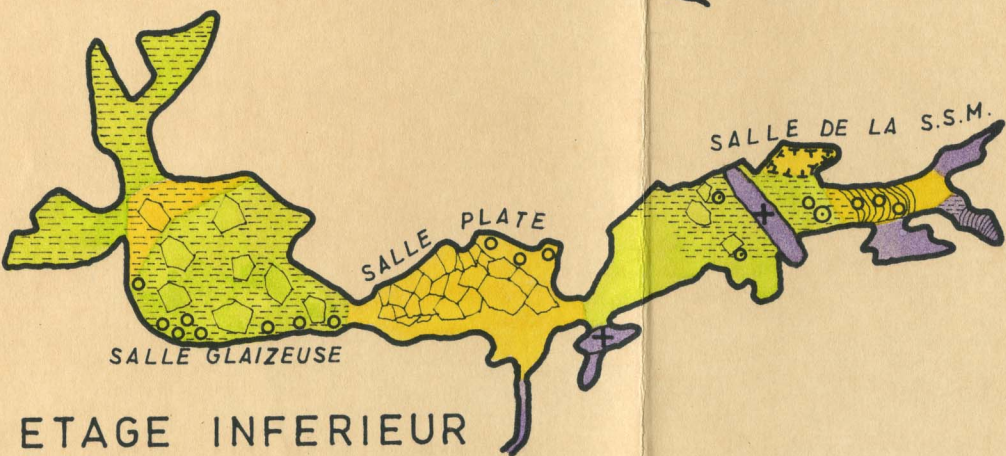
Quelques éboulements minimes ont été représentés par la couleur jaune.

CARTE MORPHOGENETIQUE

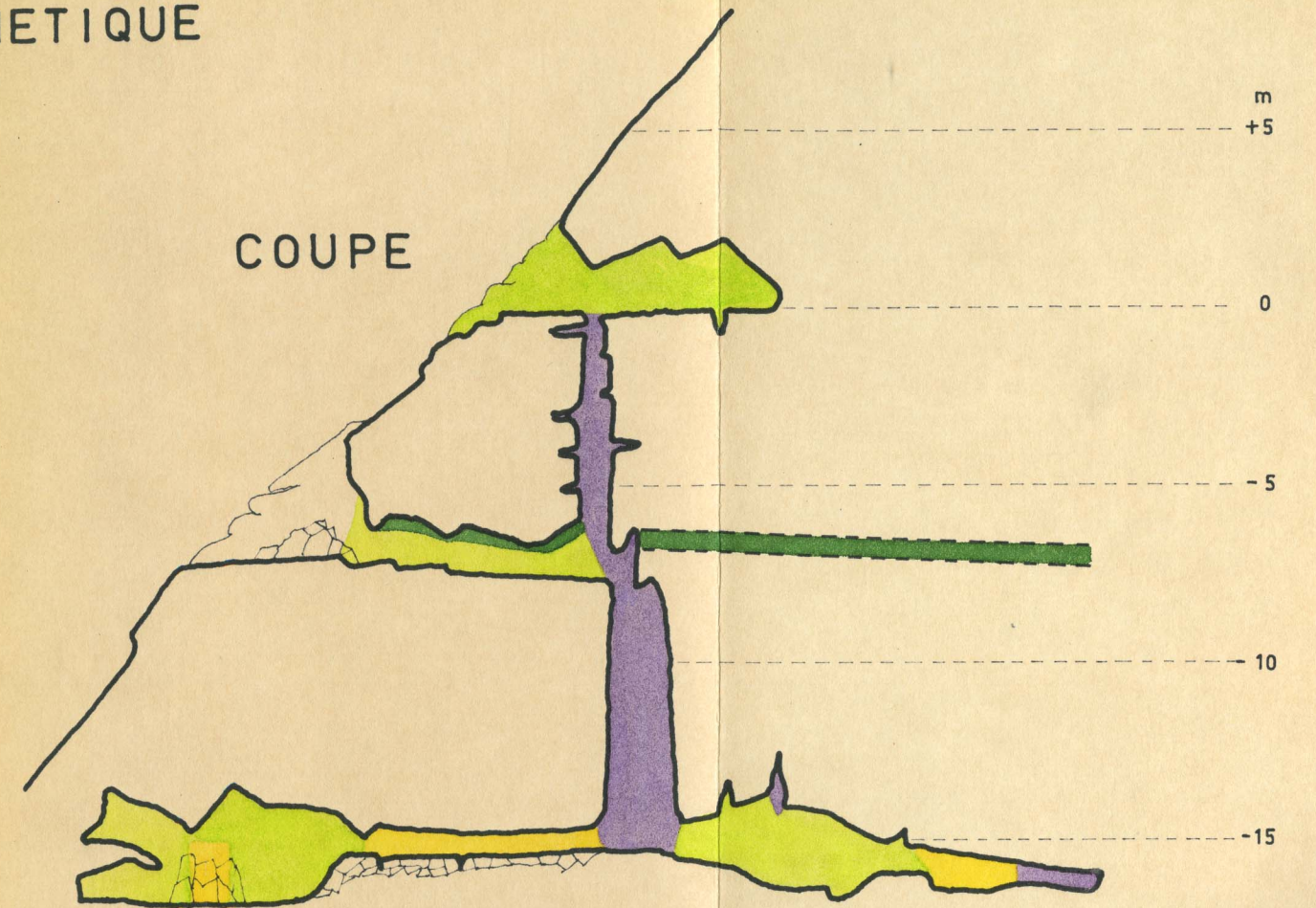
ETAGE SUPERIEUR

PLANS

ETAGE MOYEN



COUPE



TROU DU RENARD
MARCHE EN FAMENNE
PROVINCE DE LUXEMBOURG

Fond topographique: levé par P.VANDERSLEYEN.

C.EK, 1969.

TROU DU RENARD

3. La Grotte de Bellevaux, à Andrimont, Province de Liège.

A la sortie orientale de l'agglomération de Verviers, sur la rive droite de la Vesdre s'ouvre, au pied d'une haute paroi calcaire et au niveau même de la plaine alluviale, un porche de 21 m de long sur 2 à 3 m de haut : l'entrée de la Grotte de Bellevaux.

La grotte est essentiellement constituée d'une salle rectangulaire, surmontant un réseau compliqué de couloirs minuscules, à peine pénétrables.

La limite S de la salle coïncide avec une faille verticale dans les calcaires ; au S de la faille, ils pendent N ; au N de la faille, dans le massif de la grotte, les bancs sont subverticaux. Dans ce même massif, cependant, une fracture horizontale, parallèle à un plan de diaclase, sépare les bancs verticaux qui surplombent la grotte et l'entourent, des bancs pendant de 70° vers le N qui affleurent dans la grotte même (voir la coupe du porche). La limite S et le plafond de la grotte sont donc déterminés par des failles ; les autres limites de la salle sont également structurales : plan de stratification pour la paroi N, diaclases pour la paroi W (1).

Si l'on considère la petitesse des quelques fissures, des conduits inférieurs et d'une cheminée qui occupe le coin NW, la grotte apparaît bien dans l'ensemble comme un spacieux "cul-de-sac" en bordure de la Vesdre. Le sol de la salle, où le bedrock n'affleure qu'en quelques places, est tapissé d'alluvions de la Vesdre : lits de cailloux roulés, de sable et de limon (plus très peu d'argile, en deux endroits contre les parois). Les parois et le plafond témoignent aussi

(1) *Les influences structurales sur les formes des cavités ont été étudiées dans la Deuxième Partie, chapitre III.*

qu'ils ont été léchés et sculptés par la Vesdre. Le plafond est cupulé ; certains bancs ont subi une attaque différentielle et présentent une section concave, leurs parties stratigraphiquement basales et sommitales étant moins dissoutes que la partie centrale (1) ; les épontes des veines de calcite ont été plus dissoutes que la roche qui les entoure ; certaines parties du plafond, moins attaquées que les autres, saillent et forment des "pendentifs rocheux" ("rock pendants" de J. Harlen Bretz, 1942). Tout cela est l'effet d'une eau qui n'était pas d'un calme parfait, car la dissolution différentielle n'est pas fine ; les petits fossiles ne sont ni en net relief, ni en creux net ; les arêtes des parties moins solubles sont émoussées. Mais le mouvement de l'eau n'a pas laissé de traces directionnelles au plafond. Bien que formée (dans son état actuel) par une grande rivière, la salle n'a pas un caractère proprement fluvial : l'eau venait tourbillonner et former des ressacs dans une cavité pratiquement fermée sur cinq de ses six faces. *C'est ce qui nous a dicté le choix, parmi les teintes vertes indiquant l'action de l'eau, de la nuance correspondant, dans l'expression générale de notre légende, à des "courants multiples ou de direction indéterminée".*

Les petits couloirs sous-jacents présentent, eux, une corrosion très différentielle ; le relief des bancs y est net et fouillé ; un fin limon en couvre le fond, mais les cailloux sont absents. Tout indique donc qu'on se trouve devant les effets d'une eau très calme, immobile ou en mouvement très lent, devant des "effets phréatiques" au sens où ce terme fut employé par W.M. Davis puis par J.H. Bretz (1942) par exemple : *d'où la représentation, sur la carte morphogénétique, par une nuance différente.* Dans ce réseau, une forme en "tube" s'est nettement développée : s'agit-il vraiment d'une conduite

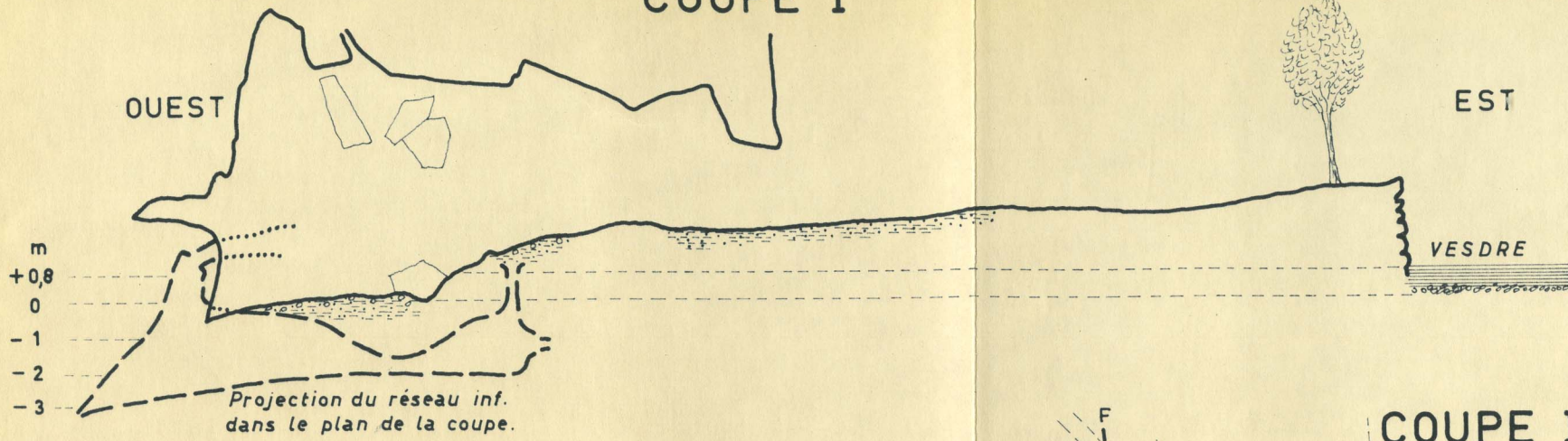
(1) *Les causes de ce phénomène ont été étudiées dans la Deuxième Partie, chapitre II, p. 34.*

forcée à courant rapide ou plutôt d'une convergence de forme due à une corrosion différentielle extrême, le milieu d'un banc se laissant fortement attaquer et les parties stratigraphiquement basales et sommitales, bien que calcaires, mais moins pures, formant des épontes intactes ? Nous penchons pour la seconde explication (1).

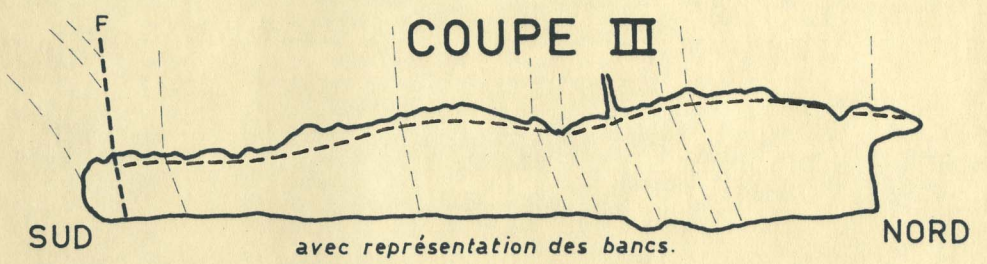
La Grotte de Bellevaux fonctionne parfois, très rarement aujourd'hui, comme point de perte temporaire. En effet, vers le minuscule "réseau phréatique", un thalweg, à peine esquissé dans le sol de la salle, conduit les eaux de la Vesdre qui, lors de très grandes crues seulement, déborde et s'engouffre dans la grotte. Or, tout le "réseau phréatique", qui s'étend sous la grotte, à moins de 30 m de distance de la Vesdre, est, en temps normal ou même en faible crue, à sec, alors qu'il est situé entièrement sous le fond du lit de la Vesdre. A plusieurs reprises, alors que le niveau de l'eau de la Vesdre était à 80 cm au-dessus du fond de son lit, nous avons parcouru ce réseau, qui se trouve à son extrémité, à 3,20 m sous le niveau du fond du lit de la Vesdre. A ce point précis, on se trouve à 36 mètres de distance de la Vesdre, et à 4 m (3,20 m + 0,80 m) sous le niveau de l'eau de la rivière. Il est donc clair qu'en cet endroit, il n'y a actuellement, le plus souvent, pas de nappe aquifère se raccordant tangentielle-ment au niveau de la rivière. Nous connaissons un exemple identique sur la Lesse, au Trou des Crevés à Belvaux, où le niveau de l'eau souterraine, à une trentaine de mètres de distance de la rivière épigée, se tient régulièrement à 4 m sous le niveau de cette rivière.

(1) B. Gèze (1964) a déjà signalé un autre cas de "convergence de forme" possible entre les fameuses conduites forcées décrites par P. Chevalier (1944) et des galeries à section circulaire qui auraient pu se former en fait en écoulement libre, en acquérant leur forme par l'action de contraintes (mécaniques naturelles) dans la roche.

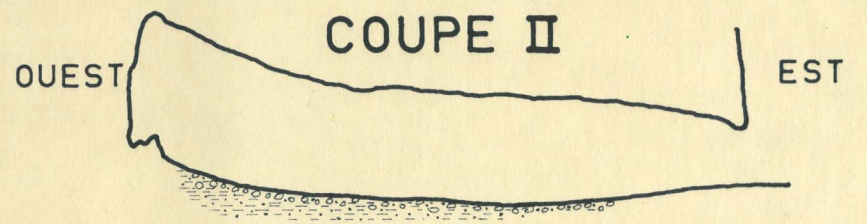
COUPE I



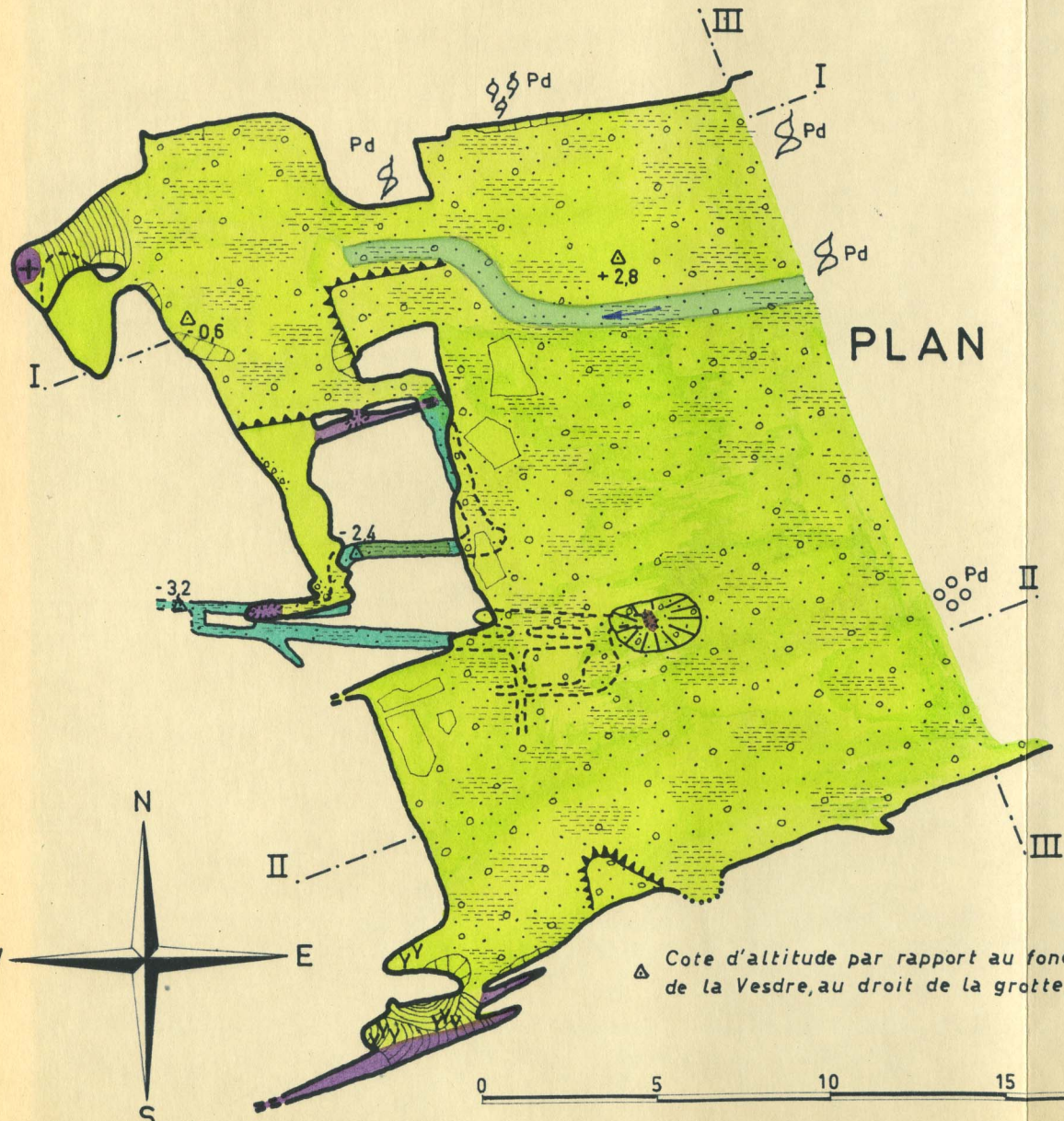
COUPE III



COUPE II



PLAN



△ Cote d'altitude par rapport au fond du lit de la Vesdre, au droit de la grotte.

CARTE MORPHOGENETIQUE

GROTTE DE BELLEVAUX

à ANDRIMONT
PROVINCE DE LIEGE

4. Le Trou Bozard, à Sprimont, Province de Liège.

Le "petit granit", dans le Tournaisien supérieur, présente fréquemment, en particulier dans la région de Sprimont, des grottes aux conduits étroits et sinueux, dont nous donnons ici un exemple. Ces conduits sont fréquemment parcourus par un ruisseau souterrain, ou au moins présentent des traces indubitables du passage d'un ruisseau.

Le Trou Bozard ou Grotte du Gris-Bec, comme plusieurs de ses semblables, s'est développé dans un seul banc ("le Gris-Bec"), sauf le puits d'entrée, qui débouche plus haut et a été mis à jour par l'exploitation. Un ruisseau parcourt la grotte, sauf en période très sèche ; il suit la stratification, dont le pendage est de 20° vers le S. Comme le conduit sinue, la pente moyenne du ruisseau est de l'ordre de 12°.

La carte ci-jointe montre que le conduit sinueux a une largeur constante de 1 m ; sa hauteur est presque partout de 2 à 4 m. Les méandres nombreux que forme le conduit ont un caractère nettement fluvial : érosion moindre sur la rive concave, attaque de la roche sur la rive convexe surtout dans la partie aval du méandre. La galerie a visiblement été taradée par un cours d'eau. Actuellement une argile limoneuse, parfois même un limon sableux, recouvrent le fond sur quelques cm. De rares blocs épars, éboulés, parsèment le sol.

En deux places, de courtes sections présentent une conduite tubulaire : dans la branche NE, un "tube" a localement élargi la section de la galerie fluviale (voir section XY) ; au bas du puits d'entrée, le raccord entre ce puits et le conduit fluvial se fait également par un "tube".

Mais c'est à la morphologie de "cours d'eau" qu'est associée une forme particulière, propre ici aux plafonds : les "pendentifs rocheux", indiqués sur la carte en une dizaine

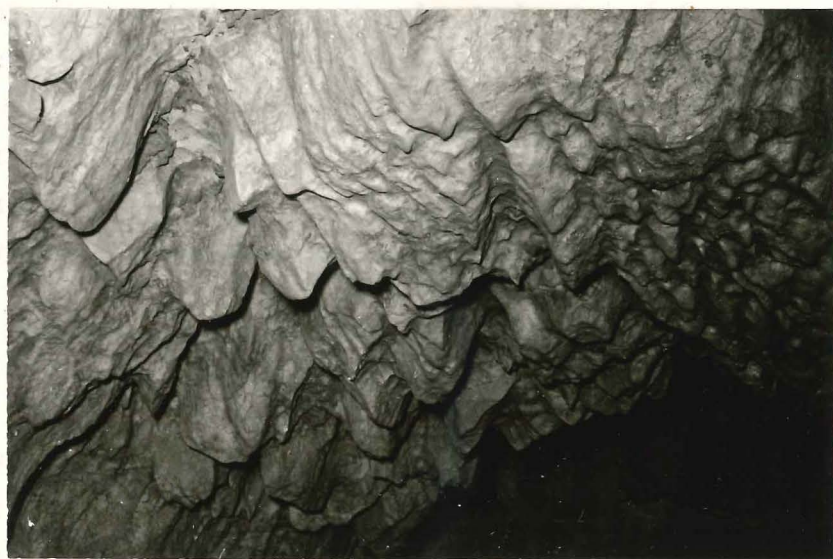
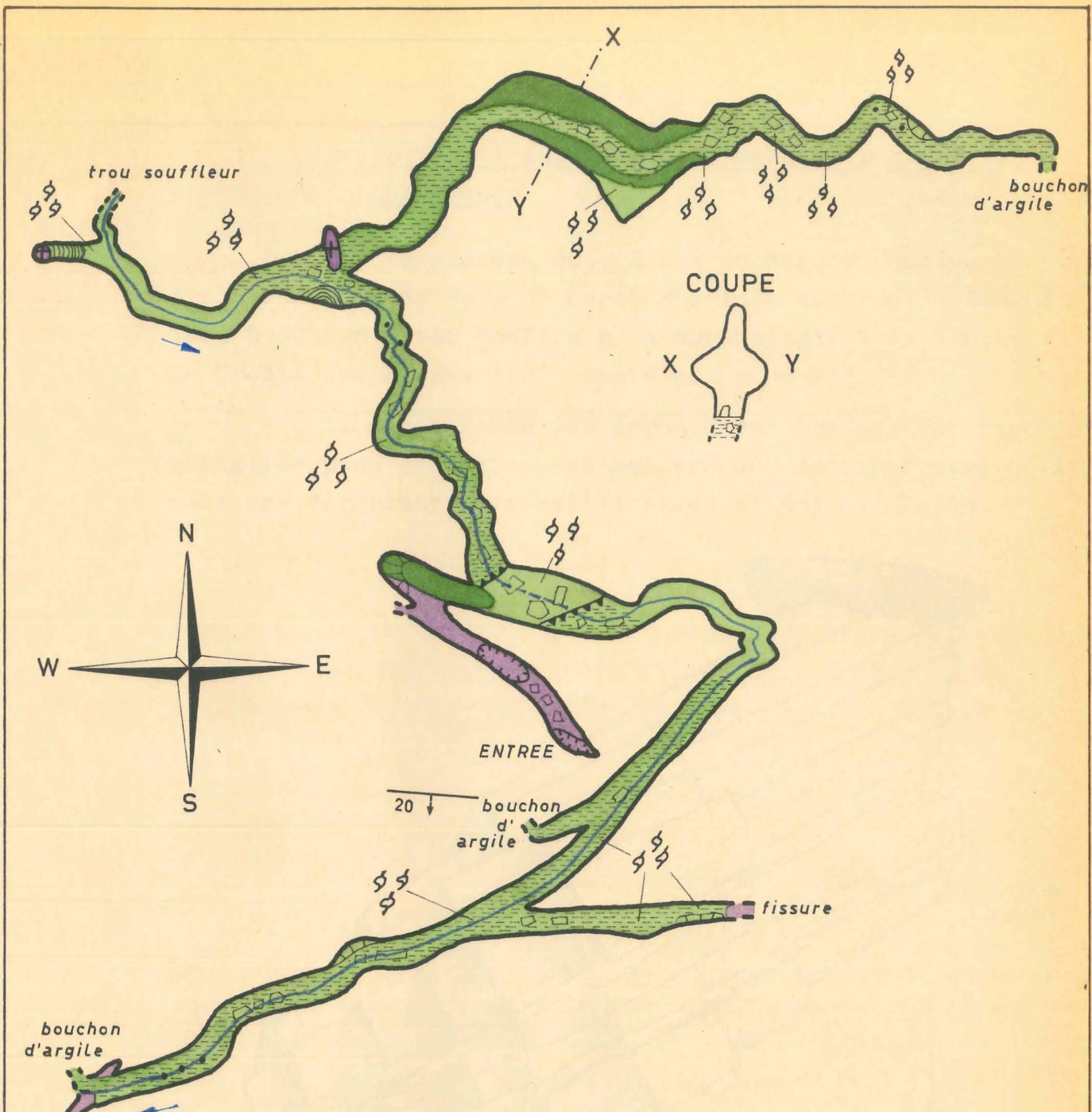


PHOTO 2 : Pendentifs rocheux. Grotte du Pont d'Arcole à Hastière.

PHOTO 3 : Pendentifs rocheux. Trou Bernard, à Maillen (Photo J. Courtois).

de places par un sigle spécial (voir légende supra). Il s'agit de parties rocheuses qui saillent du plafond, vers le bas, un peu à l'instar des stalactites, mais d'une part elles ont généralement un certain allongement dans le sens de la pente du conduit, et d'autre part il s'agit de formes d'érosion et non de concrétionnement. J.H. Bretz (1942, p. 736) les considère comme se formant à la suite d'un stade de remblaiement qui obstrue par des dépôts meubles tout le fond de la galerie et oblige l'eau à circuler sur une très faible épaisseur, "coincée" entre le remplissage et le plafond, la diminution de la section allant normalement de pair avec une augmentation de la vitesse d'écoulement ou éventuellement de la pression. Dans les nombreuses grottes où nous avons observé ces formes, c'est fréquemment en vain que nous avons cherché les vestiges de remplissage. Nous pensons en fait que ce stade intermédiaire, bien que plausible - et nous l'avons parfois observé - n'est pas nécessaire, et surtout pas nécessaire à l'explication des pendentifs rocheux. Nous avons pu déduire, à Remouchamps, essentiellement à partir d'analyses chimiques, mais avec certitude, que, lors de crues, la tranche supérieure de l'eau peut circuler à grande vitesse alors que la masse de l'eau, à la suite d'obstacles situés en aval (siphon, passage en fissure, éboulement) se meut beaucoup plus lentement ; et qu'en outre c'est la tranche supérieure qui, dans le cas étudié à Remouchamps, comporte l'eau chimiquement la plus sous-saturée en bicarbonates (1). Cela suffit à créer les conditions que Bretz estime, de façon très plausible, nécessaires à la création des pendentifs rocheux ; aussi, sans nullement nier l'existence de stades de remplissage - que nous avons parfois observés - estimons-nous qu'on ne peut faire l'hypothèse de l'existence d'un tel stade dans toutes les cavités où s'observent des pendentifs rocheux, sur la seule base de ces formes.

(1) Voir Première Partie, chapitre V, p. 139.



TROU BOZARD
 SPRIMONT
 PROVINCE DE LIEGE
CARTE MORPHOGENETIQUE

5. Le Trotti aux Fosses, à Marche, Province du Luxembourg.

Sur le plateau qui, à l'E de Marche, domine la rive droite du Fond de Vaux s'ouvre, non loin du Trou du Renard (cf. § 2), un petit gouffre à la morphologie très simple : Le Trotti aux Fosses (voir carte et coupe (1)).

Il s'est formé par écoulement (ou par des écroulements) de pans de roches, et est presque de toute part délimité par des plans de stratification et des diaclases.

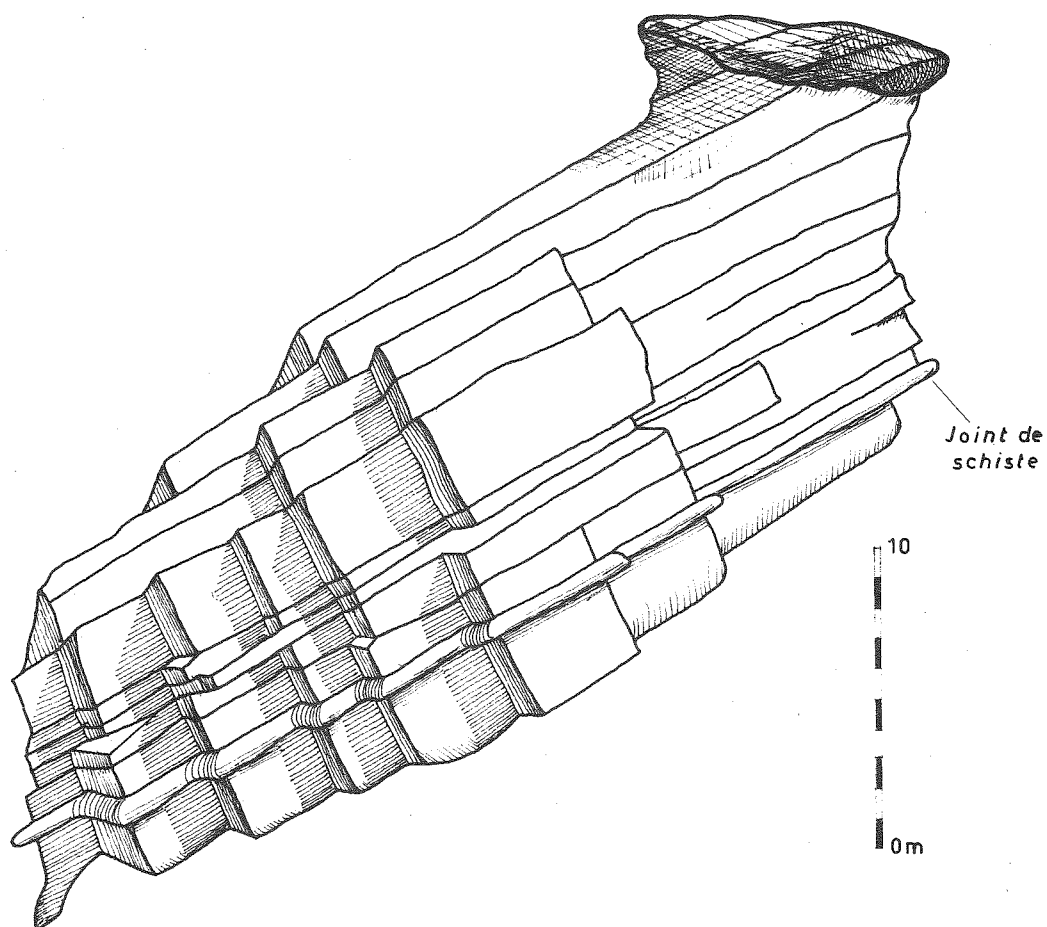


FIG. 2 : Trotti aux Fosses, à Marche. Bloc-diagramme, vu du S.

(1) Ce nom est probablement la déformation de "Trô (trou) du Try aux Fosses".

Une telle forme, dans sa simplicité apparemment rudimentaire, ne peut s'expliquer que par une évolution plus complexe que les cavités que nous avons décrites jusqu'ici. Jusqu'ici, en effet, nous avons observé des effets assez directs de l'eau s'engouffrant dans la roche et y circulant en agrandissant son passage. Ici, nous sommes en présence d'un trou de plus de 3600 m^3 - 10.000 tonnes de calcaire - dans lequel s'observent très peu de vestiges de l'action de l'eau. Presque tout n'est qu'éboulement (*en jaune sur la carte et la coupe*).

Les éboulements ne sont bien entendu pas l'origine première de la cavité. Chaque éboulement suppose un vide préalable sous lui, et l'absence de tout trou largement ouvert au pied du massif où bée le Trotti aux Fosses implique donc que 10.000 tonnes de calcaire sont parties en solution et en suspension par le réseau hydrologique souterrain.

Actuellement, au fond de deux fissures et au pied des éboulis, un filet d'eau circule encore, mais son écoulement est visiblement désorganisé par les effondrements.

A 3 m au-dessus du "plancher" d'éboulis actuel, un joint de schiste de 20 cm se montre nettement en creux par rapport au calcaire. Il apparaît clairement sur la fig. 2 (mais, comme celle-ci représente un "moulage" de la grotte, la place laissée vide par le schiste apparaît en saillie). Ceci confirme la prédominance actuelle, dans la grotte, de la désagrégation sur la dissolution. Il est évident qu'un tel type de grotte est un piège à air froid (lourd), et que le gel, en hiver, y est fréquent ; ceci doit évidemment favoriser la désagrégation mécanique : maintenant que les effondrements ont commencé à se produire, et que la grotte est mise à jour par une large lucarne (30 m^2) dont la morphologie actuelle ne présente guère de traces de corrosion, mais bien d'éboulements, les processus mécaniques garderont la prédominance grâce aux gels hivernaux.

En deux points de la grotte, des traces de corrosion apparaissent toutefois : ce ne sont pas des traces d'un écoulement concentré de l'eau, mais bien des élargissements, irréguliers et modestes, de fissures, surtout de diaclases : ces formes maintenant figées (car actuellement il ne circule pas plus d'eau là que sur le reste des parois) s'opposent à la fraîcheur des éboulis. *Elles sont délimitées par la teinte jaune-orangé sur la carte.* Nous les considérons comme les vestiges du stade antérieur à celui des écroulements : c'est un stade de préparation par l'eau du débitage de la roche.

Toutefois un stade plus ancien encore et plus important est nécessaire - nous l'avons dit plus haut - pour expliquer les effondrements : l'existence de vides sous-jacents; mais de cet ancien stade, les éboulis eux-mêmes ont caché toute trace.

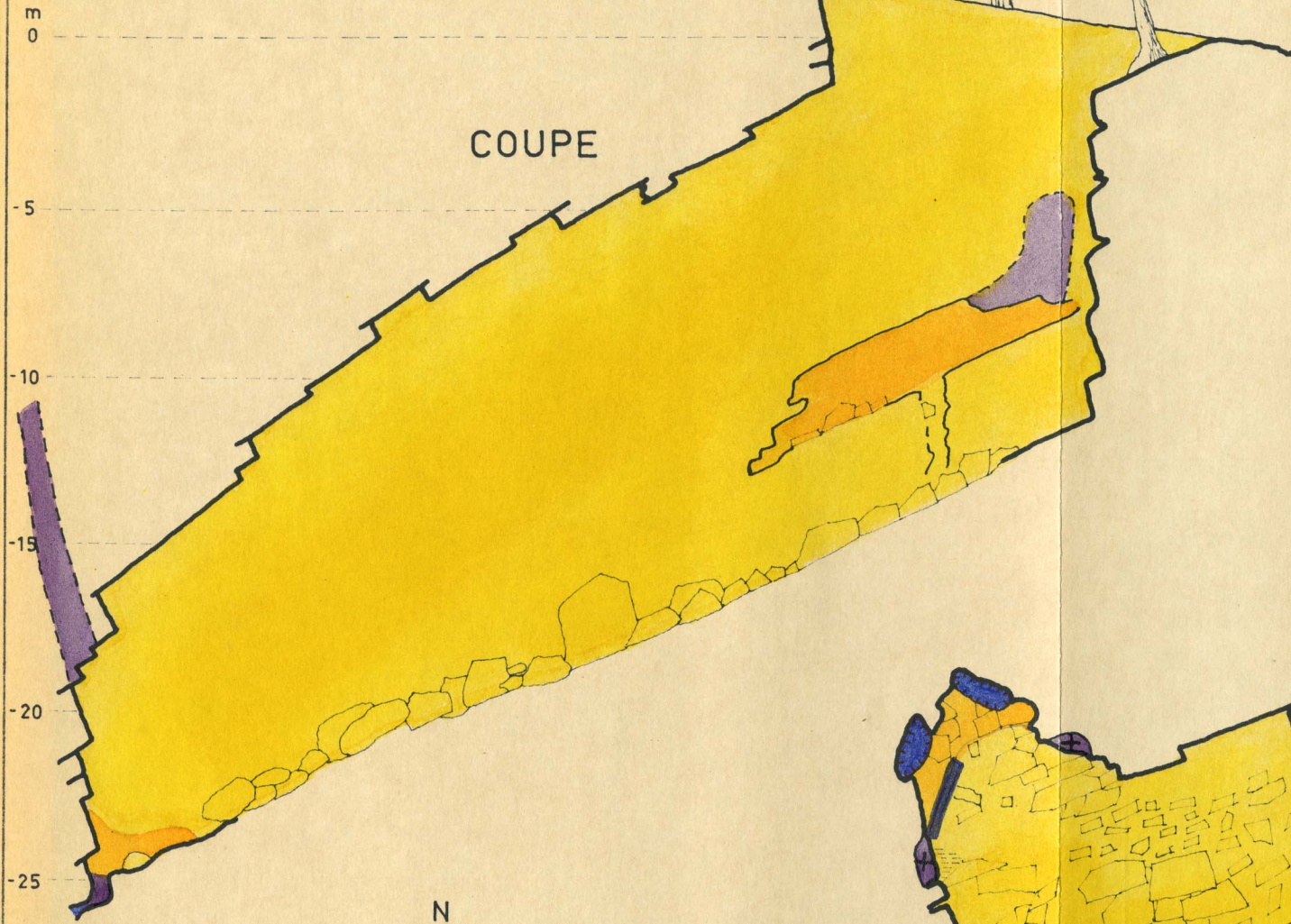
C'est pourquoi cette grotte à l'histoire complexe ne nous montre plus qu'une morphologie monotone, et somme toute d'aspect bien peu karstique.

TROTTI AUX FOSSES

MARCHE-EN-FAMENNE

PROVINCE DE LUXEMBOURG

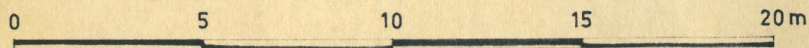
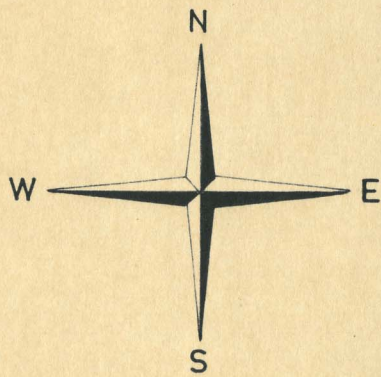
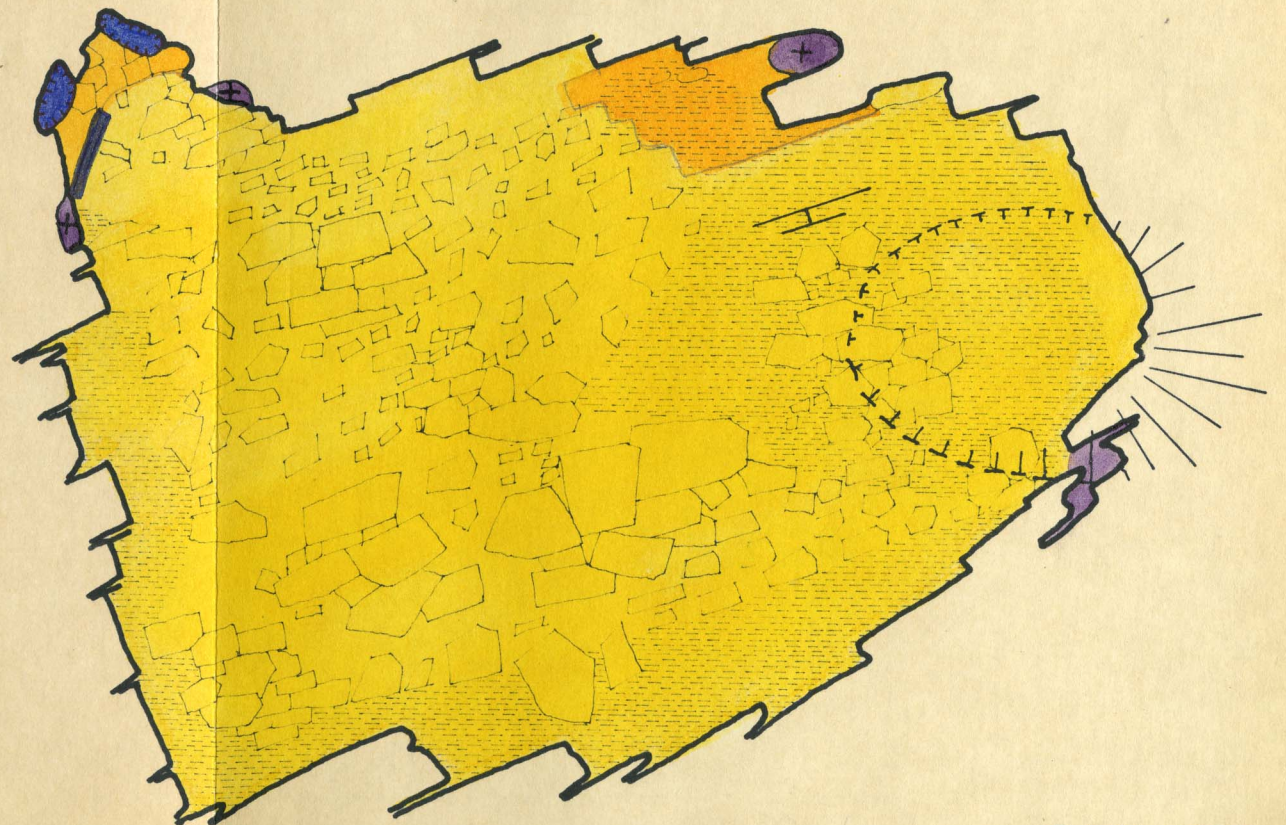
COUPE



CARTE

MORPHOGENETIQUE

PLAN



Fond topographique: levé par P.VANDERSLEYEN.

C.EK, 1969.

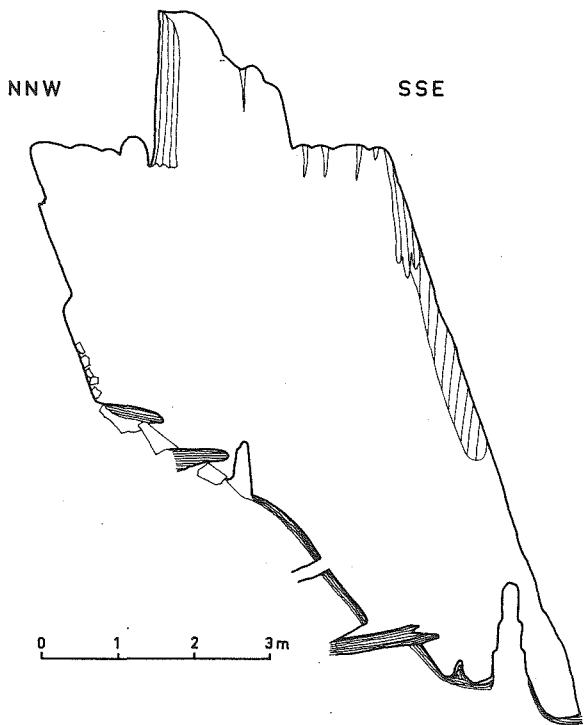
6. Grotte de la Fontaine de Rivière, à Hamoir,
Province de Liège.

La bande de calcaires dévoniens qui borde au N l'Ardenne est, dans la région de Hamoir, très large et très faillée. C'est là, près de la limite méridionale du territoire de Hamoir, que se trouve une grande grotte (1), qui présente notamment une vaste étendue d'eau calme, le plus grand "lac" souterrain de Belgique à notre connaissance. La grotte est vaste et complexe ; les éléments morphologiques autres que le lac sont semblables à ceux que l'on trouve dans d'autres grottes décrites dans ce chapitre, et nous porterons donc toute notre attention sur le lac lui-même et ses environs (voir carte).

Ici, les effondrements, encore plus importants qu'au Trotti aux Fosses (exemple précédent), révèlent plus clairement leur origine.

Le lac, d'environ 1000 m², constitue un élargissement local d'une galerie allongée dans la direction WSW-ENE, dans laquelle la roche montre clairement les effets de l'action de l'eau. Cette galerie, qui se prolonge de part et d'autre du lac, lui paraît donc antérieure : ce fait est confirmé par la morphologie : de part et d'autre du lac, l'action de l'eau sur les parois est manifeste, alors que le lac lui-même présente des effondrements frais, et que sur ses deux bords les plus longs la paroi est constituée par de vastes pans de calcaire mis à nu par les effondrements. Des lits de schiste sont intercalés entre les bancs calcaires, et ont servi de surface de glissement sur la paroi NW et de surface de décollement sur la paroi SE. En effet, comme indiqué sur la carte, les roches pendent vers le SE, et les bancs de la

(1) Découverte par le Centre de Prospection Liégeois (Société Spéléologique de Wallonie), conduit par MM. J. et J. Goussart, en 1968.



paroi SE tombent donc verticalement dans l'eau, tandis que sur la paroi NW les plans de roche glissent sur les lits schisteux, dans le plan de stratification. Cette situation est illustrée par la figure ci-contre qui est une section transversale de la galerie située dans le prolongement de la Salle du Lac. La structure a donc déterminé ici deux types d'éboulements, dont le premier est évidemment le plus facile et le plus rapide. C'est à cause de cela, pensons-nous, que le lac s'est développé plus vers le SE que vers le NW. Il faut ajouter que sous la surface du lac, la cavité présente des redans qui mettent les roches en porte-à-faux. Dans cette masse d'eau calme, et où l'écoulement n'a jamais pu être très rapide depuis le développement du lac (vu l'étroitesse de l'effluent), les redans sous la surface sont certes essentiellement dus à la corrosion.

La genèse du lac a donc dû être la suivante :

- a - creusement par l'eau d'une longue galerie rectiligne ;
- b - élargissement local de cette galerie par corrosion sous le niveau actuel de l'eau ;
- c - glissements (assez peu développés) de pans de roches sur la paroi NW et effondrements (beaucoup plus importants) sur la paroi SE. L'action de la corrosion était-elle à ce moment achevée ou se poursuivait-elle, sapant au fur et à mesure les bancs nouvellement mis en affleurement dans la grotte ? Aucun argument formel n'appuie l'une ou l'autre de ces hypothèses ; mais un indice peut être tiré de ce qui suit :

FIG. 2bis : Section transversale dans la galerie située au SW du Lac (Grotte de la Fontaine de Rivière). Les deux parois correspondent à des plans de stratification (Fig. J. Godissart).

- d - dans les parties les plus anciennes du plafond (essentiellement le milieu de celui-ci), oblitération par la corrosion des traces d'effondrement par l'action de l'eau (d'infiltration, car il y a des concrétions le long de certaines diaclases ; mais peut-être aussi un peu par de l'eau de condensation). Cette trace d'actions de dissolution après les premiers effondrements est un indice en faveur d'une continuation des actions de corrosion dans le lac, mais non une preuve car l'eau pouvait être agressive au plafond et inopérante dans le lac ;
- e - une phase de concrétionnement est en tout cas incontestable après les éboulements car presque tous les blocs éboulés sont couverts d'un mince enduit calcitique, qui témoigne que la dernière action notable de l'eau n'est pas une dissolution mais une précipitation de calcite ;
- f - l'état frais des parois, semblable à l'aspect de fronts de carrières, et la présence de cassures fraîches importantes indiquent que les éboulements sont encore actifs aujourd'hui (au sens où l'on peut prendre ce mot à une échelle géologique).

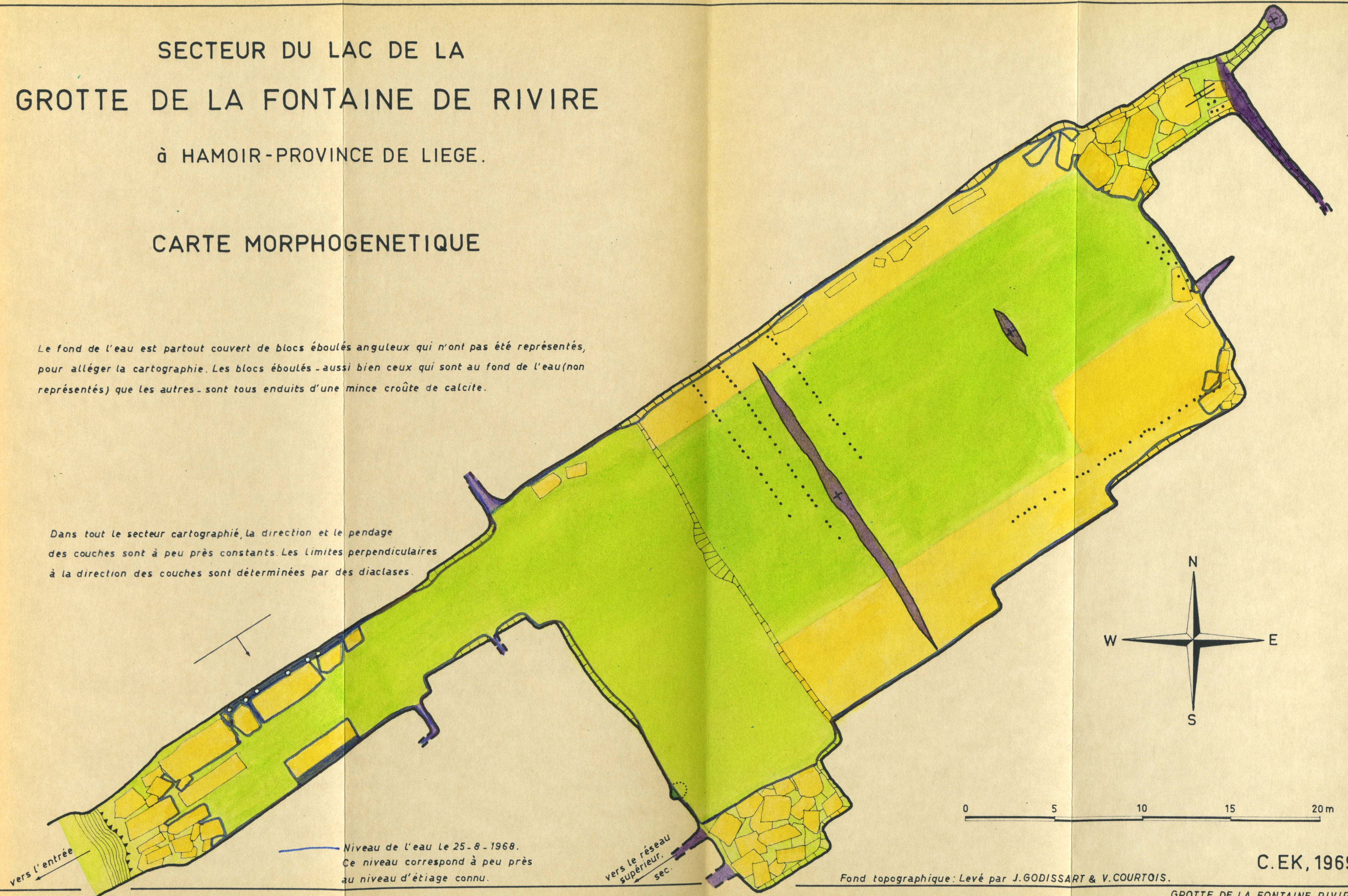
SECTEUR DU LAC DE LA GROTTE DE LA FONTAINE DE RIVIRE

à HAMOIR-PROVINCE DE LIEGE.

CARTE MORPHOGENETIQUE

Le fond de l'eau est partout couvert de blocs éboulés anguleux qui n'ont pas été représentés, pour alléger la cartographie. Les blocs éboulés - aussi bien ceux qui sont au fond de l'eau (non représentés) que les autres - sont tous enduits d'une mince croûte de calcite.

Dans tout le secteur cartographié, la direction et le pendage des couches sont à peu près constants. Les limites perpendiculaires à la direction des couches sont déterminées par des diaclases.



Niveau de l'eau Le 25-8-1968.
Ce niveau correspond à peu près
au niveau d'étiage connu.

vers le réseau
supérieur
sec.

0 5 10 15 20m

Fond topographique: Levé par J.GODISSART & V.COURTOIS.

C.EK, 1969.

GROTTE DE LA FONTAINE RIVIRE.

7. La Grotte du Pont, à Esneux, Province de Liège.

La Grotte du Pont d'Esneux, ou Grotte à *Ursus spelaeus*, représente un type d'évolution karstique bien différent des exemples précédents : c'est en petit le type même d'une rivière souterraine "évoluée" ("mûre").

Elle est creusée dans des bancs très redressés de calcaire frasnieux.

La Grotte se présente comme un long couloir subrectiligne, sensiblement parallèle à la direction des bancs, et présentant une pente très faible vers l'entrée.

Au plafond apparaissent en de nombreux endroits des vestiges de conduits cylindriques dont seule la partie supérieure subsiste (*en vert foncé sur la carte*) : ces portions de "tubes" aux parois bien lisses sont les restes de conduites forcées dont la partie inférieure a disparu par la suite du creusement ultérieur ; ce creusement ultérieur (qui s'est fait seulement vers le bas puisque les parties supérieures subsistent) a en plusieurs places un caractère indubitable de rivière souterraine : il se présente comme une "tranchée" à pente faible et régulière vers l'entrée, avec par endroits des terrasses rocheuses (fig. 3). On observe aussi, par ailleurs, des cupules, des traces de filets d'eau anastomosés, des pendentifs rocheux ; toutes ces formes sont absentes des "tubes" et situées plus bas que les vestiges de ceux-ci ; nous considérons donc qu'elles leur sont postérieures.

Le caractère fluviatile du dernier stade important de l'évolution de la Grotte est enfin attesté par les dépôts qui tapissent le fond de la galerie sur une épaisseur de 0,4 à 1,4 m : sable et cailloux roulés à la base, limon et par places argile au sommet.

Enfin, une coupe dans des sédiments de la Grotte permet de montrer que les chenaux anastomosés sont plus anciens

que le remblaiement de la cavité (fig. 3, b). En effet, on peut voir, au fond de la grotte, des traces de tels chenaux dont l'un a été remblayé par un remplissage argileux puis calcitique ; des actions de dissolution ont arasé les autres chenaux, ce qui est une confirmation de leur antériorité sur la fin du remplissage.

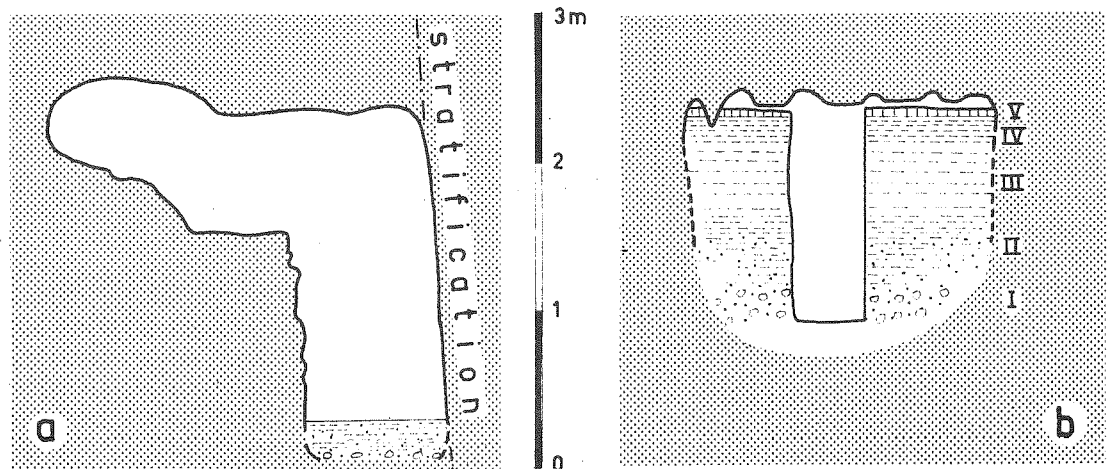


FIG. 3 : Deux coupes dans la Grotte du Pont à Esneux :
 a - section transversale de la galerie principale à une vingtaine de mètres de l'entrée : à gauche un vestige de conduit tubulaire, à section elliptique et, à droite, une tranchée de recréusement vadose ; entre les deux, un palier représente un ancien niveau de la rivière souterraine. Au fond de la tranchée plus récente, limon, sable et cailloux roulés.
 b - coupe transversale de la galerie principale à peu près intégralement remblayée, 5 m avant la fin de la partie praticable de la Grotte : I : cailloux roulés et sable grossier ; II : argile sableuse ; III : argile compacte ; IV : argile finement litée ; V : plancher stalagmitique. Au-dessus, partie supérieure de chenaux anastomosés: la pénétration dans le plancher stalagmitique d'une paroi séparant deux chenaux montre que ces chenaux sont bien antérieurs au concrétionnement et à l'argile sous-jacente ; mais l'arasement des autres chenaux juste au niveau de la partie supérieure du plancher stalagmitique montre que des actions de dissolution avaient encore parfois lieu à l'époque même où s'édifiait le plancher stalagmitique.

Nous avons établi antérieurement le mode de creusement des cavités du type de la Grotte du Pont d'Esneux (1). Nous renvoyons donc à nos publications de 1961 et 1964 pour le détail de l'argumentation, et nous ne donnerons ici que les grandes lignes de notre opinion (2).

a - Les deux traits dominants du conduit principal de la Grotte du Pont à Esneux sont - comme le montre la carte - son relatif calibrage sur près de 100 m de long et l'existence d'une pente générale faible et assez régulière (2%) vers l'entrée de la Grotte. Nous avons montré que cette pente aboutit à l'entrée au niveau d'une terrasse de l'Ourthe, que le profil de la rivière souterraine s'est établi avec cette terrasse fluviale épigée pour niveau de base, et que cet établissement a bien eu lieu à l'époque où l'Ourthe coulait au niveau de la dite terrasse (C. Ek, 1957 et 1961).

b - Le niveau où la grotte s'est établie ne peut être un niveau structural : la grotte est à peu près toute dans quelques bancs à stromatopores du Frasnien, mais le pendage est de 75 à 85°, et la rivière souterraine aurait trouvé les mêmes conditions lithologiques et structurales à des altitudes plus élevées ou plus basses.

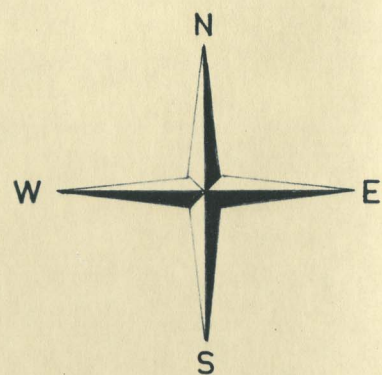
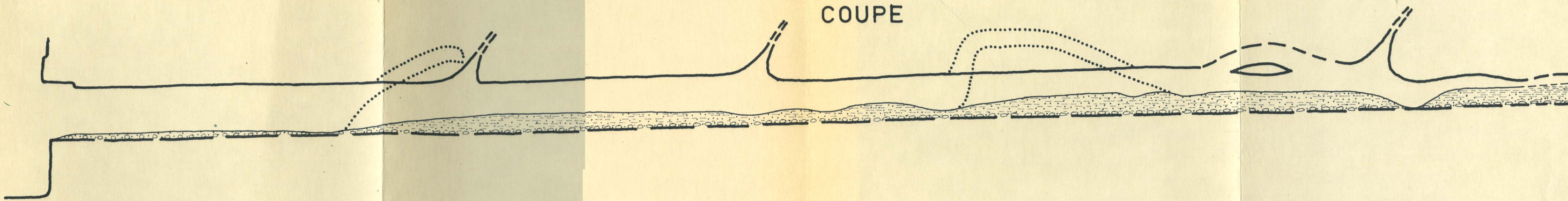
(1) *Ce type de cavité n'est pas rare en Belgique. Nous avons décrit avec quelque détail la Grotte Sainte Anne, à Tilff, qui offre une morphologie semblable sur 625 m, pour son seul étage moyen (C. Ek, 1962).*

(2) *Nous renvoyons à nos travaux antérieurs pour une bibliographie complète du sujet, mais nous tenons à signaler qu'au Congrès international de Spéléologie de Vienne (1961), où nous avons exposé ces vues, A. Droppa a présenté une communication dont le titre était par hasard la rigoureuse "traduction" du notre en allemand, et dont le contenu, basé sur des observations faites en Tchécoslovaquie, était tout à fait analogue, bien que nos deux recherches eussent été menées dans la réciproque ignorance de l'autre.*

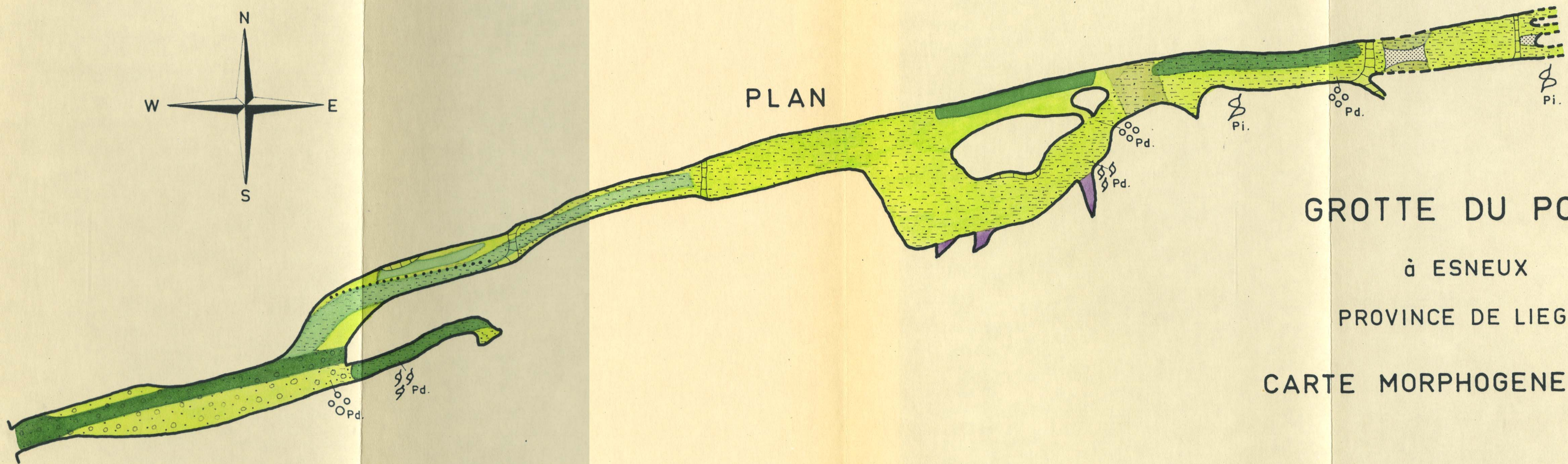
c - Le creusement n'est pas d'origine phréatique : il est au contraire bien localisé, avec traces de reprises d'érosion (fig. 3, a) ; les cavités phréatiques éventuellement préexistantes à la morphologie actuelle devaient être modestes puisqu'on n'a pas de traces importantes de phases de creusement antérieures au stade "fluvial" autres que celles des "tubes". Ces "tubes" sont une préfiguration grossière de la cavité existante, mais celle-ci ne doit pas sa morphologie principale à des conduites forcées, puisqu'elle a une pente régularisée ("graded"). Les conduites forcées présentent au contraire dans la grotte une pente irrégulière et donnent naissance à des siphons comme le montre la partie amont de la coupe longitudinale jointe au plan.

Nous retiendrons en conclusion la relation génétique entre la grotte et la grande rivière épigée dont elle est l'affluent. Ceci distingue en effet ce type de grotte des cavités telles que le Trou Bernard (§ 1 ci-dessus) qui représente un engouffrement vertical "banal" (sensu Birot : par opposition à cyclique), mais aussi de grottes comme le Trou Bozard (§ 4) qui développent un vrai cours d'eau souterrain dans un banc déterminé, et sont donc structurales (en même temps que lithologiques). Enfin, la Grotte du Pont d'Esneux s'oppose à la Grotte de Bellevaux (§ 3) car cette dernière montre au contraire actuellement dans son comportement hydrologique une grande indépendance vis-à-vis de la rivière épigée toute proche.

COUPE



PLAN

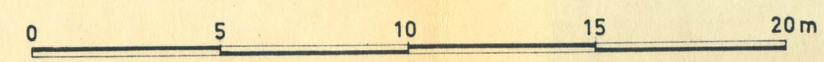


GROTTE DU PONT

à ESNEUX

PROVINCE DE LIEGE

CARTE MORPHOGENETIQUE



C.EK.1969.

8. La Grotte et l'Abîme de Comblain-au-Pont,
Province de Liège.

S'ouvrant vers 190 m d'altitude, sur le versant de rive gauche de l'Ourthe, l'abîme de Comblain-au-Pont donne accès à une grotte importante creusée comme lui dans les calcaires viséens.

A l'extérieur de la grotte, à 20 m au S de l'orifice de l'abîme et au même niveau que celui-ci, s'ouvre une autre cavité, longue d'une cinquantaine de mètres. C'est le Trou Joney ou Grotte du Poudingue, ainsi nommée à cause d'un cailloutis cimenté par de la calcite, étudié par Mademoiselle Suzanne Leclercq ; celle-ci démontra que la Grotte du Poudingue fonctionna jadis comme un point d'engouffrement d'un ruisseau actuellement tout à fait disparu et dont elle reconstitua le cours (S. Leclercq, 1925). On verra plus loin l'importance de cette reconstitution pour la genèse des deux grottes et de l'abîme.

L'abîme, profond de 22 m, mène à une longue galerie en pente couverte d'éboulis, de même que les deux salles qui s'ouvrent au bas de cette galerie. Au-delà, il n'y a presque plus d'éboulis et la grotte continue par une série de salles hautes et spacieuses, reliées entre elles par des couloirs étroits.

Si le développement de la grotte est dans l'ensemble parallèle à la direction de la stratification, les salles s'étendent au contraire dans des plans perpendiculaires à cette direction. Elles se sont développées à partir de diaclases, et constituent des exemples spectaculaires d'élargissement de fissures par les eaux, jusqu'à des largeurs de 4 ou 6 m et davantage. Ce phénomène a déjà été mis en évidence par Ch. Fraipont et S. Leclercq (1925). Sous l'abondance du concrétionnement, beaucoup de détails de la morphologie des parois sont cachés, mais, là où ils apparaissent, la roche est

creusée de cupules irrégulières de toutes tailles ; les traces d'un écoulement dans une direction déterminée font très généralement défaut, sauf localement des lapiés en cannelures indiquant un mouvement de l'eau de haut en bas.

Les étroits passages qui relient les salles sont le plus souvent des siphons ; ces couloirs surbaissés étaient entièrement colmatés et il a fallu déblayer chacun pour accéder à la salle suivante. Le remplissage comporte en général de fins cailloux roulés à la base, du sable, du limon, au sommet de l'argile, le tout couvert par un plancher stalagmitique de 1 ou plusieurs décimètres d'épaisseur.

Cette morphologie - succession de salles spacieuses séparées par de très étroits sas remblayés - a conduit les Chercheurs de Wallonie à employer l'expression de "grotte en chapelet" (A. Vandebosch, 1926). Le dernier grain du chapelet - la salle du Lac - est différent des autres : c'est une salle peu élevée, occupée en partie par une petite étendue d'eau, et dont les parois présentent des formes de dissolution différentielle remarquables : de fines veines de calcite (1 ou 2 mm) sont restées en relief de plusieurs mm, ou même de plus d'un cm, alors que la roche était rongée tout autour ("boxwork" de J.H. Bretz, 1942). Ceci témoigne d'une dissolution en milieu très calme, et J.H. Bretz considère ce phénomène comme symptomatique d'actions "phréatiques". Nous le suivrons volontiers sur ce point. Le développement de l'ensemble de la grotte nous paraît s'être effectué dans l'ordre suivant :

a - L'abîme a fonctionné le premier comme point d'engouffrement des eaux ; il est en effet dans un vallon coulant d'W en E, et Mademoiselle Suzanne Leclercq a montré d'une part que la Grotte du Poudingue (ou Trou Joney) recèle des cailloux venus de l'W, et non des alluvions de l'Ourthe, et d'autre part que les cailloux trouvés dans la Grotte principale ont

bien la même origine que ceux de la Grotte du Poudingue (S. Leclercq, 1925). Les eaux du vallon résurgent encore, actuellement, à l'E de la grotte, dans la plaine alluviale de l'Ourthe.

b - Une partie des eaux du vallon se sont enfouies dans deux fissures voisines, à une vingtaine de mètres en amont de l'abîme, et ont donné naissance à une salle au plafond de laquelle les deux fissures apparaissent encore, dominant d'abondantes concrétions ; les eaux ont rejoint par un passage bas, en siphon, le complexe plus ancien des salles jouxtant le bas de l'abîme.

c - Les eaux se sont alors perdues, au moins en partie, vingt mètres plus en amont encore, donnant naissance à la Salle des Echos, d'où elles ont rejoint le chemin souterrain préexistant par des fissures bientôt transformées en un nouveau siphon.

d - Les salles suivantes (c'est-à-dire situées plus en amont par rapport au vallon épigé parallèle à la grotte et que celle-ci longe de près) se sont développées successivement, de la même manière. Les points de perte se situaient de plus en plus en amont, mais sans jamais atteindre l'importance du premier (l'abîme) qui a sans doute pu pendant longtemps encore engloutir durant les fortes crues les eaux que les fissures plus jeunes ne pouvaient absorber.

L'eau, dans la grotte, circulait bien entendu d'W en E, comme le ruisseau superficiel (Ch. Fraipont (1) considérait que, une fois enfoui, le cours d'eau faisait demi-tour et coulait d'E en W). D'une part, il n'y a pas de trace

(1) *Lors des discussions de la Session extraordinaire de la Société Géologique de Belgique (cf. Ch. Fraipont et S. Leclercq, 1925, p. B 345).*

d'une vraie rivière souterraine, mais bien de plusieurs écoulements plus ou moins indépendants, très probablement non synchroniques, et surtout, la direction générale des eaux était W-E et non l'inverse. Le fait est montré par un glissement intraformationnel qui s'est produit dans un siphon : les lits y ont une pente très nette vers l'E.

e - Enfin, par un dernier recul du point d'engouffrement, une ancienne salle, ayant évolué sous eau, en régime "phréatique", est rencontrée par l'eau enfouie. Cette salle est plus petite, plus basse, surtout, que les autres ; nous l'avons décrite plus haut : c'est la Salle du Lac.

f - Les conduits amenant l'eau d'une salle à l'autre ne seront jamais régularisés : leur section, leur forme, leur pente restent éminemment variables ; finalement les sédiments puis la calcite les obturent, les uns en grande partie, les autres totalement : la grotte est morte.

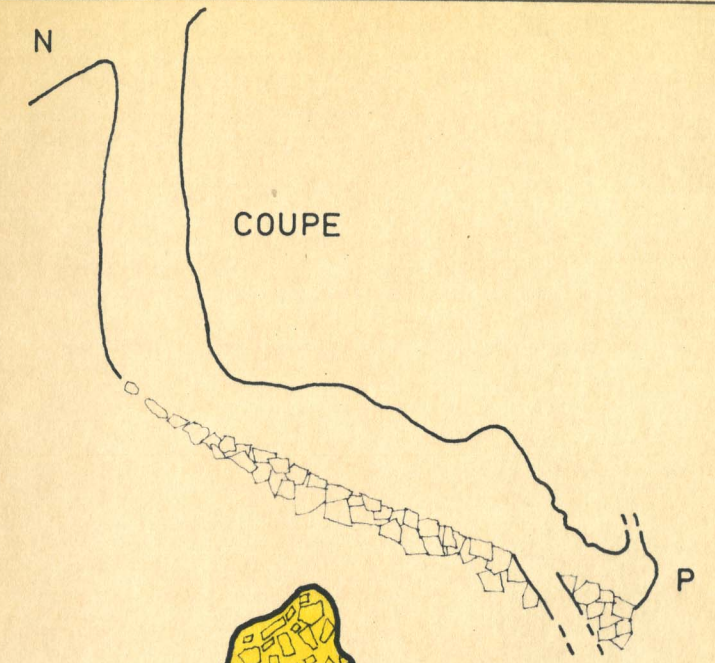
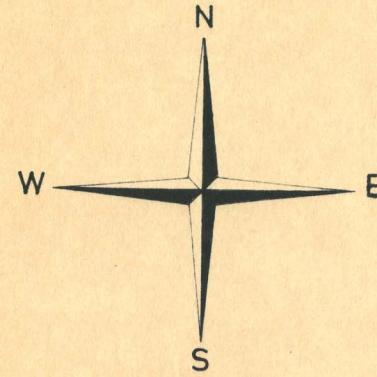
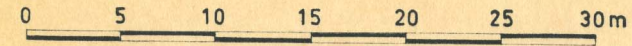
Le dernier stade d'évolution : remblayages locaux interrompant - ou presque - la circulation de l'eau, est tout à fait semblable à ce qui s'est passé à la Grotte du Pont à Esneux (voir fig. 3, b).


Pour tout ce qui précède, les deux grottes s'opposent au contraire : présence de grandes salles à Comblain, absentes à Esneux, mais régularisation et normalisation du cours souterrain à Esneux jamais réalisées à Comblain. La Grotte du Pont d'Esneux est une rivière souterraine vue dans le secteur de sa résurgence, la Grotte de Comblain-au-Pont représente la désorganisation d'un réseau près des points de perte lorsque ces points sont nombreux.

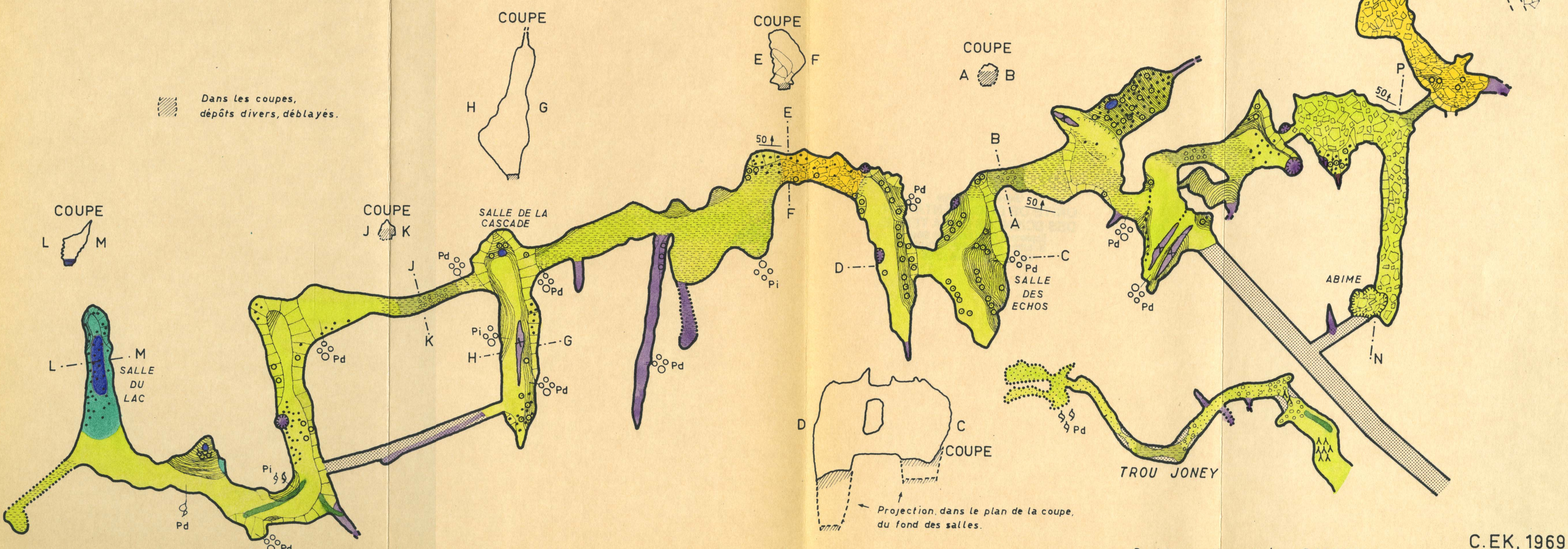
GROTTE ET ABIME DE COMBLAIN-AU-PONT

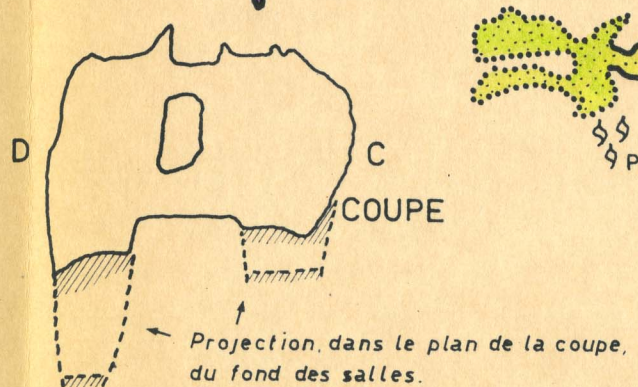
PROVINCE DE LIEGE.

CARTE MORPHOGENETIQUE



 Dans les coupes, dépôts divers, déblayés.




Projection, dans le plan de la coupe, du fond des salles.

Fond topographique : Levé par E.GRANDJEAN.

C.EK, 1969.

9. La Grotte de Remouchamps, Province de Liège.

L'Amblève traverse à Remouchamps la bande des calcaires frasniens qui longe le bord N de l'Ardenne. C'est dans ces calcaires, à une cinquantaine de mètres de la rivière, que s'ouvre la Grotte de Remouchamps.

C'est une vaste cavité : son développement (longueur cumulée de toutes les galeries connues) est de plus de 2800 m. Elle comprend un étage inférieur, actuellement parcouru par un cours d'eau permanent qui se jette dans l'Amblève (il débouche dans la vallée au niveau même de la plaine alluviale), un étage supérieur sec, grossièrement parallèle au premier, et divers autres passages, les uns reliant les deux étages, les autres se développant au-dessus de ces étages (1).

La carte morphogénétique (en annexe, à la fin de ce volume) montre que la rivière qui parcourt l'étage inférieur l'a sculpté elle-même : la pente régulière du conduit et son calibrage, bien que non parfaits, l'attestent, de même que la présence de niveaux d'érosion dans la roche, à d'anciens niveaux de l'eau.

L'étage supérieur a une morphologie beaucoup plus complexe. On y retrouve sur un long parcours, les traces de l'action du cours d'eau souterrain qui le parcourait avant de gagner l'étage inférieur. Nous avons déjà discuté ce fait, pour le secteur d'aval, dans la Deuxième Partie (chapitre III, p.74). Mais d'autres parties de cet étage n'offrent plus de traces nettes de l'action de la rivière ; c'est le cas, par exemple, de la Grande Galerie, qui, avec son plafond haut d'une vingtaine de mètres offre plutôt l'aspect des longues

(1) On trouvera dans un magistral ouvrage de E. van den Broeck, E.A. Martel et Ed. Rahir (1910) une description détaillée de cette grotte (du moins de ses parties connues à l'époque), ainsi que de plusieurs autres cavités dont nous présentons les cartes dans le présent chapitre.

salles de la grotte de Comblain-au-Pont, et qui, comme elles est un ancien point d'arrivée d'eau. Parmi la gamme de teintes vertes, qui correspondent sur les cartes à l'action de l'eau, c'est donc la teinte réservée à l'action de l'eau courante en écoulement libre mais non "fluviale" qui a été employée.

Dans les deux étages, on trouve aussi (*en vert foncé sur la carte*) des conduites forcées, à section circulaire ou elliptique. Ces passages sont plus anciens que les morphologies "fluviales" ou "d'eau courante mais non fluviale". En effet, les "tubes" sont en plusieurs endroits recoupés par les deux autres morphologies ; nous n'avons jamais observé l'inverse à Remouchamps ni ailleurs.

On trouve enfin d'anciens siphons (*figurés sur la carte par un vert olive*). Le plus important est situé le plus en aval (au lieu-dit "le Précipice"). Il constitue en effet un passage surbaissé tel que, à l'époque où l'eau coulait dans la grotte au niveau de l'étage supérieur, la rivière souterraine a toujours dû, en ce lieu, descendre jusqu'à 9 m plus bas que le niveau régularisé de l'étage supérieur. Les autres siphons n'ont pas cette ampleur, et les deux principaux représentent une descente locale de l'eau de deux ou quatre mètres. Ils sont néanmoins plus que de simples accidents de parcours car ils ont joué un rôle dans l'évolution ultérieure de la grotte. Précisons d'abord que le siphon de "l'Entonnoir" et celui de la "Salle de la Vierge" sont tous deux de vrais siphons permanents et non des voûtes temporairement "mouillantes" : tous deux en effet ont leur plafond plus bas que le sol de la galerie de part et d'autre du siphon. Le fond de ces deux siphons est encombré de cailloux roulés, bloqués là par la contre-pente de la branche aval du siphon. Tous deux ont eu un rôle privilégié dans la capture de l'eau du réseau supérieur par l'étage inférieur : au point le plus bas de chacun de ces siphons s'ouvrent des puits ou des galeries en pente

très raide qui relie les deux étages. Creusés par l'eau comme l'atteste leur morphologie, ces puits ne se sont formés ni avant l'existence de tout passage inférieur (la circulation de l'eau y aurait été nulle ou très lente) ni après l'abandon total par les eaux de l'étage supérieur (il n'y aurait plus eu de débit d'eau suffisant pour les constituer). Ils représentent donc un stade intermédiaire entre les deux étages, plus précisément le passage d'un à l'autre, par des points de perte souterrains. Le passage aval (celui de "l'Entonnoir") a forcément dû se creuser le premier, puisque la réalisation de la "capture" amont a mis à sec la partie aval de l'étage supérieur, y compris la région de "l'Entonnoir".

Concernant la localisation des siphons, on notera que deux des principaux (le siphon du Précipice et celui de la Salle de la Vierge) sont situés en des points où la rivière suivait une direction parallèle à la direction du pendage des couches. Ce fait a été discuté dans la Deuxième Partie (chapitre III, p.75).

Peu de traces d'une action nettement "phréatique", due à une eau à peu près immobile, s'observent dans la grotte ; quelques-unes sont signalées (*en vert sombre*) dans le Réseau du Cinq-Février (partie E de la grotte) ; d'autres existent au-dessus du lit actuel de la rivière dans le secteur de la Cathédrale (partie N de la grotte), trop localisées pour être représentées sur la carte.

Les secteurs de la grotte qui doivent leur morphologie actuelle aux éboulements sont somme toute peu abondants (*en jaune et jaune orangé sur la carte*) ; le plus important est celui de la Cathédrale (voir la coupe jointe à la carte). Les éboulements coïncident soit avec des niveaux plus schisteux, ou comprenant des lits de schiste, soit - et surtout - avec les failles qui traversent la grotte et qui ont été cartographiées sur la carte géologique annexée à la Deuxième

Partie. Plusieurs des zones d'effondrement présentent des cassures très fraîches (*signalées par un sigle spécial sur la carte*) qui recoupent même des concrétions : ces zones d'éboulis sont donc encore susceptibles d'une certaine activité.

Nous reviendrons plus loin sur la morphogénèse de diverses parties de la Grotte de Remouchamps, qui est particulièrement riche en enseignements.

On peut cependant déjà remarquer l'opposition entre l'étage inférieur et le reste de la grotte. L'étage inférieur présente presque partout une morphologie monotone, due au creusement par un cours d'eau souterrain. Les parties supérieures, où la même morphologie n'est pas absente, comportent en outre une grande variété d'effets d'autres facteurs que le cours d'eau : action des eaux d'infiltration, des siphonnements, action des éboulis ...

Certes, la relative uniformité de la morphologie de l'étage inférieur s'explique par sa jeunesse par rapport aux autres passages. Il n'en est pas moins intéressant de constater ainsi combien un cours d'eau peut imprimer son empreinte à toute une longue galerie, et combien aussi des actions ultérieures peuvent altérer les formes ou même faire disparaître par endroits les traces d'un cours d'eau, même important.

10. La Grotte de Rochefort, Province de Namur.

La Grotte de Rochefort s'ouvre dans les calcaires dévoniens qui, à Rochefort, forment un large replat dominant la rive gauche de la Lomme.

La grotte est essentiellement constituée de quelques grandes salles formées par effondrement, et reliées par des passages tortueux, eux aussi au sein d'éboulis.

Néanmoins, en bordure des grandes salles et dans quelques diverticules, diverses parties de la grotte montrent des traces de l'action de l'eau. Une rivière souterraine parcourt d'ailleurs la grotte ; on la voit près de la Salle du Sabbat, mais on peut l'atteindre également par deux puits, l'un dans la Salle du Cataclysme, l'autre plus à l'Ouest. Tout autour du lit mineur de la rivière, la roche est profondément corrodée, rongée, et présente de profonds creux séparés par des parois aux rebords tranchants. Il est évident là que la corrosion n'est guère accompagnée de corrasion, et le paysage y est du type que J.H. Bretz (1942) nommerait "phréatique", c'est-à-dire formé sous une "nappe aquifère".

La grotte présente toutefois d'autres formes dues au creusement par l'eau, et surtout de nombreux "tubes". Nous avons déjà décrit ces formes plus haut (cf. §§ 2, 7 et 9). Les vestiges de conduits cylindriques au plafond de la Grotte de Rochefort nous apportent cependant une information nouvelle sur le régime hydrologique de ces "tubes" : il y a en effet des cailloux roulés épars sur le plancher de la grotte, à peu près sous chaque vestige de "tube" ; or, pour le reste, les cailloux roulés sont très peu abondants et très localisés, dans cette grotte. Nous en déduisons que les tubes ont transporté des cailloux roulés ; or la plupart de ces tubes présentent à Rochefort des pentes très faibles ; nous pouvons donc préciser que l'eau circulait dans ces tubes, épisodiquement au moins, à assez grande vitesse.

Enfin, l'action de l'eau se manifeste encore dans la grotte d'une part par l'élargissement des fissures, d'autre part par des actions diverses sur les parois : ruissellement, peut-être condensation, courants divers par places mais que l'on ne peut pas assimiler à une "rivière" souterraine (voir carte annexée, à la fin du volume).

Ces divers types de traces de l'action de l'eau ne se retrouvent que dans des passages assez étroits, n'ayant pas subi l'action des effondrements ; mais plus des 9/10 de la superficie du plan de la grotte montrent de vastes salles couvertes d'éboulis. Ceux-ci ont certainement été favorisés par la présence de nombreux joints schisteux et par la nature calcschisteuse d'une partie importante de la formation cavernée.

Nos observations permettent d'établir comme suit la succession des stades de la formation de la grotte :

a - Les conduits cylindriques sont presque tous parallèles à la stratification ; peut-être constituent-ils un ancien raccourci de la Lomme dont la vallée à Rochefort quitte la bande calcaire pour faire un long détour avant de la retrouver en aval de la ville. Un raccourci expliquerait une pente plus forte que celle de la rivière, une vitesse d'écoulement assez grande ... Le fond des grandes salles, enfoui sous les éboulis, est situé bien plus bas que le niveau auquel nous avons observé les tubes ; les salles sont donc plus récentes que les conduites forcées. Aux Arcades, près de la Salle du Sabbat, il y a des diaclases qui recoupent des conduites forcées ; ces diaclases ont leur fond, en forte pente, plus bas que le fond des conduits tubulaires recoupés ; elles ont donc drainé l'eau des tubes : les fissures de diaclases qui croisent les tubes aux Arcades sont donc plus récentes que ceux-ci.

b - Les traces d'eau courante qui se manifestent en plusieurs points de la grotte sont-elles plus récentes ou plus anciennes

que les conduites forcées ? Le seul lieu où ces deux types d'action sont contigus est le secteur de la Salle du Timbre, à l'extrémité W de la grotte : là, les tubes ont eu leur moitié inférieure érodée par un autre type d'action de l'eau courante, probablement du ruissellement, ou des courants que nous ne pouvons déterminer, qui ont fait disparaître la moitié de la section cylindrique ; cette autre action de l'eau, qui a créé la Salle du Timbre, est donc postérieure aux conduites forcées ; comme les cailloux roulés n'ont pas été emportés, il s'agit probablement en tout cas d'un courant moins rapide que celui des tubes. La chose est normale si l'on songe que les nouvelles cavités ainsi apparues ont une section bien plus large que les conduites forcées.

c - Mais ce type de morphologie est confiné aux diverticules ou aux places où le rétrécissement des salles a laissé subsister des voûtes basses et étroites, comme, par exemple, dans le secteur S de la grotte, entre le Trou Marie Sac-Attrape et la Salle du Sabbat. Partout ailleurs, il n'y a qu'éboulements. Ceux-ci se sont produits probablement en deux stades au moins. En effet, les éboulis de la Salle du Sabbat sont - et sont seuls, comme le montre la carte - couverts de stalagmites. Tous les autres éboulis sont dépourvus de concrétions notables (sauf la Salle du Dromadaire, à l'E du Val d'Enfer). Il nous semble qu'aucune différence, aucune nuance, lithologique ou hydrogéologique, ne peut rendre compte de ce fait. L'explication la plus simple consiste alors à admettre que des éboulis anciens ont eu le temps de se couvrir de concrétions dépassant parfois un mètre de haut, tandis que les éboulis plus récents sont pratiquement nus. La différence est si nette que l'on peut parler ici de deux stades distincts au moins, sans préjuger en effet d'une chronologie plus poussée qui reste à établir.

d - Quant à l'aspect "phréatique" des abords de la rivière souterraine, c'est un effet d'actions encore actuelles : en effet, lorsque l'eau monte, en temps d'inondation, elle forme, à cause d'étranglements situés plus en aval, une étendue d'eau calme, présentant un mouvement de l'eau de bas en haut puis de haut en bas très lent (les crues durent de quelques jours à quelques semaines), tandis que la vitesse de l'eau est, aux places où l'on peut voir la rivière, très faible : c'est une situation "phréatique" temporaire, qui résulte de ce que l'on est dans la zone de battement de la "nappe" (1).

La Grotte de Rochefort présente donc actuellement une morphologie provenant de quatre types de creusement au moins, qui se sont succédés dans le temps, et dont les éboulis représentent de loin le type de morphogenèse le plus important, si l'on en juge par la superficie qu'ils occupent.

(1) On discutera plus loin (chapitre III) de l'existence ou non d'une réelle "nappe" dans les calcaires de Belgique.

11. Grotte du Père Noël, à Wavreille, Province de Namur.

La Lesse fait à Han, en quittant les calcaires dévoniens, un grand méandre qui est recoupé par un cours souterrain. C'est dans une profonde crevasse du plateau qui domine ce méandre que s'ouvre la Grotte du Père Noël (1), vaste cavité de 500 m de longueur (à vol d'oiseau).

Comme la Grotte de Rochefort, la Grotte du Père Noël est caractérisée par de vastes éboulements. Ceux-ci atteignent des proportions gigantesques puisque le seul complexe des salles de la région orientale de la Grotte (Salle des Trois, Salle du Bivouac, Salle Blanche) représente une zone d'éboulis d'un seul tenant de plus de 200 m de long, et de plus de 6500 m² de superficie.

La grotte est constituée de deux vastes zones d'éboulis, reliées par une zone médiane dont la morphologie est due à l'action de l'eau (courante surtout), comme le montre la carte annexée en fin de volume. Une dérivation souterraine de la Lesse parcourt d'ailleurs la grotte et se voit dans la zone médiane de celle-ci.

En plusieurs places s'observe de l'argile entre les blocs éboulés ; l'argile a deux origines différentes : le plus souvent, il s'agit de la désagrégation directe, pratiquement sur place, de joints schisteux, comme en témoignent les paillettes de schiste présentes dans l'argile et le passage progressif, dans les dépôts, de l'argile aux débris de schiste ou de calcschiste. Mais dans les points bas, atteints par la rivière en temps de crue, des dépôts argileux proviennent de l'eau dans laquelle ils étaient en suspension. Les crues donnent en effet lieu à des hausses de niveau d'une eau très calme, à cause probablement d'obstacles à la circulation situés en aval.

(1) *Découverte à la Noël 1964 par le Centre Y.M.C.A. de Recherches et d'Entraînement spéléologiques.*

Ici, comme à Rochefort, et comme dans toutes les cavités que nous avons étudiées en Belgique, les effondrements ont succédé à une morphologie due à l'action de l'eau comme en témoignent les traces de creusement par l'eau visibles sur certains bords des salles et, aux places où l'on peut s'insinuer dans les éboulis, les couloirs sous-jacents aux blocs effondrés.

Toutefois, à la Grotte du Père Noël, il est une source de difficultés supplémentaires : l'action de la gravité et l'action des eaux apparaissent très imbriquées. Nous nous bornerons ici à en donner quelques exemples concrets.

Exemple 1 : entre l'entrée et la Salle des Trois, des éboulis recouvrent le sol à peu près partout. Mais, près de l'entrée, le plafond présente de nettes traces de l'action de l'eau, qui a émoussé une morphologie antérieure d'effondrements (en a, sur la fig. 4).

Cette action de l'eau est beaucoup plus modeste en b (fig. 4) : elle diminue progressivement et, dans la zone c, il n'y a plus de retouche notable par l'eau. *Cet exemple illustre une des difficultés de la cartographie : le cas des limites floues ou progressives entre deux morphogénèses.* Mais il nous montre surtout un phénomène de retouche par l'eau d'une morphologie de gravité : c'est l'inverse du cas général (en Belgique).

Exemple 2 : parmi les éboulements qui, le long de la paroi S de la Salle du Bivouac, voisinent la Chambre à coucher, il est un bloc éboulé de 10 m³ environ qui a été rongé par l'eau sur plusieurs de ses faces (visiblement après son effondrement), et qui présente en outre une profonde encoche due à un courant d'eau sur une face ; cette encoche étant allongée horizontalement, il est probable qu'elle témoigne de l'action d'un cours d'eau après l'effondrement ; cependant le hasard pourrait avoir posé de cette façon un bloc érodé par l'eau avant sa

chute. Ce bloc témoigne donc de la succession d'événements suivante :

- effondrement ;
- probablement : action vadose par un courant d'eau important ;
- certainement : corrosion de type "phréatique", durant des périodes d'inondation du bas de la salle.

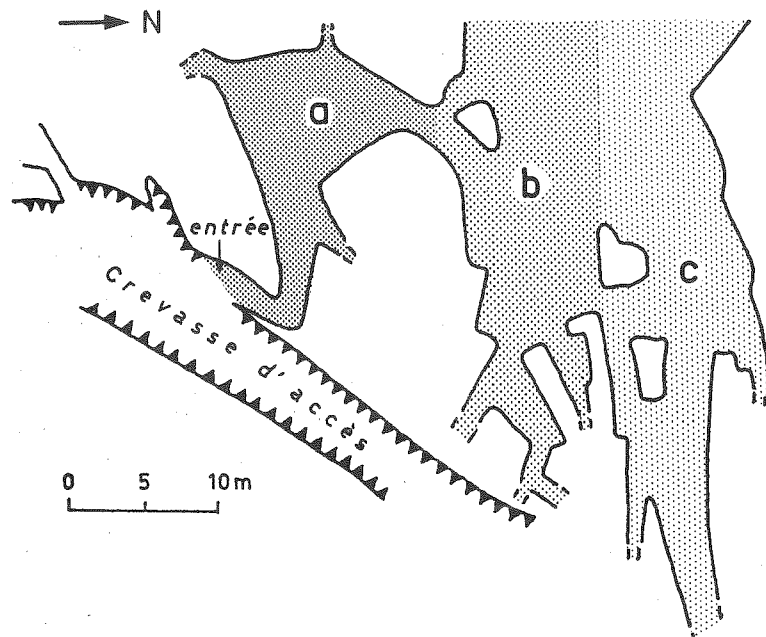


FIG. 4 : Plan du secteur d'entrée de la Grotte du Père Noël (topographie d'après un levé de P. Vandersleyen) : passage progressif d'une morphologie due à l'eau à une morphologie due uniquement à la gravité : a : plafond d'effondrement, notablement retouché par l'action des eaux d'infiltration, et peut-être de condensation ; b : forme du plafond essentiellement due aux effondrements, avec retouches par l'eau de plus en plus modestes en allant vers le N ; c : effondrements subactuels, cassures fraîches nombreuses au plafond, qui est en voie de lente "subsidence" (sommets de stalagmites écrasés sous la pression du plafond) ; pas d'action corrosive ou abrasive de l'eau visible, mais concrétions abondantes. Le passage de a à c étant relativement progressif, les limites sont quelque peu arbitraires dans le détail.

Exemple 3 : Dans la Salle du Cobra, les blocs qui jonchent le sol sont émoussés ; il n'est pas rare que ce fait soit dû à des actions corrosives ayant, le long des fissures de la roche, préparé des effondrements ; cela correspond alors aux "effondrements préparés par l'action chimique de l'eau", que nous indiquons en jaune orangé sur nos cartes ; mais, dans la Salle du Cobra, l'usure des blocs se marque sur toutes les arêtes actuellement exposées (c'est-à-dire après la chute) et on ne peut donc l'attribuer qu'à une action de l'eau postérieure à l'effondrement.

Ces exemples de l'intrication des actions de la gravité et de l'eau révèlent donc une plus grande complexité de formes dans cette grotte qu'à la Grotte de Rochefort par exemple. Nous attribuons ce fait à ce que la Grotte du Père Noël en est à un degré d'évolution moins avancé que la Grotte de Rochefort : les formes dues à l'eau (antérieurement aux éboulements) sont très imposantes à la Grotte du Père Noël ; les écroulements sont loin de les avoir masquées toutes. De plus, l'épaisseur des éboulis au-dessus des formes dues à l'eau est, en certains points au moins, assez modeste.

Enfin, la complexité des formes va ici de pair avec la complexité des processus morphogénétiques actuels dans la grotte. L'eau a des actions "fluviales" dans la rivière souterraine, mais surtout des effets "phréatiques" dans la zone de balancement du niveau de l'eau. La complexité est grande, par exemple, dans les environs du Siphon : sous un plafond formé par écroulement, le sol est tout couvert d'argile (dépôt de crues) et, sous un niveau déterminé, il y a de l'argile au plafond aussi, sauf dans certains creux qui sont en temps de crue occupés par des poches d'air. Sur certaines parois, l'argile est localement lavée par l'eau : certainement par de l'eau d'infiltration ruisselant à partir de fissures.

Il y a donc ici à l'époque actuelle des dépôts en relation avec les oscillations d'un plan d'eau calme, et des actions érosives dues au ruissellement d'eaux d'infiltration, sous un plafond antérieurement formé par écroulement.

La gravité s'exerce aussi actuellement : en de nombreux points, des cassures aux angles vifs sillonnent les plafonds (*elles sont signalées sur la carte par un sigle particulier*). Les éboulis sont très instables et, dans un passage étroit, au point le plus septentrional de la grotte, ils présentent un mur presque vertical sur 1,50 m de haut. Il s'agit donc d'un éboulis récent encore loin de l'équilibre.

Près de l'entrée (en c, fig. 4), il y a des stalagmites qui ont crû jusqu'au plafond, et celui-ci pèse maintenant sur elles au point que leur sommet est écrasé, fissuré, et par places littéralement broyé : le plafond s'affaisse donc lentement, d'un bloc.

Dans la Salle du Cobra, on observe une série de blocs effondrés surmontés de stalagmites. Ces stalagmites ont, sur les 25 derniers cm avant leur sommet, poussé obliquement toutes dans la même direction (fig. 5). Ceci témoigne d'un glissement solidaire et progressif des blocs : autre forme encore de l'action de la gravité.

La Grotte du Père Noël nous montre donc l'intrication de l'action de l'eau et de celle des écroulements, et l'actualité des deux catégories de processus.

FIG. 5 : Stalagmites sur des blocs écroulés dans la Salle du Cobra (Grotte du Père Noël). La déformation parallèle de la partie supérieure de toutes les concrétions témoigne d'un glissement en masse progressif de tous les blocs solidairement.

C. EN GUISE DE PREMIERE CONCLUSION : CRITIQUE DE LA METHODE
CARTOGRAPHIQUE PRESENTEE.

1. Originalité, utilité.

La méthode cartographique présentée est à notre connaissance absolument originale et représente, croyons-nous, la première tentative de levés morphologiques et morphogénétiques comparés dans diverses grottes.

Là légende que nous proposons indique non seulement le facteur du creusement qui a donné sa forme actuelle à la cavité, mais aussi, jusqu'à un certain point, le processus suivant lequel ce facteur a agi.

La cartographie apporte d'ailleurs à l'étude de la genèse, indépendamment du détail du choix des termes de la légende, la connaissance de l'importance spatiale des différents types de creusement et des relations spatiales entre eux. Ce sont deux points sur lesquels, pensons-nous, la spéléologie est particulièrement pauvre en renseignements précis jusqu'ici.

Nous avons fait peu d'allusions à la cartographie des dépôts, qui fait partie intégrante de notre méthode. C'est que nous n'avons pas voulu alourdir un exposé relatif au creusement des grottes et que le levé des dépôts n'est pour nous qu'un appui méthodologique (d'ailleurs indispensable) ; il est évident qu'on peut aussi bien utiliser les mêmes levés à des fins d'études sédimentologiques, la connaissance du creusement devenant alors un appui pour l'étude des remplissages.

2. Caractère synthétique.

La légende présentée est synthétique en ce qui concerne les couleurs : celles-ci ne représentent pas une

forme morphologique isolée, mais un facteur de creusement ; elles ne séparent même pas explicitement la corrosion de l'érosion mécanique - distinction au demeurant beaucoup plus difficile qu'on pourrait le penser - mais on s'attend évidemment à trouver des formes de corrosion aux endroits où la légende indique l'action d'une rivière souterraine mais non dans une étendue cartographiée comme ayant une origine "phréatique", etc.

On peut reprocher à la légende d'être trop synthétique, par exemple en ne marquant pas de nuances dans la genèse des puits et des cheminées, ou en rassemblant le ruissellement, la condensation et le creusement par des courants de direction indéterminée.

Trois motifs nous ont imposé cette limitation. Tout d'abord, dans une première étude faite par cette méthode, qui est aussi le premier travail quelque peu détaillé consacré à la genèse des grottes de Belgique depuis l'ouvrage de van den Broeck, Martel et Rahir (1910), il fallait limiter le nombre de catégories cartographiées pour pouvoir dégager des traits généraux et pour cerner les problèmes. Le deuxième impératif qui a limité les catégories et surtout qui nous a imposé certains regroupements est l'ignorance dans laquelle nous sommes de critères sûrs pour la distinction de certains processus. Par exemple, si des indices nous font croire à l'existence d'une corrosion par l'eau de condensation, les critères nous manquent en général pour identifier avec précision cette action et pour pouvoir exclure que la forme observée soit due à d'autres types d'eau. Un motif purement pratique nous astreindrait cependant à limiter les catégories si nos connaissances étaient plus étendues : c'est que, dans l'état actuel, la légende comporte déjà six teintes pour l'action de l'eau et deux pour celle de la gravité seule, ce qui, après la représentation des dépôts en noir et des eaux en bleu nous amène, avec 10 couleurs, à la limite d'une

cartographie facile à lire, comme nous avons voulu la nôtre.

D'autre part, à côté des teintes de caractère synthétique, à signification génétique, nos cartes présentent un côté analytique par la représentation par des sigles d'une série de formes (non de processus) bien déterminées, familières aux spéléologues, telles que les coups de gouge, les pendentifs rocheux ou les cannelures de puits. Ce sont là des repères qui permettent au lecteur un contrôle, une critique de l'interprétation génétique présentée pour chaque partie de la grotte.

3. Le problème du tracé des limites.

Nous avons mis l'accent, dans le dernier exemple de grotte étudié (la Grotte du Père Noël), sur le caractère flou ou mal défini de certaines limites. Dans de tels cas, on aurait pu combiner par des rayures de différentes teintes les différents processus intervenus. Ce procédé aurait très fréquemment induit le cartographe en tentation de barioler toutes les cartes. Il nous a semblé indispensable de nous obliger à un choix en vue de la clarté de la carte. La clarté est donc, certes, au prix d'un certain schématisme, mais non subjectif puisque c'est le processus dominant qui a été recherché et représenté.

4. Le problème de la notion de genèse.

Chaque grotte ou partie de grotte a en général connu une évolution complexe dans laquelle divers processus se sont succédé. Si même on ne retrouve plus de trace des premiers procédés de la karstification, il est courant par contre qu'un élément de grotte doive sa localisation à un agent déterminé, sa forme générale à un processus dépendant d'un autre agent, et l'aspect de certains détails des parois à une troisième cause, plus récente. Nous nous sommes efforcé de rechercher le type de creusement à l'origine de la forme actuelle

observée. Ainsi, nous avons représenté le processus ayant donné à un conduit sa forme ronde, à une salle son plafond plat, etc. Toutefois lorsque même une section d'un couloir était de façon obvie due au passage d'une rivière (du fait, par exemple que l'on en avait des vestiges nets en amont et en aval), mais que cette section ne présentait plus aucune trace indubitable de cette rivière, nous avons pris en considération le processus (ruissellement par exemple) qui avait oblitéré l'ancien modelé.

En fait, le problème a souvent été résolu grâce aux sigles spéciaux réservés à des formes locales bien déterminées. Par exemple, des cupules peuvent être repérées comme telles sur une paroi d'une salle dont l'origine est attribuée (par le coloriage en jaune) à des effondrements ; ou encore des pendentifs rocheux peuvent être signalés dans une forme en "tube" et indiquer ainsi son remaniement, etc.

Cette méthode consistant à considérer l'origine "de la forme actuelle" est un peu au détriment de l'important problème de l'origine première des grottes et de l'aspect des conduits primitifs. Mais nous estimons que ce problème ne peut être traité avec succès qu'après qu'on ait acquis suffisamment de données sur les processus les plus récents, les formes les mieux conservées. Nous pensons donc, dans ce domaine, n'avoir encore fait, par notre méthode cartographique, que le premier pas.

5. Les résultats des premiers levés.

Nous pensons avoir montré, dans les onze exemples de grottes cartographiées qui ont été présentés plus haut, que le levé cartographique permet tout d'abord une représentation, très suggestive et précise à la fois, des divers processus ayant contribué à donner à chaque cavité sa forme actuelle. Mais ce même levé nous a donné plus que des indications sur la juxtaposition des formes de creusement : dans

bien des cas une chronologie relative peut être établie, et c'est là, pensons-nous, un pas important vers le problème des formes anciennes. Le caractère primitif - par rapport aux formes plus récentes observées - des conduits tubulaires, l'existence de stades phréatiques venant après un stade vadose, sont des exemples de résultats concrets dans le domaine de la chronologie relative.

Tout ceci n'empêche que nous livrons ici une légende de carte qui est de toute évidence appelée à évoluer avec nos connaissances ; nous lui croyons le double mérite d'être la première en son genre et de nous avoir beaucoup appris.

C'est pourquoi, en dehors de toute considération théorique, nous pensons que le lecteur jugera, sur les onze exemples présentés plus haut, si le bilan de la méthode cartographique est, ou non, positif.

+

+

+

C H A P I T R E I I

Les types de morphologie karstique souterraine

S O M M A I R E

=====

A. LES ELEMENTS DE LA MORPHOLOGIE.

1. Les formes dues à l'action de l'eau : étude de l'action morphologique des différents types de mouvements de l'eau; distinction de deux grandes catégories de courants : courants "structuraux" et courants "régularisés".
2. Les effondrements : importance de cette action ; origine mécanique et origine chimique des effondrements ; actualité des effondrements ; ils sont à l'origine de la forme actuelle des plus grandes salles de grottes en Belgique.
3. Erosion et sédimentation : l'étude des dépôts sort du cadre de ce travail, sauf dans la mesure où elle éclaire les processus de creusement.

B. DIFFERENCES MORPHOLOGIQUES ENTRE LES CAVITES DES FORMATIONS CALCAIRES DEVONIENNES ET CELLES DES FORMATIONS DINANTIENNES.

1. Rappel des différences structurales et hydrologiques déjà exposées, dans les deux parties précédentes de ce travail : conséquences de la structure générale du Synclinorium de Dinant : forte teneur en calcaire dissous des eaux provenant des grès famenniens.
2. Nouvelles différences dans les facteurs de la karstification : opposition entre la morphologie des dépressions synclinales du Carbonifère et celle de la bande des calcaires méso- et néodévonien. Opposition entre le drainage longitudinal dans les dépressions carbonifères, et le drainage transversal de la bande des calcaires méso- et néodévonien.
3. Différences dans la morphologie des grottes : les vraies rivières souterraines et les vastes salles d'effondrement sont quasiment l'apanage des calcaires dévonien. Les grottes du Calcaire Carbonifère présentent au contraire certains caractères hérités d'une origine "phréatique". Ces différences sont liées aux différences de morphologie de surface signalées au paragraphe précédent.

A. LES ELEMENTS DE LA MORPHOLOGIE.

1. Les formes dues à l'action de l'eau.

Notre but est ici de reprendre brièvement mais systématiquement les formes signalées dans le chapitre précédent ; elles permettent en effet l'identification de l'action morphologique globale des divers types de mouvement de l'eau. Nous laisserons pour le chapitre suivant la question de l'importance relative de la dissolution et de l'érosion mécanique.

Nous considérerons successivement les puits, les fissures, les cheminées et les "cloches", les formes dues à l'action de l'eau très calme, les conduits tubulaires, les rivières souterraines, les siphons, les effets du ruissellement et ceux de la condensation.

Qu'on nous permette de rappeler ici que les considérations qui suivent concernent les karsts de Belgique.

a - Les puits.

Certains gouffres sont créés par des éboulements procédant à partir d'une cavité et remontant vers la surface. C'est le cas du trou de 16 m de profondeur qui donne accès au Trotti aux Fosses (chapitre I, B, § 5 : voir la carte). Nous excluons ce type d'abîme ("aven d'effondrement") du présent paragraphe, consacré à l'action de l'eau. Ceci posé, la morphologie des puits observés est essentiellement le fait de l'eau descendant, et descendant vite (1). Les larges cannelures de certains puits, les sillons hélicoïdaux, le relatif

(1) Ceci n'est pas une évidence. F. Trombe (1952) signale des puits formés par de l'eau circulant de bas en haut en conduite forcée (*op. cit.* p. 67). Nous ne connaissons pas d'exemple notable de ce phénomène en Belgique. B. Gèze (1953), dans une étude des gouffres, signale également l'existence d'avens émissifs et de cheminées d'équilibre, non émissives, raccordées au réseau profond.

polissage des parois en sont autant de signes. Dans la mesure où ils présentent cette morphologie (et c'est en Belgique un cas très général), les puits doivent être considérés comme des points de passage d'un réseau supérieur (épigé ou hypogé) à un réseau de drainage inférieur. Seul ce processus explique d'ailleurs l'élargissement des grands puits vers le bas, noté déjà par P. Chevalier (1944) qui attribue le fait à l'augmentation de l'énergie cinétique de l'eau en fonction de la hauteur de chute : plus grande est cette hauteur, plus l'eau aura de force érosive. Le haut des puits s'élargit dès lors peu, et le bas davantage.

b - Les fissures.

Si les puits ont donné lieu à une littérature abondante et à des controverses passionnées, il n'en va pas de même des fissures. Les fissures observées dans les grottes belges sont de deux types - nous nous limitons ici aux fissures élargies par l'action de l'eau et ne faisons pas allusion aux fentes d'origine mécanique, thermique, etc., non retouchées. Le premier type est dû au mouvement latéral, lent, d'une eau occupant tous les interstices dans un réseau noyé. C'est le sens dans lequel on emploie souvent ce mot dans l'expression "réseau de fissure" et plus encore dans l'expression anglo-saxonne "fissure cave". C'est, pensons-nous, l'origine des fissures des Grottes jumelles de Flère (fig. 6), qui présentent une très fine dissolution différentielle et en particulier de remarquables "boxworks" (1).

(1) Nous avons signalé ce phénomène dans la description de la Grotte de Comblain-au-Pont, p. 29 .

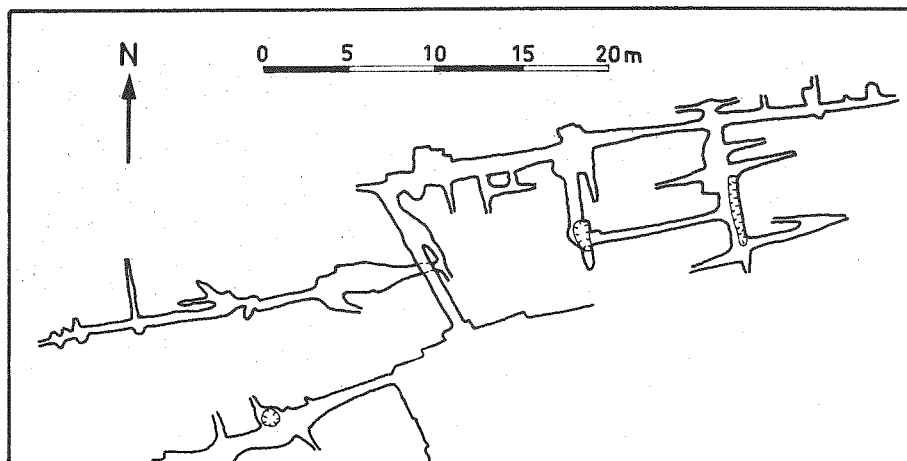


FIG. 6 : Extrait du plan des Grottes jumelles de Flère, à Pepinster (plan par P. Vandersleyen). Réseau de fissures à peu près au niveau actuel de la Vesdre.

Nous pensons cependant que la plupart des fissures observées dans les grottes belges ont une origine bien différente et constituent un second type. Elles doivent leur forme actuelle au ruissellement d'eau infiltrée sur les éponges de fentes dans la roche : les fissures montrent très généralement des sillons ou des ondulations allongés verticalement, et, dans les réseaux aérés, présentent souvent par temps humide des suintements plus ou moins abondants. Ces fissures sont donc le fait d'une descente de l'eau et non d'un mouvement latéral (1).

Certes, il se pourrait que les deux types de fissures proviennent toujours, au départ, du premier type d'action.

(1) L.G. Brod jr (1964) a décrit (dans le Missouri) un autre type de fissures, dues à l'action artésienne de l'eau d'une nappe sous pression. Certains de ses résultats ont été discutés par J. Hedges (1965). Nous n'avons pas trouvé d'exemples de tels phénomènes en Belgique.

Mais chacune de ces deux actions a normalement pour effet de détruire les traces de l'autre, et nous croyons donc, dans l'état actuel de nos critères, qu'il faut ici encore se borner à reconnaître l'origine de la forme actuelle (1).

c - Cloches et cheminées.

Pour le spéléologue, une cheminée est bien souvent un puits ... vu d'en bas. Toutefois, il arrive que des cheminées se terminent en cul-de-sac à leur sommet ("cheminées aveugles"), et ne soient bel et bien accessibles que d'en bas. On a alors à faire à un phénomène différent de celui du puits. De telles cheminées nous paraissent être parfois l'exagération d'un creux en forme de cloche tel qu'on en trouve souvent aux plafonds (ou dans les parois) des cavités(2).

Ces creux en forme de cloche ont une taille extrêmement variable, parfois minuscule, parfois atteignant un diamètre à la base de l'ordre du mètre et plusieurs mètres de hauteur (3). L'axe n'est pas toujours vertical ; quand il ne l'est pas, l'inclinaison est due au pendage des bancs, ou à la pente des diaclases.

-
- (1) *Pour ces raisons, sur nos cartes, nous n'avons pas subdivisé la représentation des fissures suivant les deux genres ici exposés. La très, très grande majorité des fissures observées nous apparaissent comme étant du second type, et, dans des roches qui ne se prêteraient pas au creusement de boxworks, le premier type a beaucoup de chance de n'exhiber aucun signe clair de son origine.*
- (2) *Il ne s'agit bien entendu pas ici des plafonds d'éboulement, dont la forme est dite par certains auteurs "en cloche", mais d'une morphologie due à l'eau.*
- (3) *C.E. Wilford (1966) a décrit de telles cloches (bell holes) à Sarawak, ayant un axe toujours vertical ou à peu près, un diamètre de l'ordre de 30 cm et une hauteur atteignant 1,80 m ; des formes complexes atteignent 1,50 m de diamètre sur 1,80 m de haut. Il dit peu sur l'origine possible, et suggère l'action de tourbillons.*

L'intérêt de ces formes en cloches pour la genèse des cheminées nous a incité à en rechercher le mode de développement.

Nous en distinguerons deux types, suivant qu'une fissure s'ouvre au fond de la cloche (fissure souvent très mince, presque invisible) ou non.

1° Les cloches avec fissure. Dans ce premier type, E. van den Broeck, E.A. Martel et Ed. Rahir (1910) voient l'action de l'eau, arrivant par la fissure, chargée de matériel abrasif et faisant un travail de corrasion en tourbillonnant. L'étroitesse des fissures souvent observée, la nature très fine (argile et limon fin) du matériel qui peut en provenir nous empêchent absolument de souscrire à cette explication. La récente théorie de A. Bögli (1964) donne de ces cloches une explication infiniment plus séduisante. A. Bögli a montré que lorsque deux eaux, ayant toutes deux atteint un équilibre de dissolution - mais un équilibre différent de l'autre - se mélangent, le mélange résultant est une solution agressive.

On trouvera dans la Première Partie (p. 171) la justification théorique du fait. Si donc de l'eau, saturée en bicarbonate de calcium et venant de la fissure, se mélange à une autre eau, également en équilibre, mais avec des teneurs différentes en CO_2 et HCO_3^- , un regain d'agressivité naîtra autour du point de confluence, développant une forme en creux autour du débouché de la fissure. Il faut noter que plus les deux quantités d'eau mélangées sont différentes l'une de l'autre (et c'est bien le cas quand une fissure noyée débouche dans un couloir également noyé), plus le regain d'agressivité est minime, mais on peut parer à cette objection si l'on considère en revanche que l'on dispose des "temps géologiques" ...

Nos observations confirment l'origine chimique des cloches, mais nous font, au moins dans une grotte, douter

que le moteur de l'action soit un déplacement d'équilibre de dissolution par mélange suivant la théorie de A. Bögli.

L'action chimique est confirmée par la grande étroitesse de l'extrémité de la cloche, qui s'allonge parfois en une pointe beaucoup trop fine pour qu'on y puisse admettre l'action mécanique de tourbillons "pénétrant" dans la cloche, si l'on admet que les galeries où se trouvent de telles formes étaient pleines d'eau. Si par contre on considère que l'eau jaillissait par la fissure du fond dans une galerie non noyée en permanence, alors l'absence totale de tout sillon dans la roche au bas de la cloche montre que la corrosion n'avait aucune puissance à la sortie de la cloche, et ne doit donc pas être l'agent de sa formation.

L'observation des cloches du secteur du Labyrinthe, dans la Grotte de Remouchamps, nous font douter de l'influence de minimes déplacements d'équilibre sur la genèse de ces formes. En effet, la quasi totalité des cloches de ce secteur présentent une nette dissymétrie. Le rebord N de chaque cloche est très net, à angle vif ; le rebord S est tout arrondi, comme le montre la fig. 7. Les cloches représentées sur cette figure ont une longueur totale de 1 à 2 m ; la coupe n'est pas une coupe verticale car les cloches se développent dans un plan de stratification (pendage : environ 30°).

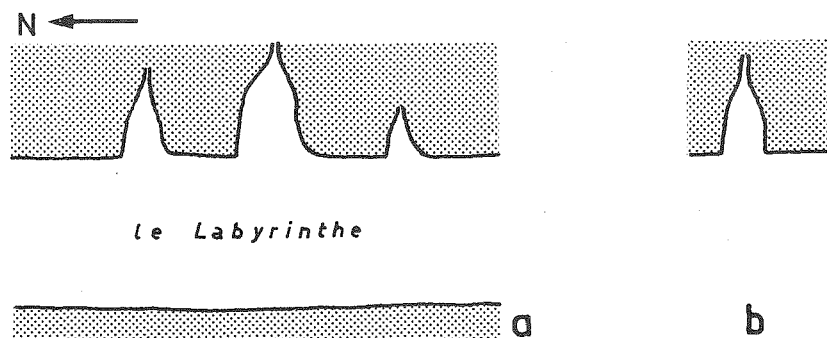


FIG. 7 : Formes de cloches. En a, schématisation de cloches observées dans la Grotte de Remouchamps : dissymétrie des bords. En b, schématisation, pour comparaison, d'une forme symétrique.

L'arrondi observé ne peut être attribué qu'à un courant bien marqué. Or, dans tous les endroits où nous l'avons noté, il correspond bien au bord aval de la cloche par rapport au sens connu du cours d'eau qui parcourait jadis cet étage. Les cloches sont donc aussi anciennes que le cours d'eau. Or c'est ce cours d'eau qui a façonné les couloirs. Un des bras de ce cours d'eau a un fond subhorizontal qui fait penser que ce couloir était bien d'origine "vadose" ; mais une importante dérivation locale comprend un couloir ascendant vers l'aval du courant : il ne peut donc s'agir que d'une conduite forcée, et sa section elliptique en témoigne. Dans cette conduite, des cailloux roulés ont même été entraînés et ont remonté la contre-pente. Dans cette dérivation en conduite forcée tout comme dans le bras à fond régularisé, les cloches ont donc été modelées en présence d'un courant. Ceci nous apprend que les cloches sont, là au moins, aussi anciennes que la forme générale du couloir, mais aussi qu'elles ont été formées sous eau, dans un courant qui parfois au moins était capable de charrier des cailloux sur une nette contre-pente, et qui était en tout cas capable d'imprimer une dissymétrie aux formes en creux de ses parois. Dès lors, on voit mal, du moins dans ce secteur de la Grotte de Remouchamps, comment attribuer, dans une eau en net mouvement, la formation des creux à un modeste déplacement d'un équilibre de dissolution (déplacement de l'ordre de 5% tout au plus); l'eau n'avait sans doute une fois le mélange réalisé, nullement le temps de commencer à attaquer la roche vu la lenteur des réactions pour de si faibles déplacements d'équilibres.

2° - Les cloches sans fissure dans le fond. Les hypothèses avancées jusqu'ici se contentent, à notre connaissance, de faire appel à des tourbillons pour expliquer ces formes. Des observations faites dans deux grottes nous poussent à proposer une explication différente.

En franchissant un siphon (noyé) de rivière souterraine, à Remouchamps, nous avons observé au plafond des taches brillantes de grandeur variable : il s'agit de poches d'air, nichées dans des irrégularités de la roche. A la Grotte du Père Noël, nous avons observé en temps de basses eaux le plafond d'une étendue d'eau formant siphon. Le plafond était alors émergé ; il était tout couvert d'argile car les eaux de crue sont là-bas chargées d'argile, mais des taches claires signalaient au plafond des creux dépourvus d'argile. Là encore il s'agit assurément de poches d'air dont, en temps de crue, le fond n'est jamais atteint par l'eau, bien qu'il ne soit par places que très faiblement déprimé par rapport au plafond.

Dans les siphons, l'eau, coupée du contact avec l'air, peut, si le siphon est assez long, voir son pouvoir corrosif fortement diminué. En effet, à l'air, l'eau travaille sous une pression partielle de CO_2 constante ; en l'absence d'air, l'eau ne peut que consommer une quantité donnée de son CO_2 libre et, ceci fait, elle n'a plus de pouvoir de dissolution. On trouvera dans la Première Partie de ce travail (chapitre I, A) quelques explications à ce sujet et un diagramme exprimant quantitativement la perte d'agressivité en situation "anaérobie".

Dans les poches d'air observées, l'eau peut localement disposer d'un stock de CO_2 et attaquer la roche.

L'attaque se fait essentiellement à la surface de l'eau, mais peut se développer également un peu plus bas (par diffusion du CO_2) et un peu plus haut (par montée de l'eau par capillarité). Ceci agrandit le volume du creux et, à la crue suivante, l'eau dispose là d'une plus grande réserve de CO_2 : le phénomène est donc auto-catalytique.

Ce phénomène n'est évidemment pas lié à la notion hydraulique de siphon ; il suppose simplement un plafond noyé

non continuellement et la présence (temporaire) d'une atmosphère relativement riche en CO_2 .

d - Les formes dues à l'action de l'eau très calme.

Le seul critère absolu que nous en connaissions est le "boxwork" (J.H. Bretz, 1942) : mise en relief sur plusieurs cm de veines de calcite parfois très fines (de l'ordre du mm). Ces très fines lamelles, en effet, ne résisteraient pas à un courant d'eau. Les formes très déchiquetées que prend la roche dans les "spongeworks" (1) nous semblent également dues à l'action d'une eau sans courant nettement marqué. Nous avons observé du "spongework" en des endroits des grottes de Rochefort, de Flère et de Remouchamps qui sont épisodiquement envahis par des eaux s'écoulant lentement. On trouve le "spongework" assez souvent associé au boxwork. Mais il est indiscutable que le spongework ne serait pas détruit par un courant de quelques cm par seconde, et on ne peut donc le donner comme un critère très strict d'une eau très calme. L'eau très calme est généralement assimilée, dans le domaine karstique, à la nappe phréatique, et le "boxwork" et le "spongework" font partie des "phreatic features" de J.H. Bretz (1942). Cette assimilation du calme au phréatique nous semble très admissible, sous deux réserves trop souvent omises, à tort pensons-nous.

En premier lieu, la notion de "phréatique" est souvent associée à celle de "nappe" ; or il serait très abusif d'assimiler a priori "eau calme" et "nappe phréatique" (2).

(1) "complexes of small, interconnecting solution chambers in the limestone, separated by amazingly intricate perforated partitions and remnants of partitions. The relations are as complicated as the pores of a sponge" (J.H. Bretz, 1942, p. 699).

(2) Nous envisagerons cette question au chapitre suivant.

En second lieu, les phénomènes "phréatiques" ont été décrits par J.H. Bretz d'une façon qui évoque de grandes épaisseurs d'eau emplissant des cavités importantes, et nous avons fréquemment observé des phénomènes "phréatiques" à un niveau bien déterminé, sans qu'ils fussent présents en dessous ni surtout, en général, au-dessus. Nos observations nous montrent, peu au-dessus de phénomènes "phréatiques" bien localisés, la présence d'air, en particulier à Remouchamps, sous la forme d'une trace nette d'un ancien niveau d'eau. Le phénomène "phréatique" est alors bien d'eau calme, mais très près de la surface. Il en est de même pour nos observations de "spongeworks" dans les siphons actuellement noyés (Remouchamps, Rouge-Thiers, Trou des Crevés) : là aussi nos observations sont faites dans des endroits qui sont en général sous moins de 2 m d'eau.

La distinction entre zone phréatique et zone aérée doit donc être complétée par la notion d'une zone intermédiaire, dans laquelle certains phénomènes semblent localisés. Cette idée a été émise sur la base d'autres critères par J. Cvijić. Nous reprendrons ce problème sous un angle plus général dans le chapitre III.

e - Les conduits tubulaires.

Nous avons décrit de tels conduites forcées dans plusieurs grottes au chapitre précédent. Nous rappellerons simplement que leur pente peut être éminemment variable, de 0 à 90°, et qu'un même conduit peut connaître des changements de pente et même des contre-pentes (Grotte du Pont, à Esneux, "Fabrique de Chocolat" et "Labyrinthe" à la Grotte de Remouchamps, ...). Cependant les "tubes" en faible pente sont nettement les plus nombreux. D'autre part, la présence de cailloux roulés sous les vestiges de "tubes" (Grotte de Rochefort) et même dans les branches en contre-pente (Grotte de Remouchamps) confirment ce qu'annonce le bon calibrage de ces tubes : la vitesse de l'eau qui les parcourt est assez grande. Enfin, les "tubes" nous ont toujours apparus (voir les exemples de grottes du chapitre précédent) comme des phénomènes antérieurs à la plupart des autres phénomènes observés : probablement furent-ils donc actifs dans des stades assez précoces de l'évolution des grottes belges.

Il faut préciser ici que l'on ne peut pas considérer comme des "tubes", formés suivant le processus ici envisagé, tous les conduits ayant une section localement cylindrique ou une partie de section cylindrique. Certains plafonds de rivière souterraine présentent une forme en voûte du fait que les périodes de basses eaux, plus longues que les périodes de hautes eaux, provoquent une érosion (et en particulier une corrosion) plus forte du bas des parois que du sommet ; certaines cheminées (voir plus haut) ne sont pas des tubes non plus. B. Gèze (1964) a attiré l'attention sur l'extension abusive que l'on a souvent donnée aux observations de P. Chevalier (1944) sur les conduits tubulaires. Nous considérons quant à nous que trois critères nécessaires à la définition des "tubes" tels qu'ils sont considérés ici sont : l'aspect lisse des parois, l'absence de fissures provoquant des écailllements, et la constance du diamètre.

f - Les rivières souterraines.

La rivière souterraine est, dans le karst, un élément particulièrement bien individualisé. Nous pensons en effet qu'il faut réserver cette dénomination à une eau courante ayant réellement tous les caractères fluviatiles, et exerçant toutes les actions fluviatiles telles qu'on les observe en surface : la rivière souterraine est un cours d'eau ayant, la plupart du temps du moins, une surface libre, exerçant des actions d'érosion latérale ou verticale, de transport et de sédimentation dans un lit déterminé et particulièrement des actions qui tendent à régulariser sa pente. Nous excluons de ce concept la conduite forcée et l'eau ruisselant dans des fissures ou s'étalant en nappe très mince sur de vastes surfaces, de même que l'eau proprement phréatique qui circule lentement en remplissant tous les vides qui lui sont accessibles dans un massif rocheux. Une telle définition, plus stricte peut-être que l'acception commune du terme,

a l'avantage de correspondre à une individualité réelle sur les plans hydraulique, hydrologique, géochimique et géomorphologique. Elle ne nous fait du reste nullement oublier qu'il y a des contacts, des transitions, des passages de la rivière proprement dite à la conduite forcée, à l'eau phréatique, à l'eau d'infiltration diffuse, etc. ; passage dans l'espace en fonction de la topographie, et passage dans le temps, en fonction du climat, des conditions météorologiques, ...

Ainsi définies, les rivières souterraines de Belgique s'avèrent être analogues dans leur action aux rivières épiquées. Nous avons décrit antérieurement (C. Ek, 1957, 1961, 1966) les caractères de plusieurs rivières souterraines de Belgique (1).

Deux traits importants différencient cependant les rivières hypogées des rivières épiquées. Le premier, tout à fait général, est l'absence ou la quasi absence des versants; ce fait est très important car il dispense la rivière souterraine de l'évacuation d'une quantité de débris énorme, que les cours d'eau subaériens sont astreints à transporter lorsqu'ils s'encaissent. Dans des régions où le réseau hydrographique marque une tendance générale à creuser, comme c'est le cas dans la zone d'affleurement des calcaires paléozoïques de la Belgique, ceci assure au réseau karstique souterrain un avantage qui va croissant au fil du temps, sur le réseau subaérien.

(1) Ph. Renault (1967, p. 236) fait très justement remarquer que les "interprétations évolutives" tirées de telles études impliquent la connaissance de l'évolution de la vallée et de la conformation du réseau souterrain sur une certaine distance. Nous ne pouvons cependant le suivre lorsque, en conclusion (p. 243), il estime que les variations climatiques "introduisent un élément d'incertitude dans l'interprétation" ; les variations climatiques ne sont en effet pas un "postulat" nécessaire à la corrélation, car celle-ci est établie par des observations et des mesures.

Ceci est tout à l'opposé de la "règle générale" suivant laquelle M. Lohest et P. Fourmarier (1903 ; cf. p.5) dans un travail par ailleurs remarquable, estimaient que "le creusement à ciel ouvert a marché plus vite que l'approfondissement souterrain" (1).

Le deuxième trait qui individualise les rivières souterraines, est l'existence de siphons. Ce fait est toutefois beaucoup moins caractéristique que le précédent. D'abord parce que toutes les rivières souterraines ne comportent pas nécessairement des siphons (2) ; celles qui en comportent exigent parfois que l'on parcoure à partir de la résurgence ou de l'exurgence de longues distances vers l'amont avant d'arriver au siphon. Ensuite, les siphons ne relient pas toujours deux sections de "rivière souterraine" ; ils peuvent aussi bien relier une zone à caractère phréatique, un lac souterrain à une rivière, relier deux branches d'une conduite tubulaire, etc. C'est pourquoi il nous semble plus judicieux de leur consacrer un bref paragraphe particulier.

g - Les siphons.

On trouvera des généralités à leur sujet dans B. Gèze (1965 a, 1965 b) et F. Trombe (1952), par exemple. Les

-
- (1) Ces auteurs appuyaient leur affirmation sur le nombre de grottes sèches ouvertes dans les versants des vallées, ajoutant : "il est rare de pouvoir suivre encore le cours d'eau qui a contribué à les former". En fait, les grottes sèches le sont au même titre que sont sèches les terrasses étagées aux flancs des vallées, et c'est pour des raisons techniques (plafond bas, voûte mouillante, exutoire sous-fluvial, ...) qu'il était rare de pouvoir suivre - ou même pénétrer, ou simplement connaître - les cours d'eau souterrains ; la chose est beaucoup moins rare aujourd'hui, grâce aux nombreuses prospections dont nos terrains calcaires ont été le champ, et grâce à l'amélioration considérable des techniques d'exploration.
- (2) Le siphon est, un peu comme les lacs des rivières épigées, un accident dû à un obstacle.

siphons ont en fait une morphologie très variable. Ce fait est déjà révélé par l'observation d'anciens siphons localisés dans des galeries aujourd'hui sèches. Nous en avons expliqué et illustré deux exemples dans la seconde partie de ce travail (chapitre III, A, fig. 14 et 15) : ces deux siphons sont dus à ce que l'eau de la rivière souterraine coulait dans le sens même du pendage des roches. Ces deux siphons se présentent comme de vastes tubes en U, et leur voûte forme une large arcade en demi-cercle. Un autre siphon est constitué par un coude d'un ancien conduit tubulaire, dans la Grotte de Remouchamps (fig. 8, a).

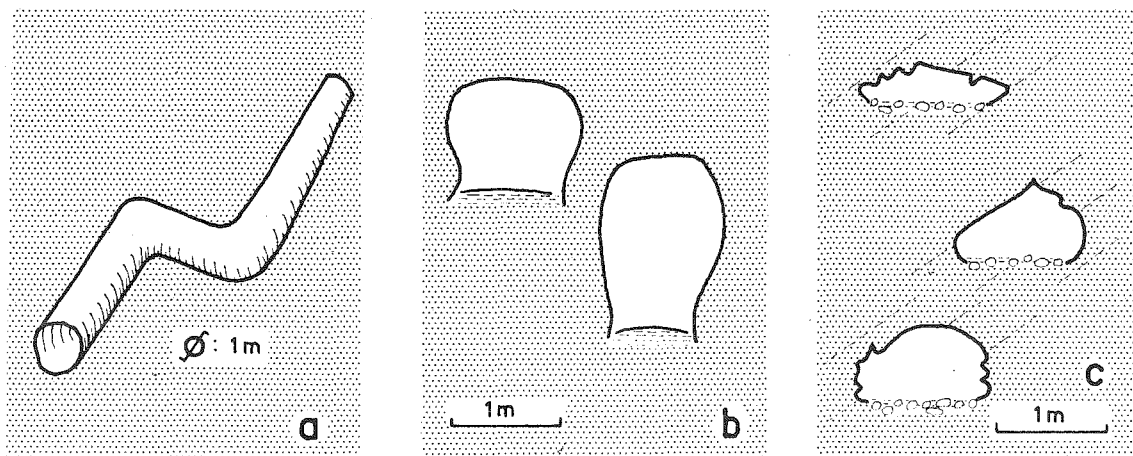


FIG. 8 : Trois exemples de siphons :
 a : Grotte de Remouchamps : conduite forcée siphonnante reconstituée.
 b : Trou des Crevés, à Belvaux : 2 sections transversales dans un siphon en tube, quelque peu modifié vers le bas.
 c : Chantoir du Rouge-Thiers, à Louveigné : 3 sections transversales dans un siphon long et irrégulier.

En fait, à Remouchamps, seule la moitié supérieure de la section cylindrique subsiste, la demi-section inférieure ayant disparu par érosion, et la fig. 8a est donc une reconstitution.

Plus encore que pour la forme générale du conduit, l'observation des siphons anciens est insuffisante pour la connaissance de l'aspect des parois dans un siphon ; en effet on peut craindre que des parois anciennement noyées aient été ramaniées après leur émergence. Aussi avons-nous observé des siphons actuels, de quatre façons différentes : en profitant d'une sécheresse exceptionnelle désamorçant un siphon, en pompant l'eau pour désamorcer un siphon à alimentation lente, en plongée libre, enfin en scaphandre autonome.

Au Trou des Crevés, à Belvaux-sur-Lesse, nous avons vu un siphon présentant une forme tubulaire à peine modifiée : le plafond était assez plat, le fond était un peu approfondi et couvert d'argile et de limon (fig. 8b). D'autre part, les parois n'étaient pas (ou plus) parfaitement lisses, un peu de corrosion différentielle s'y manifestait. Ce siphon est toujours amorcé à l'état naturel mais le niveau libre de l'eau est normalement très calme au-dessus du siphon. En temps de forte crue seulement, les eaux de la Lesse envahissent le siphon, et il fonctionne alors véritablement en conduite forcée.

La fig. 8c donne trois sections transversales dans le long et tortueux siphon du Rouge-Thiers. On voit que la forme et la section du conduit sont variables ; en fait ce conduit est très irrégulier, montant et descendant sans cesse ; les parois sont assez profondément sculptées par une corrosion différentielle. Celle-ci est moins forte au siphon de la Grotte Sainte-Anne, à Tilff.

A la Grotte de Remouchamps, le siphon - qui tout comme celui de la Grotte Sainte-Anne n'est jamais désamorcé et est impossible à désamorcer par pompage - offre une morphologie toute différente : c'est une vaste arche, toute pleine d'aspérités, de petites arêtes aiguës séparant de petits creux profonds dans la roche : un "spongework" typique (définition p. 59, note 1).

La conclusion qui s'impose est que la morphologie des siphons est éminemment variable ; la chose s'explique somme toute par notre remarque faite au sujet des siphons dans le paragraphe précédent : les siphons ne relient pas toujours deux sections de "rivière souterraine", mais parfois une section d'eau calme à une rivière (qui peut être l'émissaire du bassin d'eau calme - cas de Remouchamps -, ou son affluent - cas du Trou des Crevés), etc. A des fonctionnements différents correspondent des morphologies différentes. Nous ne pouvons toutefois préciser les relations entre fonctionnement et morphologie qu'après avoir discuté, au chapitre suivant, les relations entre eaux phréatiques et eaux vadoses.

h - Les effets du ruissellement.

Nous avons déjà fait allusion au ruissellement dans le passage consacré aux fissures (littera a). Il est des cas cependant où l'action du ruissellement élargit les fissures au point de transformer absolument leur morphologie. C'est ainsi qu'à Comblain-au-Pont, la Grotte comprend des salles spacieuses qui sont en fait des fissures élargies par le ruissellement. Ces salles sont en effet orientées suivant une direction de diaclases et on retrouve très nettement à leur plafond et aux extrémités des salles la continuation des fissures primitives (voir la carte morphogénétique et surtout les coupes, au chapitre I, B, § 8). D'autre part la morphologie actuelle des parois révèle l'action de l'eau, mais il ne peut s'agir ni de rivière, ni de zone phréatique, ni d'aucun autre des types d'écoulement déjà décrits : les formes d'érosion sont éparées, non hiérarchisées, non organisées, et le ruissellement en est de toute évidence à l'origine. C'est lui d'ailleurs qui amène sur certaines parois des dépôts de très fin limon. C'est lui encore qui a développé au bas de certaines de ces salles des lapiés en cannelures, véritables

champs de rigoles qui amenaient au fond des salles l'eau des parois. Certes, si le ruissellement est bien à l'origine des fissures le long desquelles les salles se sont développées, et s'il est la cause aussi de la morphologie actuelle, d'autres actions ont pu se produire entre les deux ; mais ici encore les traces manquent pour reconnaître ces éventuels phénomènes intermédiaires. En fait, nous avons expliqué que les salles de la Grotte de Comblain-au-Pont sont les lieux par lesquels l'eau du vallon pénétrait sous terre ; mais on ne peut parler ici proprement d'une rivière : les points d'arrivée sont nombreux, la tendance à la régularisation du profil en long absolument invisible. Ces salles qui ont en moyenne une vingtaine de mètres de long, une quinzaine de haut, et quatre à six de large, et que nous préférons à cause de cela ne plus appeler des fissures, sont un exemple clair des effets parfois considérables du ruissellement.

i - La condensation.

P. Chevalier (1947) et F. Trombe (1952) ont observé des phénomènes de condensation importants dans certaines grottes françaises et les calculs de F. Trombe ont mis en évidence les grandes possibilités d'action des eaux de condensation comme agent corrosif. Malheureusement, des formes, des aspects précis de la roche, dus à cette condensation n'ont à notre connaissance jamais été décrits. En Belgique également, la condensation de l'eau en certaines saisons est un fait d'observation dans des parties de plusieurs grottes. Mais nous n'avons pu définir avec précision aucune morphologie correspondante. Ceci nous paraît d'ailleurs normal : si la condensation est lente, et donne naissance à une très mince pellicule d'eau qui ne s'écoule pas, ou qui s'écoule très lentement, chaque plage de la paroi qui subit la condensation sera attaquée par une même quantité d'eau et, dans le cas des calcaires purs qui dominent dans les grottes de Belgique, le recul de la paroi se fera approximativement parallèlement à

elle-même. Il ne naît pas de forme propre bien développée. Si au contraire la condensation est très forte et donne naissance à du ruissellement, c'est celui-ci qui déterminera les formes résultantes.

Un résultat de la condensation nous semble cependant être le calcaire pulvérulent très fin (lutitique), meuble, qui couvre d'une très mince couche (on dirait de la poussière) les parois de certaines grottes dans les zones à aération assez importante. Nous pensons qu'il pourrait s'agir là d'un effet de la dissolution sur place de calcaire par l'eau de condensation, et d'une précipitation ultérieure faite sur place également, à l'occasion de l'évaporation ou de la saturation de l'eau condensée.

j - Divers effets de l'eau courante.

Il est des cas où le type d'eau courante à l'origine d'une partie de cavité est impossible à préciser : c'est le cas, par exemple, quand une morphologie d'écroulements a subi des retouches par l'eau, suffisantes pour altérer les formes anciennes, mais insuffisantes pour que l'eau ait pu imposer une nouvelle forme, propre à son type d'écoulement. C'est le cas aussi lorsque des écroulements mettent à jour sur une surface modeste des traces trop localisées d'écoulements anciens : souvent des petits chenaux anastomosés ou des pendentifs rocheux (voir photos 2 et 3, p. 17).

Les premières de ces formes sont considérées par J.H. Bretz (1942) comme des signes de l'activité phréatique. Il nous semble que dans cette mesure J.H. Bretz a tendance à considérer comme phréatique tout ce qui n'est pas proprement fluviatile souterrain. En effet, les chenaux anastomosés marquent l'action d'une eau s'écoulant à une certaine vitesse (méandres, relatif calibrage des conduits,...). Nous ne pouvons non plus considérer avec lui que les pendentifs rocheux marquent toujours la fin d'un stade de remplissage : il y a

dans la Grotte de Remouchamps par exemple un passage progressif vers l'aval de chenaux anastomosés à des pendentifs rocheux dans un même plafond, et là les pendentifs rocheux se présentent donc bien comme la pure et simple exacerbation des chenaux anastomosés à la suite d'une certaine concentration des filets d'eau vers le bas, concentration qui est elle-même en opposition avec le caractère prétendu phréatique des anastomoses.

Ces exemples nous ont conduit à distinguer dans notre cartographie des endroits où il y a bien action d'une eau en mouvement, mais où cette action ne peut pas être autrement précisée. On objectera que ce terme de la légende est déplorablement imprécis. Certes, mais une définition plus précise eût eu bien des chances d'être moins exacte. Et d'autre part, laisser en blanc ces plages avait l'inconvénient d'omettre un renseignement pourtant important : le fait qu'on est là devant une morphologie d'eau courante.

Remarque sur les rapports entre les formes dues à l'action de l'eau telles qu'elles sont décrites ci-dessus et les termes de la légende des cartes morphogénétiques.

Aux puits, fissures et cheminées (décrits ci-dessus sub a, b et c) correspond dans la légende des cartes la teinte mauve (plus un signe conventionnel pour différencier ces trois formes les unes des autres). Nous avons décrit les cloches en même temps que les cheminées, pour une raison logique, mais les cloches sont généralement trop petites pour être cartographiées et surtout coloriées d'une façon spéciale.

L'action de l'eau très calme (d), les conduits tubulaires (e) et les rivières souterraines (f) sont représentés respectivement par trois nuances de vert.

Les siphons (g) ont été représentés eux aussi par une teinte verte particulière, un vert olive pâle. Certes,

au point de vue de l'action de l'eau, on eût pu dans bien des cas les ranger en (d), (e) ou (f) suivant qu'ils avaient subi l'action d'une eau calme, ou qu'ils avaient une forme de conduite forcée, ou qu'ils se présentaient comme une simple voûte mouillante (éventuellement : temporaire) dans une rivière souterraine. Mais, plutôt que de les confondre ainsi avec le reste des formes, nous avons estimé que leur morphologie même et ses implications hydrologiques en faisaient un phénomène digne d'être noté en tant que tel.

Les cinq catégories ainsi définies, représentées par le mauve et par quatre teintes vertes différentes, représentent incontestablement les processus les plus importants dans le genèse de la forme actuelle des cavités pénétrables en Belgique.

Les effets du ruissellement (h), de la condensation (i) et des divers courants (j) dont nous avons ensuite traité sont plus difficiles à différencier ; le ruissellement donne fréquemment des formes bien définies, mais probablement pour une partie d'entre elles le ruissellement n'est-il qu'une conséquence de l'évaporation ; les petits chenaux anastomosés et les pendentifs rocheux n'affleurent que sur des surfaces souvent très minimes. C'est pourquoi nous avons réuni ces divers types d'action, sur nos cartes, sous une même teinte verte (vert très clair), en repérant par des symboles (en noir) les formes bien définies que l'on pouvait éventuellement observer. L'emploi de symboles pour des formes définies permet, pensons-nous, une critique par le lecteur des teintes "génétiques" employées.

Une ultérieure subdivision, sur les cartes, de la teinte vert clair est assurément souhaitable. Elle ne sera possible qu'après une difficile et délicate recherche de critères suffisamment fréquents pour servir de base à la cartographie, et exigera alors des cartes à plus grande échelle.

C'est là une recherche qui sort du cadre que nous nous sommes tracé pour le présent travail.

Remarque sur une division en deux catégories des mouvements de l'eau et de leurs actions.

Les efforts des karstologues pour reconnaître les types d'action de l'eau ont mené à diverses classifications, ou au moins à diverses distinctions de catégories d'eaux, dans leurs rapports avec la morphogénèse des grottes. Une des divisions les plus communément faites est celle entre eau phréatique et eau vadose. Elle est certes primordiale et nous la considérerons au chapitre suivant ; elle est cependant, on l'a vu par cet exposé, assez peu aisée à faire lorsqu'on prétend cartographier l'entièreté d'une grotte au lieu de se borner à chercher les endroits où l'une ou l'autre action a laissé des traces caractéristiques. On distingue aussi parfois eaux en mouvement et eau immobile, ce qui ne recouvre pas exactement les notions de phréatique et de vadose.

Sur le plan de l'action de l'eau, on peut séparer la corrosion de l'érosion mécanique (1), et nous avons consacré à cela une portion importante de la Seconde Partie du présent travail.

Mais, pour ce qui est de la forme des conduits souterrains, de la répartition de divers types de conduits dans une grotte, et de l'aspect des parois des cavités, une autre distinction est importante.

Il y a en effet des masses d'eau dont l'écoulement se fait suivant une pente très faible et régularisée ; qu'il s'agisse de rivières souterraines ou de masses d'eau situées

(1) Voir, concernant le vocabulaire de l'érosion, la communication de L. Tell (1968) au 4ème Congrès International de Spéléologie en Yougoslavie.

en amont, séparées des rivières par des siphons, ou de la circulation lente à travers des fissures d'une eau dont la surface est subhorizontale, toutes ces eaux ont en commun qu'elles ont pu vaincre suffisamment d'obstacles de la structure pour s'assurer une pente régulière (ou éventuellement nulle).

A cela s'opposent les conduites forcées, les puits, les ruissellements le long des fissures, les chenaux suivant le pendage d'une stratification inclinée, etc. Ce sont là des phénomènes qui dans leur ensemble dépendent de la structure lithologique et tectonique du massif parcouru ; les pentes sont fortes ou variables.

Beaucoup de grottes belges nous semblent présenter des formes de ces deux catégories d'eau, et ces formes se hiérarchisent comme les catégories : seules les eaux au mouvement régularisé donnent des cavités bien développées, rejoignant la rivière épigée principale par des galeries importantes. Les courants dominés par la structure parcourent des distances plus courtes. Leurs effets peuvent être grandioses (puits, par exemple), mais ils ne sont pas capables par eux-mêmes, en Belgique, de faire parcourir à l'eau de longues distances. Ce sont, normalement, des "tributaires" des courants régularisés.

Cette distinction ne recouvre pas exactement les notions de phréatique et de vadose : plusieurs de nos rivières souterraines ne sont pas l'expression d'une nappe ; et d'autre part nous incluons dans les courants structuraux les chenaux anastomosés "phréatiques" de J.H. Bretz.

2. Les effondrements.

Toutes les plus vastes salles des grottes de Belgique ont leur plancher jonché de blocs écroulés. Il n'est que de jeter un regard sur les cartes des Grottes de Rochefort et

du Père Noël (annexées en fin de volume) pour voir l'importance que peuvent prendre les éboulements, qui vont jusqu'à couvrir plus de 6000 m² d'un seul tenant.

Certes tout éboulement, dans les grottes, suppose la présence préalable, sous lui, d'un creux au moins égal au volume éboulé, et généralement plus grand puisqu'il y a plus de vides entre les blocs qu'entre les bancs en place. C'est en ce sens que plusieurs auteurs ont pu justement dire qu'une cavité "disparaît" par les écroulements (par exemple Ch. Fraipont et S. Leclercq, 1925).

Pourtant, il n'est pas dit qu'il ait jamais existé sous les grands éboulis de nos grottes des salles formées par dissolution et ayant un volume plus grand que les salles actuelles : un éboulement modeste peut se produire dans une salle, et les eaux peuvent emporter les débris en solution pour la plus grande part, faire ainsi de la place pour un second éboulement plus important, et ainsi de suite.

Dans beaucoup de nos salles de grottes, le niveau de l'eau, en temps d'inondation, ne monte pas jusqu'au plafond ; d'autre part l'eau d'infiltration est, actuellement, souvent sursaturée, comme nous l'avons montré dans la Première Partie de ce travail. Par ailleurs, le développement de vastes cavités sous le niveau (1) d'étiage des courants souterrains, sans être très rare, ne semble pas un fait généralement très important ; on peut se l'expliquer par le fait que, sous le niveau d'étiage, les circulations sont assez lentes et les eaux ont plus de chance d'être saturées.

Dans de tels cas, où le creusement par l'eau est inefficace sinon inhibé aussi bien au plafond des grottes que

(1) Nous prenons ici "niveau d'étiage" dans un sens très large ; il serait mieux, mais bien long, de dire "l'altitude, en chaque lieu, des eaux en période de maigre".

dans les régions inférieures aux niveaux d'étiage, l'action de l'eau est limitée aux courants vadoses qui parcourent les régions accessibles des cavités, et dont nous avons montré que l'action érosive (chimique et mécanique) est maximum en période de hautes eaux (Première Partie, chapitre V).

Les effondrements jouent alors le rôle important d'amener par gravité une matière divisée (fût-ce en gros blocs) à l'endroit d'où l'eau est susceptible de l'évacuer. Tant qu'un courant d'eau important court sous les éboulis, comme c'est le cas dans plusieurs de nos grottes, ceux-ci peuvent donc contribuer à l'agrandissement de la cavité, mais dans la mesure seulement où l'eau peut évacuer une quantité de matière supérieure à la différence entre le volume occupé (après la chute) par l'éboulis et le volume occupé (avant la chute) par le massif de roche en place.

En fait, nous devons admettre que nous ignorons tout à fait pour le moment, si, à l'époque actuelle, l'évacuation par le bas compense ou non les apports de blocs par le haut.

Nous distinguons, sur nos cartes morphogénétiques, les "effondrements d'origine essentiellement mécanique" des "effondrements provoqués par la dissolution" (1). C'est là une distinction lapidaire et schématique, imposée par la nécessité d'avoir une légende concise, et qui réclame quelque explication.

Dans beaucoup de salles formées par effondrement, les blocs présentent des faces formées par cassure (sauf celles qui correspondent à des plans de stratification), et le plafond apparaît lui-même comme un complexe de cassures, à

(1) Les "effondrements d'origine essentiellement mécanique" sont représentés en jaune sur les cartes ; les "effondrements provoqués par la dissolution" sont en jaune orangé.

l'aspect frais, non ou peu corrodé. Dans certaines salles, au contraire, les blocs tombés et le plafond lui-même présentent des traces de dissolution, généralement suivant les diaclases et la stratification ; les blocs ont certaines de leurs arêtes (non toutes) corrodées.

a - Les effondrements d'origine essentiellement mécanique.

Lorsque les blocs et le plafond ne présentent pas de traces de corrosion, l'effondrement est lié uniquement à des causes physiques : pour un plafond plat, suivant un plan de stratification dans une formation en bancs assez minces, la portée est parfois trop longue, d'où effondrement ; dans un plafond où affleurent des bancs verticaux, certains de ceux-ci, limités par deux joints argileux que l'eau désagrège, ne sont plus comprimés par leurs voisins ; les séismes peuvent éventuellement avoir déclenché le phénomène (1) ; suivant le pendage des bancs et les relations entre celui-ci et la forme de la cavité préexistante, les processus d'écroulement ou de glissement sont divers (nous en avons donné des exemples au chapitre I, § 6 : Grotte de la Fontaine de Rivière ; § 11 : Grotte du Père Noël ; voir aussi J. Goguel, 1953).

La cryoclastie est aussi la cause de certains éboulis : il s'agit alors en général d'accumulations d'éléments de petite taille, qui ne sont pas rares près des entrées de grottes ; dans des puits ouverts à l'air libre et qui mènent donc à des cavités où par ailleurs le froid peut s'accumuler, la cryolastie peut avoir joué un rôle important. C'est le cas dans l'effondrement que constitue le Trotti aux Fosses (chapitre I, § 5). R. Ciry (1962) a récemment montré

(1) Bien qu'il semble que l'action des séismes soit très modeste dans la spéléogénèse (voir notamment la Seconde Partie de ce travail, chapitre III).

l'importance de ce fait (1).

Claude Mugnier (1961) classe les éboulis cryoclastiques dans les grottes en trois catégories suivant que les matériaux éboulés proviennent de l'extérieur de la grotte, de l'entrée de la grotte ou de l'intérieur de celle-ci. Les deux premiers types se rencontrent en Belgique. Si les effondrements spectaculaires se manifestent le plus souvent dans les grandes salles, où la portée est longue, et si les traces de la cryoclastie sont en Belgique généralement confinées au voisinage des orifices des cavités, un débitage plus modeste et moins spectaculaire s'observe parfois dans des galeries de dimensions moyennes, et à n'importe quelle distance de l'entrée : c'est l'effrittement de certaines voûtes sous l'effet des contraintes mécaniques qui naissent du fait même de l'existence d'une cavité dans la roche (2). On consultera à ce propos les données techniques de J. Goguel (1953) et on trouvera plusieurs observations de tels faits expliquées par B. Gèze (1964). Ces formes nous semblent toutefois assez peu fréquentes, à l'état frais, en Belgique, où nous les avons vues le plus souvent retouchées par la corrosion(3) ; mais peut-être des observations systématiques dans les galeries jeunes nous apporteraient-elles une plus grande quantité

- (1) Dans un travail inédit, J. Schroeder vient de montrer que la gélifraction a entièrement modifié l'aspect de beaucoup d'entrées de grottes, d'arches naturelles, d'abris sous roche, etc. dans la vallée de la Meuse. Son travail montre également, entre autres choses, que sous le climat actuel aussi la gélifraction a une action appréciable (J. Schroeder, 1968, Les parois calcaires de la Meuse. Mémoire de licence en sciences géographiques, Université de Liège, 106 p. Inédit. Déposé à l'Université de Liège).
- (2) Nous avons décrit dans la Deuxième Partie (chapitre III, p. 94) d'autres effets mécaniques de l'existence d'un vide : des fissures importantes, que nous avons attribuées à des effets de relaxation des tensions.
- (3) C'est alors la teinte réservée au ruissellement et à la condensation (vert clair) qui a été employée sur nos cartes pour représenter ces zones, car, même si le débitage sporadique et la corrosion marchent de pair, celle-ci a le pas sur celui-là.

d'observations d'effrittement des parois sous l'effet des contraintes (1).

b - Les effondrements provoqués par la dissolution.

Ce phénomène est inclus dans les processus "d'affaiblissement-dissolution" de Ph. Renault (1957) ; mais il ne recouvre qu'une partie bien précise de l'expression de Ph. Renault et nous croyons nécessaire de préciser ici nos critères.

Les traces de corrosion sur certaines faces des blocs tombés et les plafonds amènent parfois la conviction que la circulation de l'eau dans les fissures a longuement préparé la chute des blocs. Nous avons alors distingué ce processus particulier. Certes, on pourrait passer progressivement d'un type d'éboulement à l'autre par une préparation de plus en plus poussée de la chute des éléments par les eaux. Mais dans la pratique, les cas où nous avons observé cette préparation sont nettement distincts. On remarquera d'ailleurs sur nos cartes une certaine localisation sélective des effondrements préparés par la dissolution : nous les observons surtout dans des galeries ou des réduits d'une dimension assez modeste (2), où la portée est telle que les tensions mécaniques sont trop faibles pour provoquer seules des effondrements (Grotte de Rochefort, par exemple), mais on les trouve également dans les grandes salles, en bordure de celles-ci, près des parois, et souvent proches de parties de grottes où l'action d'eaux courantes est nette (par exemple, Grotte du Père Noël, à Wavreille). C'est là que l'eau a préparé, en agrandissant les cavités, les effondrements ultérieurs. Il nous paraît souvent, en fonction de la position relative des blocs éboulés, que

(1) Ceci amènerait normalement l'usage d'une troisième teinte pour représenter ce type particulier de débitage mécanique.

(2) Ph. Renault (1968) a fait la même observation de façon généralisée.

les éboulements préparés par la dissolution le long des joints et fissures sont les plus anciens et que les éboulements d'origine purement mécanique sont postérieurs (1). La chose serait somme toute logique, l'un amorçant l'autre, mais nous ne pouvons pas, dans l'état de nos connaissances, la généraliser. La difficulté de la prospection sous les blocs éboulés ne nous a pas permis de déterminer si, vers le centre des salles, les éboulements directement préparés par la dissolution sont fréquents ou non sous les autres éboulements.

Enfin, c'est le lieu de rappeler ici une observation faite dans plusieurs grottes : l'action corrosive de l'eau peut intervenir, soit au plafond, soit sur les blocs, après les éboulements. Le plus souvent, la chose est facile à distinguer. Par exemple, des blocs corrodés par l'eau après leur chute présentent un même type de corrosion sur toutes leurs faces s'ils ont baigné entièrement dans une eau calme, et leur morphologie diffère donc des blocs corrodés plus souvent sur deux ou quatre faces lorsqu'ils étaient au plafond ; ou bien les blocs présentent une attaque différentielle suivant leur orientation, s'ils sont tombés dans un cours d'eau rapide ; ou encore ils présentent des traces de niveaux d'eau, etc.

Si c'est le plafond qui a subi un ruissellement postérieur, ou toute autre action de l'eau, la présence de blocs non corrodés sur le sol indique l'origine de l'éboulis (à moins que l'examen de la topographie ne révèle que les éboulis viennent d'ailleurs, et non de ce plafond).

(1) "D'origine purement mécanique" n'exclut évidemment pas la désagrégation et l'érosion par l'eau des lits argileux ou schisteux intercalaires, mais même, nous n'en doutons pas, une certaine action des eaux d'infiltration sur les calcaires eux-mêmes. Nos expressions dissèquent plus la réalité qu'on ne le voudrait.

c - Place des effondrements dans la spéléogénèse.

Sur l'importance et sur l'ancienneté des effondrements dans la spéléogénèse, on trouvera dans E. van den Broeck, E.A. Martel et Ed. Rahir (1910, 40 premières pages), de longues considérations, consacrées surtout à contredire (à assez juste titre, pensons-nous) les vues de Ed. Dupont (1893) qui voyait dans les effondrements l'origine des points de perte des ruisseaux.

Nous voudrions nous borner ici à quelques remarques générales sur la place des éboulements dans la succession des étapes évolutives des grottes belges.

Les éboulements interviennent évidemment après un creusement préalable des cavités par l'eau. Néanmoins nous venons de montrer plus haut (dans ce paragraphe) qu'ils ne présupposent pas nécessairement un vide préexistant plus vaste que la salle finalement formée par une succession d'effondrements.

Postérieurement aux éboulements, nous avons pu observer qu'il se produisait parfois l'un ou l'autre des phénomènes suivants : - un modelage du plafond par des eaux courantes, des eaux de ruissellement ou peut-être de condensation (par exemple Grotte de la Fontaine de Rivière) ; - une attaque des blocs éboulés par une rivière ou par une nappe d'eau calme (par exemple Grotte du Père Noël) ; - un concrétionnement important (en de nombreuses grottes) ; - un tassement du sol sous-jacent, longtemps après l'effondrement (par exemple Grotte du Père Noël).

Les éboulements observés sont donc loin d'être tous des phénomènes récents.

Toutefois, dans beaucoup de zones d'éboulements, nous avons reconnu des cassures fraîches au plafond et observé des chutes de blocs (parfois importants) actuelles, ou des

signes certains d'un lent affaissement actuel de la voûte (Trotti aux Fosses, Grottes de Remouchamps, de Rochefort, du Père Noël ...).

Le processus des effondrements bloc par bloc et l'affaissement des voûtes sont donc deux phénomènes qui sont actifs actuellement.

Remarque sur l'origine des salles de grottes.

P. Chevalier (1944) notait que des salles se forment à l'aval des étroitures dans les conduits forcées, sous l'effet de l'accélération acquise par l'eau dans ces "tuyères". F. Trombe (1952) a signalé qu'en amont de ces passages étroits, il serait aussi logique de trouver des salles, dues aux remontées du niveau de l'eau et aux pressions qu'elles occasionnent; le même auteur suggère aussi diverses autres causes possibles (degré de fissuration, phénomènes chimiques localisés, plissement énergétique, changement de terrain, méandres, anastomosés ou recoupés, sous une strate horizontale, ... (1). B. Gèze (1965b) évoque particulièrement l'intersection d'un joint de stratification avec des diaclases. P. Birot (1966), probablement à la suite de Ph. Renault (1957), considère que les salles coïncident fréquemment avec un carrefour du réseau. Ph. Renault (1957 et 1968) définit la salle comme un élargissement important de la cavité, se trouvant souvent au croisement de plusieurs conduits. Il considère (1968, p. 303) qu'elles peuvent se former soit par "affaissement-dissolution", soit par recouplement de parois de labyrinthes.

En Belgique, toutes les plus grandes salles, nous l'avons dit plus haut, doivent leur aspect et surtout leur

(1) F. Trombe (*op. cit.*) évoque aussi les vastes salles que peuvent constituer les puits en cloche; nous avons traité de ce phénomène au paragraphe précédent.

grand développement actuel aux effondrements "d'origine mécanique". Ce fait nous paraît primordial.

Il est dès lors souvent très malaisé de retrouver les facteurs du premier développement des salles et nous confessons que nos connaissances sur ce point n'ont pas une valeur générale. Cependant, aux causes justement évoquées par les auteurs cités plus haut nous pouvons en ajouter quelques-unes qui nous semblent importantes :

1°) Les failles sont à l'origine des grandes salles de plusieurs grottes, notamment à Han et à Remouchamps ; nous avons discuté l'influence passive des failles dans la Seconde Partie (chapitre III, p. 82).

2°) Les rivières souterraines ont établi, dans bien des grottes belges, des niveaux successifs, en pente faible vers la rivière épigée qui reçoit leurs eaux. Ces niveaux successifs suivent fréquemment la direction de la stratification, précisément (Grotte Sainte-Anne, à Tilff), approximativement (Grotte du Père Noël, à Wavreille), ou seulement d'une façon très générale (Grotte de Remouchamps). Lorsque la stratification est très redressée (Grotte Sainte-Anne), les massifs séparant deux étages successifs creusés dans le même banc peuvent s'effondrer dans le conduit inférieur, et donner simplement localement de très hautes galeries. Lorsque les bancs ont un pendage assez faible (moins de 40° par exemple), la rivière, passant d'un niveau à l'autre, a tendance à quitter le banc pour un banc plus inférieur ; en effet, si la rivière reste dans le même banc, un abaissement de quelques mètres provoque un fort déplacement latéral. D'autre part, en pendage assez faible, les diaclases ont toutes de fortes pentes et favorisent le cheminement de l'eau qui constitue un nouveau cours plus ou moins à l'aplomb du premier (cas de la grotte de Remouchamps, par exemple)(1).

(1) Nous avons expliqué dans la Seconde Partie (chapitre III, A) l'importance du pendage sur la prédominance qu'acquièrent soit les joints de stratification soit les diaclases comme voies de cheminement de l'eau.

Lorsque le pendage est assez fort sans être subvertical (entre 45 et 75°, par exemple), l'eau a davantage tendance à se maintenir, d'un niveau à l'autre, dans le même banc et l'aspect final rappelle celui de nos mines de charbon : des galeries de niveau, subparallèles à la direction de stratification (comme les "costresses" ou voies de niveau des houillères) sont reliées par des galeries constituant une série d'auto-captures du cours supérieur par le plus jeune descendant le long du pendage ou obliquement à celui-ci (comme les "grales"). Les deux réseaux conjugués délimitent une série de "massifs réservés", enserrés entre deux "grales" et deux "costresses". Lorsque les voies de l'eau sont larges ou nombreuses, les piliers peuvent ne pas suffire à soutenir le banc intact (ou rongé) surincombant. C'est là, pensons-nous, l'origine de certaines des plus grandes salles de nos grottes (en particulier à la Grotte du Père Noël : voir la carte morphogénétique).

3°) Beaucoup de salles, par ailleurs, sont développées à l'entrée de l'eau sous terre, juste sous les chantoirs ou aiguigeois (points d'enfouissement de l'eau). Il y a à coup sûr une relation génétique entre le point d'engouffrement et le vaste éboulis sous-jacent (Grotte de Rochefort, par exemple). Ceci est dû au fait que les points de perte présentent souvent tout un réseau de galeries, soit diaclases, soit anastomoses, soit méandres recoupés, qui minent le sol, et aussi au fait que le gel a eu, surtout au Quaternaire, mais encore actuellement, toute facilité à se propager dans ces conduits descendants où le courant d'eau pouvait renforcer encore l'appel d'air froid. Dans le détail, il faut admettre que si les deux phénomènes ont joué très souvent, successivement puis ensemble, il est le plus souvent impossible de déterminer lequel des deux a été le plus important.

Telles sont les constatations que nous a permises, sur l'origine des salles, l'observation des grottes de Belgique.

3. Erosion et sédimentation.

Les paragraphes qui précèdent ne concernent guère que les phénomènes d'érosion chimique et mécanique et laissent dans l'ombre les importants phénomènes de dépôts - physico-chimiques et purement physiques - qui interviennent dans l'évolution des cavités.

Or, nos cartes morphogénétiques comportent des levés des dépôts aussi bien que des phénomènes de creusement. La représentation des dépôts sur les cartes nous a paru nécessaire pour plusieurs raisons. La nature des dépôts aide parfois à comprendre le processus du creusement. Les dépôts donnent souvent aussi des indications sur une évolution plus récente que le dernier creusement constaté. L'examen des dépôts peut être, pour le lecteur, un utile moyen de compréhension, de critique, voire de contrôle, des idées avancées. Enfin, vu le travail que constituent les levés ici représentés, vu les risques que présentent bien des grottes, de ne plus être un jour accessibles (éboulements, etc.) ou même de ne plus exister (carrières), vu la difficulté technique à "équiper" certains passages, nous avons estimé qu'un levé devait inclure les deux aspects des phénomènes. Ceci permettra en outre de les utiliser pour d'autres études.

En ce qui concerne le présent exposé, par contre, il ne peut être question d'étudier pour eux-mêmes les remplissages des grottes (1). Ce serait par trop déborder du cadre de ce travail, dont le but est l'étude du creusement des cavités. La méthode de travail suivie, axée sur l'étude de processus élémentaires (la Première Partie le met en évidence) ou quasi élémentaires explique cette optique. L'étude des remplissages est une recherche en soi. Celle que nous présentons ici doit logiquement précéder celle-là.

(1) Ph. Renault a publié récemment une belle étude sur ce sujet (1968, pp. 529-596).

B. DIFFERENCES MORPHOLOGIQUES ENTRE LES CAVITES DES
FORMATIONS CALCAIRES DEVONIENNES ET CELLES DES
FORMATIONS DINANTIENNES.

1. Rappel des différences structurales et hydro-
logiques déjà exposées.

Divers auteurs, depuis E. van den Broeck, E.A. Martel et Ed. Rahir (1910) jusque J. Cvijid' (1960) ont noté le plus grand développement des phénomènes karstiques souterrains dans les formations calcaires dévoniennes que dans le Calcaire Carbonifère. La seule tentative d'explication avancée jusqu'ici attribue cette différence à une plus grande pureté des calcaires frasniens et givetiens. Nous avons montré que cette explication est absolument erronée (Deuxième Partie, chapitre I).

La différence provient essentiellement de la structure géologique : les calcaires dinantiens sont très généralement en synclinaux et en dépression entre des reliefs anticlinaux de grès famenniens, tandis que la bande des calcaires mésodévoniens et néodévoniens constitue presque partout un palier topographique entre la grande zone anticlinoriale ardennaise et le synclinorium de Dinant. Nous résumons brièvement ici les principaux résultats de ce fait.

a - Le Calcaire Carbonifère est essentiellement alimenté en eau par les grès famenniens ; or l'eau qui provient de ces grès est dure ; les calcaires givetiens et frasniens sont alimentés essentiellement par l'Ardenne qui leur fournit de l'eau beaucoup plus douce et plus agressive (Première Partie, chapitre IV).

b - Le Calcaire Carbonifère est recouvert de terrains tertiaires en beaucoup plus d'endroits que les calcaires mésodévoniens et néodévoniens ; le karst du Calcaire Carbonifère

est ainsi en beaucoup d'endroits un karst couvert par un terrain filtrant qui répartit l'eau et la fait arriver lentement et largement étalée au contact du calcaire sous-jacent (Deuxième Partie, chapitre IV).

Ceci explique que les phénomènes karstiques sont dans l'ensemble plus amples dans les calcaires du Dévonien moyen et supérieur que dans le Calcaire Carbonifère.

Cependant, les teneurs en CO_2 libre observées sont fréquemment très fortes aux émergences des eaux du Dinantien, plus fortes qu'aux points de sorties des eaux des calcaires dévoniens. Nous avons interprété le fait comme la conséquence d'une circulation fissurale plus développée dans le Dinantien, circulation comportant un meilleur contact avec l'air du sous-sol, riche en CO_2 (Première Partie, chapitre IV). Par conséquent, si les cavités sont plus vastes et mieux développées dans les calcaires méso- et néodévoniens que dans le Dinantien, on ne peut pas en conclure a priori que les seconds aient un moindre cavernement (sensu B. Gèze, 1965 b : rapport des "vides" aux "pleins" pour une roche caverneuse : en quelque sorte une macroporosité).

2. Nouvelles différences dans les facteurs de la karstification.

De la structure générale de nos formations paléozoïques résultent encore deux facteurs de différenciation entre nos deux séries calcaires. Ces deux différences ne jouent pas partout car elles tiennent à la morphologie de la surface ; mais statistiquement, elles ont un rôle important.

a - La pente générale des cours d'eau traversant la bande des calcaires méso- et néodévoniens est perpendiculaire à cette bande et assez forte : les eaux provenant de l'Ardenne se dirigent vers le drain principal que constitue la Meuse et la pente générale de la retombée ardennaise n'est pas négligeable.

Certains cours d'eau traversent de même les calcaires dinantiens ; c'est assez souvent alors après avoir traversé les calcaires méso- et néodévonien et y avoir acquis déjà une certaine dureté. Mais le drainage général des synclinaux dinantiens est surtout subséquent, donc parallèle à l'axe synclinal, et la pente moyenne de l'eau est nettement plus faible ; de même, pour les écoulements souterrains, le gradient hydraulique est plus faible, pour la même raison. La circulation de l'eau est donc en général plus lente dans le Carbonifère. Donc, d'une part, la saturation a davantage de chances d'être atteinte au bout d'un parcours plus court, et d'autre part l'érosion est très réduite.

b - La situation morphologique décrite en a a une autre conséquence : le drainage de la bande de calcaires méso- et néodévonien étant perpendiculaire à la direction des couches, la traversée de ces couches est assez brève (très généralement moins de 2 km). Le drainage du Calcaire Carbonifère suivant l'axe des synclinaux fait parcourir à l'eau, au contraire, un long chemin dans le calcaire (très généralement plus de 5 km) ; dès lors, si l'attaque du calcaire par l'eau est rapide par rapport à la vitesse d'écoulement, les eaux seront vite saturées et inactives ; si au contraire l'attaque se répartit au long du parcours, elle est en chaque point beaucoup plus faible.

Ces deux facteurs se joignent à ceux qui ont été décrits plus haut pour expliquer que les grandes cavités karstiques sont nettement plus rares, dans l'ensemble, dans le Calcaire Carbonifère que dans les formations calcaires méso- et néodévonien.

3. Différences dans la morphologie des grottes.

Si la différence entre nos deux séries calcaires paléozoïques, quant à l'importance des cavités, n'avait jamais été expliquée, il en est une autre qui n'a jamais été aperçue : c'est la différence des types morphologiques des cavités dans les deux ensembles.

a - Les "rivières souterraines", au sens où nous avons défini ce terme plus haut sont assez nombreuses dans les calcaires méso- et néodévonien (Grottes de Remouchamps, de Sainte-Anne à Tilff, de Han, de Hotton ...). Elles sont beaucoup plus rares dans le Calcaire Carbonifère ; l'exemple que nous en avons décrit (Trou Bozard : chapitre I, § 4) est très modeste : la largeur du conduit ne dépasse guère un mètre ; la pente est d'origine structurale, non régularisée.

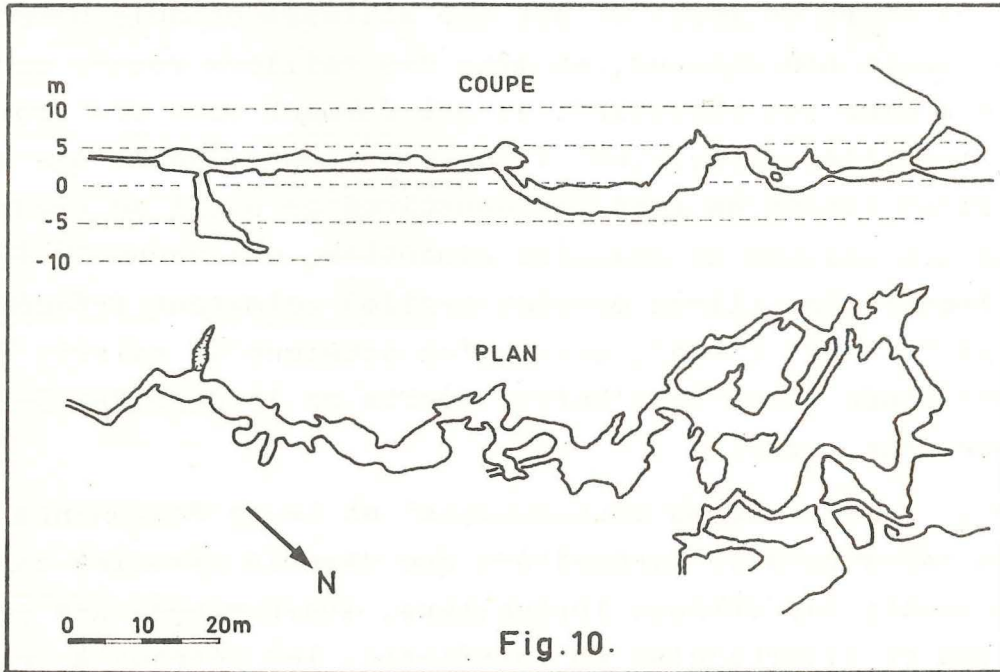
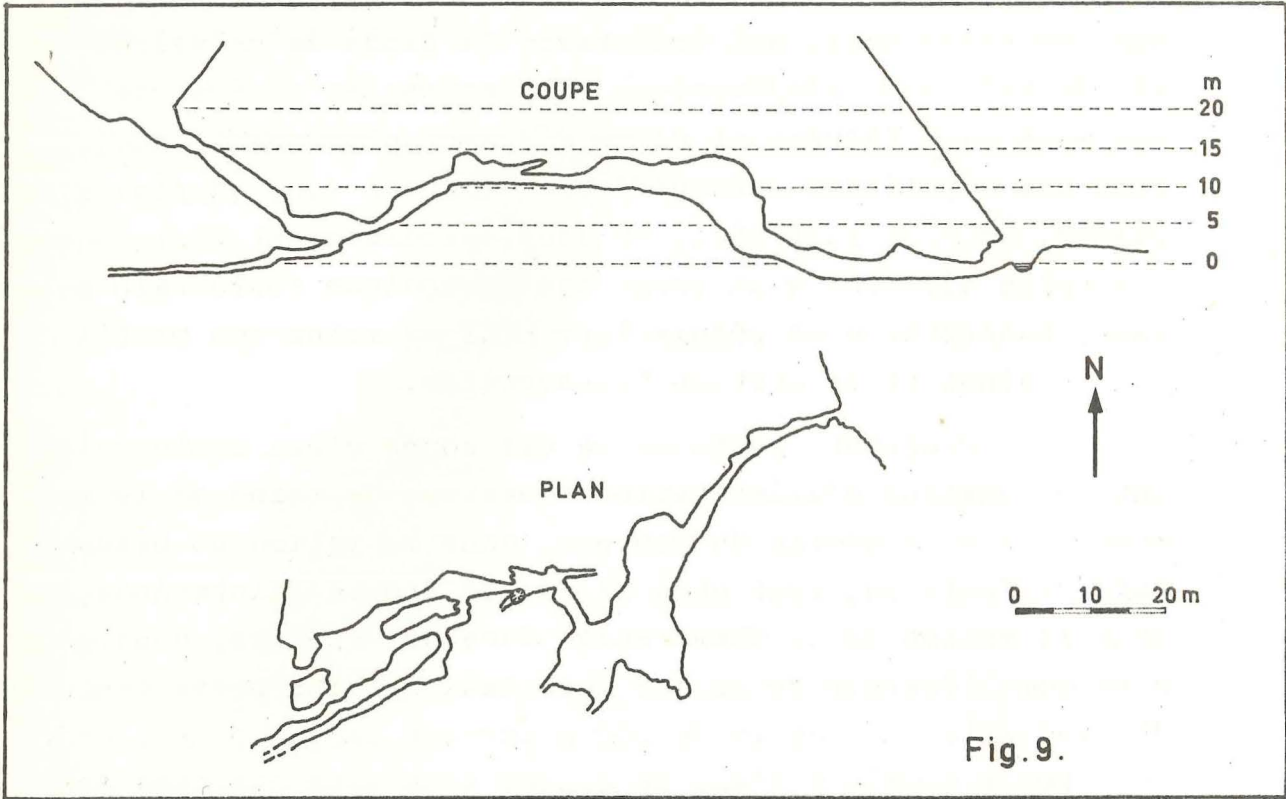
La "rivière souterraine" décrite à Dinant sur la rive droite de la Meuse par E. Van den Broeck, E.A. Martel et Ed. Rahir (1910, tome II) n'est connue que par divers accidents hydrologiques qui la jalonnent (points d'enfouissement, etc.) mais rien ne dit, faute d'accès pour son exploration, qu'il s'agisse bien d'un cours d'eau en écoulement libre et non de chenaux multiples, peut-être sous pression. Il en est de même pour la plupart des drains des calcaires dinantiens : peu d'entre eux sont accessibles, et lorsqu'on y accède, c'est généralement pour observer d'en haut par un regard (un puits), une nappe d'eau apparemment immobile, et non une galerie de rivière (exemple : la Grotte Merveilleuse à Dinant).

Les étagements de rivières souterraines anciennes sont également rares dans le Calcaire Carbonifère. La Grotte du Pont d'Arcole, à Hastière, dans le Tournaisien, en est un des rares cas ; peut-être peut-on considérer aussi comme telle une partie de la Grotte Merveilleuse, à Dinant, où E. van den Broeck, E.A. Martel et Ed. Rahir (1910, tome II), ont signalé un cailloutis stratifié dans une galerie située à 25 m au-dessus de la Meuse. Mais les exemples d'étagements de rivières souterraines dans le Méso- et le Néodévonien calcaires sont beaucoup plus évidents et plus nombreux (Grottes du Père Noël à Wavreille, du Pont à Esneux, de Sainte-Anne à Tilff, Jaminon à Cornesse-Pepinster, etc).

Une cause de cette différence réside dans le fait que les cours d'eau qui traversent la bande de calcaires mésodévoniens et néodévoniens proviennent en général de hauteurs plus élevées et d'une distance plus grande que ceux des synclinaux carbonifères : ils ont donc un plus grand bassin, un plus fort débit et leur enfouissement peut donner lieu plus aisément à un tronç hydrographique souterrain puissant, susceptible de régulariser plus ou moins son profil longitudinal et sa section transversale.

Pourtant, certains de ces cours d'eau souterrains ont des bassins d'alimentation modestes, de moins de 10 km² même, comme la Grotte du Monceau, dans le vallon de Beauregard, à Tilff ou, tout près de là, la Grotte Sainte-Anne, sous le vallon de la Chaweresse. Dans de tels cas, nous pensons que l'énergie du relief (ces deux bassins présentent une dénivellation actuelle de 200 m sur une longueur de l'ordre de 4 km) a permis à l'eau de couler plus vite que dans des synclinaux de calcaire dinantien. L'eau ainsi ne se sature pas en cours de route et est par ailleurs capable d'entraîner des débris non dissous, et même des cailloux roulés exogènes, tombés dans les chantoirs, et qui forment dans ces grottes des lentilles alluviales. Il ne fait pas de doute que les cailloux roulés de grès ont constitué un outil de creusement. Dans les cavités de calcaire dinantien, des accumulations de sédiments fins (limon ou même argile) colmatent fréquemment la grotte vers l'aval, sans qu'on atteigne de galerie à pente régularisée (Trou de l'Enfer, Grotte de la Carrière Dernier, à Sprimont, etc.).

b - Si les "rivières souterraines" et leurs étagements sont plus rares dans le Carbonifère que dans le Dévonien calcaire, par contre les chenaux irréguliers, anastomosés, les petites salles et diverticules en cul-de-sac, les réseaux à pente très irrégulière sont abondants dans les grottes du Calcaire Carbonifère. Les conduits s'élargissent et se rétrécissent



fréquemment ; ils ne présentent pas de hiérarchie. Nous donnons deux exemples de telles grottes, en plan et en coupe, aux figures 9 et 10.

Les parois ont généralement une morphologie très irrégulière : des creux en forme de cloches, des saillies, des piliers, constituent un paysage très opposé aux conduits calibrés ou aux vastes puits en cloches que l'on trouve dans beaucoup de grottes du Dévonien.

Il nous faut rappeler ici toutefois qu'il s'agit de différences dans l'aspect de la majorité des grottes, de part et d'autre. Car il existe aussi des grottes évoquant l'aspect des figures 9 et 10 dans les calcaires dévoniens, comme il existe des cours d'eau souterrains à la pente assez régulière, parfois sur quelques centaines de mètres, dans le Carbonifère (exemple : le Trou-qui-fume, à Furfooz).

La particularité si fréquente des grottes du Calcaire Carbonifère de présenter des salles spacieuses séparées par de curieux étranglements et une morphologie très irrégulière, telle que nous venons de la décrire, ne nous semble pas inexplicable.

Beaucoup de ces formes correspondent en effet assez bien à ce que W.M. Davis (1930) et J.H. Bretz (1942) considèrent comme des traces d'une activité "phréatique". Elles dateraient alors du temps où leur site était complètement noyé, par une eau remplissant tous les vides qu'elle pouvait atteindre, et circulant très lentement. Elles ont certes été remaniées ultérieurement, une fois qu'elles se sont trouvées

Deux exemples de grottes dans le Viséen.

Figure 9 - Grotte Lyell (ou Grande Caverne), à Ehein.
D'après Vandersleyen (s.d.), simplifié.

Figure 10 - Grotte Steinlein, à Comblain-au-Pont.
D'après Vandersleyen (1967), simplifié.

au-dessus du niveau des réserves aquifères, par le ruissellement de l'eau s'infiltrant. Mais, contrairement à beaucoup de cavités des calcaires méso- et néodévonien, au moment où le niveau "phréatique" s'est abaissé, les grottes du Calcaire Carbonifère n'ont généralement pas connu la formation de drains principaux puissants semblables à ceux du Dévonien. Et la raison de l'absence de ce stade s'explique par le fait que dans le Dinantien, comme nous l'avons dit plus haut dans ce chapitre, les cours d'eau ont des bassins de réception modestes, l'énergie du relief est faible, l'écoulement est lent, et les eaux sont souvent saturées avant même d'arriver sur le calcaire.

c - On aura remarqué combien les nuances lithologiques (1) qui séparent nos différents calcaires sont de peu d'effet en regard des facteurs ici considérés. Il en est une toutefois qui nous semble suffisamment importante pour constituer une différence morphologique générale supplémentaire entre les deux ensembles calcaires du Paléozoïque de Belgique.

Le Givetien et le Frasnien inférieur comportent des niveaux de calcaire relativement impur, souvent argileux. Ces niveaux peuvent donner lieu à des effondrements spectaculaires, comme aux Grottes de Rochefort et du Père Noël (voir cartes morphogénétiques ci-annexées). Ces grands éboulis sont beaucoup plus rares dans le Calcaire Carbonifère. Nous ne connaissons guère qu'un exemple de salle vaste, formée par effondrements, dans le Viséen : la grande salle de la Merveilleuse, à Dinant. Or, comme nous l'avons montré dans la section A de ce chapitre, ce sont les effondrements qui sont à l'origine de la forme actuelle des plus grandes cavités de notre pays. Il s'agit donc d'une différence morphologique importante.

(1) décrites dans le chapitre I de la Deuxième Partie (p. 18).

Ici encore, cependant, il n'est pas exclu que l'existence des rivières souterraines ait joué un rôle important, non seulement dans l'évacuation des débris, mais peut-être dans l'origine des effondrements. On sait en effet que les cours d'eau, vu la chaleur spécifique élevée de l'eau, constituent des "masses thermiques" considérables, susceptibles d'influencer fortement la température des roches encaissantes (F. Trombe, 1947). Il nous paraît dès lors très plausible qu'à certains moments du Quaternaire, de puissantes rivières souterraines aient pu provoquer sous terre d'importantes alternances de température qu'on ne trouve généralement qu'à la surface du sol et, dans les grottes, près des entrées.

Actuellement, dans certaines cavités froides de Belgique, on peut trouver en hiver des stalactites et stalagmites de glace pendant plusieurs semaines consécutives. Si des rivières souterraines ont pu amplifier l'importance des refroidissements - et la chose nous semble très probable - ce facteur s'est ajouté à la particularité lithologique des formations concernées et a renforcé le phénomène. On notera que la Grotte Merveilleuse, à Dinant, où se trouve le plus grand éboulis que nous connaissions dans le Calcaire Carbonifère, montre justement, comme nous l'avons déjà dit, des lits de cailloux roulés dans un étage actuellement sec.

En conclusion, non seulement la plus grande activité des phénomènes karstiques dans le Dévonien peut s'expliquer par des facteurs structuraux et hydrologiques, comme déjà vu dans les Parties 1 et 2 de ce travail, mais il s'avère que les deux séries carbonatées du Paléozoïque de Belgique correspondent dans l'ensemble à deux types différents de spéléogénèse, en relation certaine avec les grands traits de la géomorphologie de la surface :

- dans le Dinantien : des courants lents, peu hiérarchisés, cheminant dans des fissures ou des conduits à pente et à section transversale irrégulières ;

- dans le Dévonien moyen et supérieur : des cours d'eau assez rapides, mais capables de régulariser plus ou moins leur pente et leur section transversale ; des effondrements importants.

+

+

+

C H A P I T R E III

Spéléogénèse

S O M M A I R E

=====

A. LES FAÇONS DE POSER LE PROBLÈME.

Brève revue des questions importantes posées par la genèse des grottes depuis la fin du siècle dernier.

B. LA PART DE LA DISSOLUTION ET CELLE DE L'ÉROSION MÉCANIQUE.

Délimitation des domaines d'action respectifs des deux processus. Ordre de succession des phénomènes. La part de la corrosion diminue avec le temps au profit de celle de l'érosion mécanique.

C. ORIGINE PHRÉATIQUE, ORIGINE VADOSE.

Définition des deux termes. Toute eau calme n'est pas une eau phréatique. Nomenclature de J. Cvijić. Distinction entre courants dont la direction est imposée par la structure et courants "régularisés". Existence de phénomènes phréatiques au-dessus du niveau des phénomènes vadoses.

D. LES ÂGES DES GROTTES. LA KARSTIFICATION ACTUELLE.

Brève description des phénomènes karstiques d'âges divers, du Frasnien au Quaternaire. Chaque ère a connu des phénomènes karstiques. La karstification actuelle est active.

CONCLUSIONS.

A. LES FACONS DE POSER LE PROBLEME.

Le mot "spéléogénèse" est de G. Kyrle (1923). Mais c'est bien avant cela que fut posé le problème de l'origine, du mode de formation et de l'évolution des cavités souterraines.

Sans vouloir remonter aux époques où des idées furent émises, basées sur un nombre vraiment trop faible d'observations, on doit considérer qu'au milieu du XIXème siècle la question de l'origine des grottes était posée.

J.J. d'Omalius d'Halloy, dans un paragraphe, d'ailleurs intitulé "l'origine des cavernes", de son Précis élémentaire de Géologie (1843), énonce avec circonspection :

... "nous avons déjà eu l'occasion de parler de "celles qui se font encore sous nos yeux, par le simple effet de la poussée des matières volcaniques et de celles qui "résultent de l'écartement d'une masse minérale. On conçoit "aussi, dès que l'on admet que les montagnes ont été formées "par soulèvement, que le mouvement imprimé aux masses qui les "composent, et surtout les renversements qui en ont été la "suite, ont dû donner naissance à un grand nombre de vides "dans l'amas de décombres qui en résulte [...] On a souvent "cherché à rendre raison de cette origine par l'érosion des "eaux, et il est bien probable que ce genre d'action a exercé "une certaine influence sur plusieurs cavernes [...] Pour "pouvoir attribuer à l'action des eaux l'origine des cavernes "à étranglements, il faut supposer que des eaux éjaculées "de l'intérieur de la terre exerçaient une action dissolvante [...] On a supposé aussi que les cavernes sont le résultat du passage de gaz qui cherchaient à se dégager de "l'intérieur vers l'extérieur [...]"

A chacune de ces explications toutefois, Omalius d'Halloy voit un défaut ou une insuffisance, et l'auteur critique tour à tour chacune des idées avancées pour n'être, en fin de compte, satisfait par aucune.

Dès le milieu du XIXème siècle pourtant, diverses théories s'élaborent avec plus ou moins de détails ; la parution des "Eaux souterraines" de A. Daubrée, en 1887, établit définitivement l'importance de la fissuration des roches

et de l'action de la dissolution dans la formation des cavernes.

A partir de ce moment, de nombreux travaux furent consacrés aux questions de l'origine et de l'évolution des cavités karstiques.

Notre propos n'est point ici de retracer un historique détaillé de ces recherches : d'autres l'ont fait (1). Mais nous voudrions évoquer ici brièvement les façons successives dont le problème de la spéléogenèse a été posé, de façon à esquisser l'évolution des points de vue de la recherche, tout en montrant un aspect caractéristique constant des publications relatives à cette recherche : la controverse.

a - C'est tout d'abord la polémique entre les chercheurs convaincus de la prévalence de la corrosion dans la formation des grottes, corrosion par les eaux de percolation et par les rivières souterraines (E. Dupont, 1890, E. van den Broeck, 1895), et les tenants de l'érosion mécanique, qui considèrent que toute action de la dissolution est terminée après les quelques premiers mètres de la traversée du calcaire (A. Flammache, 1895) (2).

b - Vers la même époque naît une controverse sur le point de savoir si la circulation de l'eau se fait, dans les calcaires, par des rivières souterraines, et par des réseaux de fissures élargies par la dissolution (A. Daubrée, 1887, E.A. Martel, 1908) ou si l'eau constitue une nappe aquifère identique à

(1) On trouvera des revues des travaux anciens, et des historiques analytiques, notamment dans E.A. Martel (1921), F. Trombe (1952), et dans le travail récent de Ph. Renault (1967).

(2) Nous citons quelques noms d'auteurs à titre de "repères" ; une liste exhaustive serait, sur chaque point soulevé, très longue.

celle des autres terrains, perméables en petit (Th. Vers- traeten, 1895, A. Grund, 1903). Cette controverse, tournant parfois à la querelle, gardera longtemps une grande acuité.

c - L'existence d'eau de fond (eau phréatique) étant finalement admise par la plupart des chercheurs, et pour certaines régions en tout cas, cette eau présente-t-elle une surface régulière constituant un "niveau hydrostatique" (A. Grund, 1903 ; G.Dollfus, 1904) ou non (E. Martel, 1908, 1921 ; B. Gèze, 1937)?

Les grottes se développent-elles au sein de la zone phréatique, à sa limite supérieure, ou au-dessus d'elle?

Pour W.M. Davis (1930), les grottes se développent essentiellement dans la zone phréatique. Leur développement peut commencer dès que de l'eau douce remplace l'eau de mer qui imbibait les sédiments. Dans la zone phréatique, l'eau ne circule pas seulement d'un niveau élevé vers un niveau plus bas : elle circule des zones de forte pression vers les zones de moindre pression, il y a donc des circulations profondes en direction des points bas de la surface de la zone phréatique ; les cavités de cette zone présentent donc un réseau tridimensionnel compliqué. Si le niveau de la nappe s'abaisse, par exemple du fait de l'encaissement des cours d'eau, et que des cavités d'origine phréatique se trouvent ainsi dans la zone d'aération (zone "vadose"), au-dessus des réserves aquifères, elles peuvent être remaniées par des écoulements vadoses. Cette théorie fut reprise, et appliquée à de nombreuses grottes, par J.H. Bretz (1942), qui signala l'existence fréquente d'une période de remplissage des grottes par des sédiments meubles entre la phase de développement phréatique et celle de développement vadose.

Pour d'autres auteurs, le creusement dans la zone phréatique est négligeable ; le développement se fait à la limite supérieure de cette zone, dans la zone d'oscillation de la nappe (A.C. Swinnerton, 1932), ou même au-dessus, dans

la zone vadose (J.H. Gardner, 1932).

Cependant, Swinnerton, par exemple, tempère déjà une des oppositions en admettant un creusement par l'eau phréatique mais surtout à hauteur de la surface supérieure des réserves aquifères. D'autres chercheurs ont mis en évidence la possibilité de genèses différentes des grottes suivant les lieux, suivant le moment, ou la succession de phases différentes dans l'évolution du creusement (J. Cvijić, 1918, B. Gèze, 1965 a et b, etc.). De même, pour A.M. Piper (1932), le développement des cavités peut se faire plus vite ou moins vite que l'évolution du réseau hydrographique superficiel suivant les conditions lithologiques et structurales rencontrées. Si le drainage souterrain est inhibé, il est à peu près limité à la zone vadose ; si au contraire il est plus efficace que le drainage superficiel, il constitue un réseau circulatoire complet au sein du calcaire au niveau de la surface de la nappe. Pour G.T. Warwick (1953), le développement vadose sera plus ou moins important suivant la présence ou l'absence de vastes étendues de roches imperméables fournissant des eaux de surface à des cours d'eau qui s'engouffrent dans le calcaire.

d - Quoi qu'il en soit, l'ère des controverses ne semble pas close. L'avènement de la géomorphologie climatique a amené des études sur les karsts des pays chauds, et ceux-ci étaient très généralement considérés comme le lieu de prédilection des grands phénomènes karstiques, lorsque J. Corbel (1957), analyses à l'appui, avança que les calcaires sont beaucoup plus attaqués sous les climats froids que sous climat chaud.

e - Enfin, les géographes physiciens embarqués dans ce nouveau dilemme pourraient être mis d'accord par une tendance nouvelle sous-jacente dans divers travaux, et clairement exprimée par Ph. Renault (1967 p. ex.). Celui-ci, considérant que les changements de climat sont source, en spéléologie, de plus de problèmes que de données nouvelles, estime que "l'ap-

port des conceptions climatiques n'a que très peu influencé la spéléomorphologie" (1). Ceci introduit une remarquable étude des actions mécaniques et sédimentologiques de la spéléogénèse, dont la publication, partie par partie, n'est pas encore terminée au moment où nous écrivons ces lignes (cf. Renault, 1967 et 1968). Ce travail fait en quelque sorte le pendant (du côté physique et mécanique) aux études importantes qui, actuellement, rénovent notre connaissance des processus chimiques, de H. Roques (1968).

On nous excusera de répéter ici que cet exposé n'a rien d'un historique analytique, ni surtout exhaustif, mais qu'il nous a semblé devoir mettre en évidence combien les problèmes de spéléogénèse semblent depuis le début progresser à coup d'alternatives et d'oppositions, non certes dans chaque travail, mais dans l'ensemble de la production à chaque période.

Ceci nous a incité à considérer sous trois aspects les problèmes de la genèse des grottes. Nous envisagerons d'abord les parts relatives de la corrosion et de l'érosion, puis celles de l'évolution en régime phréatique et en régime vadose ; enfin nous aborderons le problème de l'âge des grottes, celui des climats, celui des processus actuels.

Il importe de préciser ici les limites spatiales et l'objet précis de l'exposé qui va suivre. Nous tenons en effet beaucoup à ne pas étendre nos considérations au-delà des limites (spatiales et conceptuelles) de notre zone d'investigation.

Nous considérons ici le problème de la genèse des grottes des calcaires paléozoïques de la Belgique. Encore nous attacherons-nous à la genèse des formes actuellement observables dans ces grottes. Les formes anciennes, "primiti-

(1) Ph. Renault, 1967, p. 8 ; cf. également pp. 10 à 14, 243...

ves", disparues, ne seront pas envisagées. Les grottes de Belgique ont connu une évolution très complexe, et qui, pour certaines, remonte très loin dans le temps. Beaucoup de nos cavités sont vastes, comparées aux premiers conduits dans lesquels a commencé à travailler l'eau qui les a formées. Dans beaucoup de cas, de ces cavités "originelles" nous ne savons rien, et les fissures et les minces conduits qui prolongent nos grottes actuelles n'offrent aucune certitude d'être les vestiges de ces cavités "primitives".

B. LA PART DE LA DISSOLUTION ET CELLE DE L'ÉROSION MÉCANIQUE.

1. Les domaines d'action respectifs de ces deux catégories de processus.

Si nous considérons comme effet de l'érosion mécanique, au sens large, tout départ de matière solide, y compris les départs par simple gravité, l'érosion mécanique a comme conséquences les plus spectaculaires les éboulis qui se produisent notamment dans les parties sèches des grottes. Dans l'eau, la forme d'érosion la plus caractéristique et la plus imposante est l'érosion "fluviale", dont l'existence est évidente dans les grottes (nous en avons donné des exemples au chapitre I). Cette érosion est d'autant plus forte que le cours d'eau est plus rapide et la quantité totale de matières enlevées augmente aussi en fonction du débit. Cependant, la présence de sédiments fins, argile et limon, au bas des fissures dans les grottes (p. ex. Grotte de Comblain-au-Pont) montre que des départs et des transports de matière solide se font aussi dans l'eau qui percole à travers des fentes même très étroites. En outre, nos expériences ont montré que même en eau calme, des particules non dissoutes quittent la roche par gravité et tombent au fond de la cavité (Deuxième Partie, chapitre II). Sur tous nos essais pour lesquels le calcul était possible, essais réalisés sur des calcaires de types très divers, on observe que la perte de poids par départ de matières non dissoutes dépasse 10% dans huit cas sur quinze, et, dans trois de ces cas, dépasse même 20%(1).

La corrosion est donc, en pratique, presque toujours accompagnée de départ de matières non dissoutes.

(1) Pour 11 échantillons prélevés en Belgique, la moyenne du départ de matière non dissoute, établie d'après les chiffres fournis dans la Deuxième Partie, chapitre II, p. 45 sqq., est de 16%.

Par contre, lors des écroulements à sec, il n'y a pas de dissolution au moment où se fait l'écroulement.

L'érosion mécanique apparaît donc, dans les grottes, contrairement à la corrosion, comme une catégorie ubiquiste de processus.

Certes, la dissolution peut être due à l'action d'eau se condensant sur les parois, donc en régime aéré et en l'absence de cours d'eau ou de masse d'eau, mais il s'agit quand même d'un processus se faisant dans l'eau (de condensation, en l'occurrence).

2. Importance spatiale et localisation respectives.

a - Les plus grandes salles des grottes témoignent toutes d'une importante action des écroulements sur leur état actuel, comme le montrent les échantillons de cartes morphogénétiques présentés au chapitre I. Mais le volume des éboulis est toujours, de par leur disposition, plus grand que le volume du vide créé dans la roche en place par l'écroulement, et une grotte ne peut donc s'agrandir que dans la mesure où une partie suffisante des débris est évacuée. Cette évacuation ne peut se faire que par l'eau, dans laquelle les débris peuvent partir en solution, en suspension, ou par saltation ou traînage. Les deux derniers modes de transport ne peuvent se faire que dans une vraie "rivière souterraine"; or l'observation des dépôts de ces rivières nous montre, en Belgique, très peu de sédiments calcaires grossiers. Les cailloux roulés comprennent peu de calcaires, les gros blocs n'ont en général pas pu voyager très loin : nos cours d'eau souterrains n'ont pas et, si on s'en réfère à l'observation des dépôts, n'ont jamais eu, la compétence nécessaire au transport de blocs volumineux, sauf exceptions. Le développement des grottes, en Belgique, est donc lié à l'évacuation par les rivières du calcaire, surtout en solution et en suspension ; il semble cependant clair que les écroulements facilitent l'action de l'eau en lui fournissant un matériel morcelé.

b - Tout autre est le problème de l'importance relative de la corrosion et de l'érosion mécanique dans l'eau même, à l'exclusion des phénomènes pouvant se dérouler à sec. Deux groupes d'observations nous ont fourni une idée de l'importance relative des phénomènes :

1°) nous avons rappelé au paragraphe précédent que la chute de particules non dissoutes intervient d'une façon non négligeable - de l'ordre de 10 à 20% - même en eau calme.

2°) Dans une rivière souterraine comme le Rubicon, à Remouchamps, nos analyses nous ont montré (1) que le transport de matières dissoutes est de l'ordre de 1000 tonnes par an, mais que la dissolution sur les 600 derniers mètres parcourus sous terre est en moyenne nulle. On pourrait objecter que les analyses montrent seulement que le bilan est nul, mais que dissolution et concrétionnement peuvent alterner et se compenser ; l'observation tout le long du cours d'eau montre qu'il n'en est rien en pratique, les dépôts de calcite étant extrêmement minimes. Cependant ces 600 mètres du cours inférieur connaissent chaque hiver un important apport de limon et d'argile dont la rivière abandonne une partie dans son cours inférieur et entraîne une autre partie au-dehors. Il y a donc là des actions mécaniques sans action physico-chimique.

Par conséquent, en eau calme, la dissolution est le facteur essentiel mais non unique ; en cours d'eau, la dissolution peut décroître jusque zéro, et le transport de matières solides subsister seul.

c - Le cas des siphons est particulier, et d'ailleurs variable. Nous avons montré au chapitre II que leur morphologie peut être due soit à l'érosion (Trou des Crevés à Belvaux) soit à la corrosion (amont de la Grotte de Remouchamps). En temps normal, la dissolution semble y prédominer ; nous avons d'ailleurs observé à la Grotte de l'Adugeoir, à Pétigny,

(1) Cf. tableaux III et IV de l'Annexe de la Première Partie.

d'intenses phénomènes de dissolution dans un siphon temporaire : un tel siphon, à sec en été, a été localement élargi par l'homme en 1894. Tous les angles dus à la fracturation de la roche sont fortement attaqués ; des résidus ferrugineux subsistent en relief et, à en juger par ces témoins, la dissolution a été, en 70 ans, de 4 mm au moins, en moyenne, et plus probablement de 6 mm. L'usure, où l'action de la dissolution prédomine, à en juger par la finesse du ciselé et le caractère insoluble des témoins en relief, est donc de l'ordre de 7 mm par siècle.

Cependant, en temps de crue, dans bien des siphons, l'action mécanique doit être importante, à en juger par les débris grossiers qui s'y accumulent et parfois même les franchissent. Cela a déjà été mis en évidence par divers auteurs dont Ph. Renault (1963, p. 362).

3. Ordre de succession des phénomènes.

Nous avons vu plus haut que toute action notable de la gravité dans les calcaires et les dolomies suppose une action antérieure de l'eau ; cette action de l'eau s'exerce, à ses débuts, surtout par dissolution car, dans les premiers conduits, la place n'est pas suffisante pour que l'eau coule assez vite et avec un débit assez important pour avoir une action érosive réelle.

Certes, les fissures sont, au départ, d'origine mécanique ; mais ce phénomène n'est pas en lui-même karstique et n'est d'ailleurs pas propre aux calcaires et aux dolomies.

D'autre part, si nos expériences ont montré (cf. Deuxième Partie) que la dissolution en eau calme est très généralement accompagnée de départ de matières non dissoutes, par contre ce départ est lié à l'action de la dissolution et, dans le cas général, est absent si la dissolution n'agit pas préalablement.

L'ordre dans lequel les processus se succèdent dans la nature est donc le suivant :

- a - corrosion, pratiquement seule, durant une phase qui peut être d'un effet érosif très minime (quelques microns) ;
- b - corrosion accompagnée d'un peu de départ de matières non dissoutes ;
- c - augmentation de la part des transports solides au fur et à mesure que les conduits s'agrandissent ; au stade des rivières souterraines, éventuellement, l'érosion mécanique peut agir pratiquement seule (cas de la Grotte de Remouchamps) ;
- d - possibilité d'action de la gravité : écroulements à sec, dont la probabilité augmente avec la dimension des cavités - avec leur largeur surtout.

Ensuite, ou simultanément, tous les stades antérieurs (a à c) peuvent se présenter à nouveau, dans un ordre éminemment variable.

En résumé :

Sur le plan génétique, la corrosion apparaît comme le facteur *originel* et *déterminant* du creusement des grottes.

C'est le facteur originel parce que seule elle peut attaquer la roche dans des fissures ou des conduits très étroits où l'eau ne circule que très lentement.

C'est le facteur déterminant parce que si la corrosion n'agit pas, le départ de matières solides ne peut se faire : les formes d'érosion mécanique souterraine exigent en effet l'existence de vides préalables.

Au point de vue des processus, même en eau calme, *la corrosion engendre un départ de matières non dissoutes* (mais non nécessairement insolubles!). Ce départ de matières non dissoutes doit être a fortiori important lorsque l'eau est agitée ou s'écoule rapidement, et surtout si la corrosion

entre en jeu. Dans les grands cours d'eau souterrains, la dissolution est très faible, et, dans le cas le mieux étudié par nous à ce sujet (Grotte de Remouchamps), l'action de la dissolution est nulle dans le secteur aval de la rivière hypogée.

Au fur et à mesure que progresse le creusement, la corrosion perd donc de son importance au profit de processus physiques. Cette évolution atteint, dans la région concernée, son apogée dans l'actuel façonnement des grandes salles par les effondrements.

C. ORIGINE PHREATIQUE, ORIGINE VADOSE.

1. Signification des deux termes et délimitation des deux domaines.

PHREATIQUE ($\phi\rho\epsilon\alpha\rho$: puits) est le qualificatif que A. Daubrée (1887) appliquait à la nappe d'eau qui alimente les puits. On l'applique souvent à toute la masse de l'eau située sous la surface de la "nappe", et on qualifie aussi de phréatique la zone qui s'étend sous cette surface (à l'exclusion, bien entendu, de zones qui seraient sèches, entre deux nappes situées à des niveaux différents). Pour A. Daubrée (op. cit.), la nappe phréatique est une nappe assez superficielle pour que les puits puissent l'atteindre et, en particulier, seule la nappe supérieure, dans le cas de superposition de nappes, est dite phréatique (1). En spéléologie, à la suite surtout de l'usage qu'en a fait W.M. Davis, le terme qualifie une zone noyée dont il est parfois impossible de dire s'il s'agit bien de la nappe supérieure, puisque le caractère "phréatique" est identifié d'après la morphologie de la cavité (idée remarquablement développée par J.H. Bretz, 1942).

On a parfois évoqué l'existence d'une nappe continue dans les calcaires mais très généralement leur faible porosité et leur très faible perméabilité en petit font que, là où une nappe existe, elle n'est pas continue mais forme une "nappe en réseau", dans les cavités karstiques et dans les fissures.

Actuellement, et également à la suite de l'usage qu'en fit W.M. Davis (1930), on dénomme aussi phréatique une cavité karstique qui s'est formée dans la zone phréatique sensu lato c'est-à-dire dans une zone constamment noyée.

(1) Sur les détails de l'historique de cette notion, on consultera E.A. Martel (1921) ; son parti-pris n'enlève rien à la valeur de son historique fouillé (pp. 279-284) ; pour une mise à jour actuelle du concept, voir B. Gèze (1965a).

VADOSE (*vadosus* : guéable, peu profond) se dit, d'après Meinzer (1923), de l'eau se trouvant au-dessus de la surface piézométrique ("water that is in the zone of aeration and therefore usually on its way down from the land surface to the zone of saturation"). S'appliquant originellement à l'eau même, le terme vadose s'emploie maintenant aussi elliptiquement pour désigner les phénomènes se passant dans cette eau et la période de son existence qu'une cavité, p. ex., passe dans la zone vadose.

On voit que la zone vadose surmonte donc la zone phréatique et que si, au cours du temps, les rivières s'encaissent et que la nappe phréatique suit ce mouvement, des cavités se trouvant au début dans la zone phréatique seront ensuite dans la zone vadose.

Dans une classification en *vadose* et *phréatique* des origines d'une cavité, la place des "rivières souterraines" est un peu ambiguë. Elles sont vadoses puisqu'elles sont "peu profondes", et "dans la zone d'aération". Certes leur pente faible et régulière en direction de l'émergence est analogue à celle des nappes phréatiques ; cette analogie est renforcée par la permanence de ces courants et par le fait qu'ils drainent parfois des réservoirs aquifères assez importants. Mais les sédiments transportés - y compris à certains moments des cailloux - les différencient de toute façon de l'eau de fond.

On a vu dans les chapitres précédents l'importance dans le karst belge de ces cours d'eau hypogés, comme la rivière souterraine de Remouchamps ou celle de Sainte-Anne, à Tilff (1). Outre leur développement actuel, il faut aussi considérer l'ampleur des passages ainsi creusés à plusieurs moments du Quaternaire (2).

(1) Concernant leur action actuelle sur le calcaire, voir Première Partie, pp. 168-169.

(2) Au sujet de l'importance au Quaternaire, voir plus haut pp. 26 et 61-62.

A ces courants, Cvijić faisait dès 1918 une place à part, entre les zones vadose et phréatique, en considérant que les eaux du karst se répartissent en trois zones (1).

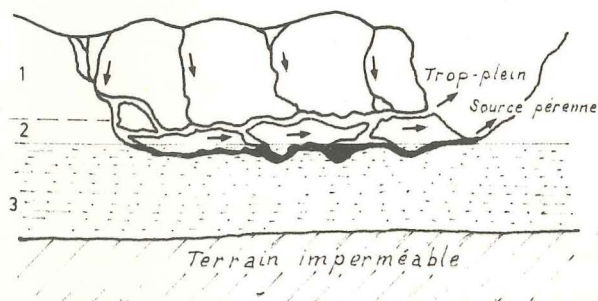


FIG. 11 : Les trois zones hydrologiques du karst, d'après J. Cvijić : I, zone supérieure d'absorption, avec écoulement temporaire ; II, zone intermédiaire à courants plus ou moins constants ; III, zone inférieure, réservoir permanent (d'après B. Gèze, 1965 a).

La zone supérieure est celle de la percolation des eaux pluviales ; la zone intermédiaire est celle où des courants plus ou moins constants collectent ces eaux et les mènent, soit en écoulement libre, soit en conduite forcée, vers les résurgences ; la zone inférieure est constamment noyée et constitue la zone de "l'eau de fond", la zone phréatique.

Des critiques ont été adressées à cette division en trois zones, tout comme à la classification vadose-phréatique, critiques basées sur une série de cas particuliers. On en trouvera la revue dans B. Gèze (1965 a). Celui-ci estime néanmoins que cette division est un schéma utile et pratique, correspondant en général, à une réalité hydrologique. C'est

(1) E.A. Martel (1921, p.300) cite même un prédécesseur, Slichter, qui aurait distingué en 1902 : 1°) une zone non saturée, 2°) la surface d'écoulement, 3°) les zones profondes d'écoulement.

aussi notre conclusion, comme nous venons de le dire, en ce qui concerne les calcaires méso- et néodévonien de la Belgique, où des exemples flagrants de la zone intermédiaire sont constitués notamment par les rivières souterraines de la Grotte Sainte-Anne à Tilff, de la Grotte de Remouchamps, etc., et où des exemples clairs de cavités anciennement formées dans cette zone s'observent à la Grotte du Pont, à Esneux, à la Grotte du Père Noël à Wavreille, etc.

B. Gèze (1965 a) cite des exemples où soit la zone supérieure, soit la zone inférieure, soit encore la zone moyenne existe seule. Dans le Calcaire Carbonifère de la Belgique, contrairement à ce qui s'observe dans le Dévonien, c'est la zone moyenne qui semble très peu développée et surtout qui n'a guère laissé de traces datant des stades antérieurs de l'évolution des vallées : à la Grotte de Comblain-au-Pont, par exemple, il semble que lors de la descente de la zone de "l'eau de fond" on se soit trouvé immédiatement et définitivement dans la zone d'infiltration sans que la zone intermédiaire ait laissé de traces d'une bonne organisation du drainage. Dans beaucoup de grottes des calcaires dinantiens, le cas est encore plus flagrant et on ne peut accéder qu'à des réseaux de fissures descendantes, parfois à des salles, mais rarement à des troncs de drainage principaux. Actuellement aussi, une nappe aquifère est connue par places au bas de certaines fissures sans qu'on connaisse d'axes de drainage comportant un système circulatoire bien organisé. Evidemment, on peut toujours considérer que la zone intermédiaire existe, si on la définit par sa fonction d'écoulement de l'eau vers les résurgences ; mais au point de vue morphologique, et même au point de vue du développement de la fonction hydrologique, la zone intermédiaire est très peu évoluée, quasiment avortée, et on est alors ramené au schéma simple "phréatique-vadose".

H. Roques (1963) avait analysé, dans une série de bassins hydrologiques de France et de Belgique, des eaux de

résurgences, et avait classé les bassins notamment dans l'ordre croissant des indices de saturation des résurgences. Il notait (op. cit., p. 181) "la dispersion particulièrement grande" des points figuratifs du Synclinorium de Dinant. En regroupant d'une part les résurgences du Dévonien et d'autre part celles du Dinantien, nous avons remarqué que le groupe primitif hétérogène se divisait en deux groupes plus homogènes et que l'un, celui du Dinantien, présentait systématiquement des indices de saturation élevés et que l'autre, le groupe dévonien, avait des indices de saturation beaucoup plus variables, mais généralement inférieurs. Dès lors l'interprétation que H. Roques donnait des groupes de résurgences en France pouvait aussi s'appliquer à la Belgique : il reliait les indices de saturation élevés à la circulation dans des "réseaux de fentes", par opposition aux "réseaux de (grands) conduits". Ceci correspond très bien à la différence de morphologie entre les cavités dans le Dinantien et les cavités dans le Dévonien moyen et supérieur. Et les résultats de ses mesures expriment du même coup la différence entre les qualités chimiques des eaux de la zone intermédiaire et celles de la zone inférieure, les eaux phréatiques.

2. La non-équivalence de "eau phréatique" et "eau calme".

La légende de nos cartes morphogénétiques comporte un terme ainsi défini : creusement par l'eau stagnante ou en mouvement très lent ("action phréatique").

Les différents termes de la légende sont, on l'a vu, basés sur l'observation directe des formes. Certaines formes se sont indubitablement formées sous eau, dans un courant très lent ou nul (voir chapitre II). Plusieurs de ces formes ont été décrites, dénommées et cataloguées par J.H. Bretz (1942) dans sa rubrique "phreatic features". Nous ne doutons pas de

la correction de son interprétation dans les cavités étudiées par lui aux Etats-Unis. Mais, si l'on généralise l'emploi de ces formes bien déterminées comme critères, elles ne peuvent, génétiquement, servir que de critères d'une formation sous eau, en zone noyée, mais non nécessairement de zone phréatique, avec les implications hydrologiques (de niveau piézométrique, etc.) du terme.

En effet, en plusieurs endroits, nous connaissons des étendues d'eau calme perchées au-dessus d'une rivière souterraine en écoulement libre. Ces bassins ne peuvent en rien être considérés comme phréatiques ; il n'y a pas là d'eau de fond mais une eau d'infiltration curieusement retenue, perchée, dans un réservoir dont on a peine à penser qu'il soit excavé dans une roche non fissurée (encore que la chose est possible), mais qui plus probablement a son fond colmaté. Le petit lac de Remouchamps, perché juste à l'aplomb de la rivière souterraine, constitue un bassin d'une douzaine de mètres cubes probablement colmaté par de la calcite ; le lac du réseau Lemaire, dans la Grotte Sainte-Anne à Tilff, est suspendu à une quinzaine de mètres au-dessus de la rivière souterraine et son fond, apparemment colmaté par de l'argile, retient une étendue d'eau de plus de 90 m², de plusieurs mètres de profondeur par endroits. En ces places, il est évident que peuvent se développer sous l'eau des "phreatic features" de J.H. Bretz alors qu'elles sont bien au-dessus des rivières souterraines à écoulement libre. C'est pourquoi nous avons estimé ne pas pouvoir, dans notre légende, considérer des formes comme à coup sûr "phréatiques".

Les exemples que nous donnons ici rejoignent d'ailleurs le cas spectaculaire que B. Gèze (1937) a observé dans le Massif Central : un puits contenant en permanence plusieurs mètres d'eau, et dont le niveau d'eau se trouve cinquante mètres plus haut que celui d'un ruisseau drainant tout près de là une poche à phosphorite.

De même, les conduites de forme tubulaire ne nous semblent pas nécessairement formées dans la zone "phréatique": la présence de cailloux roulés, l'absence de figures de corrosion différentielle et la mise à gabarit de la section sur une certaine distance rendent très probables des actions mécaniques énergiques qu'on voit mal sous le niveau piézométrique. Nous ne sommes pas convaincus par l'argumentation de P. Chevalier (1944) qui considère qu'il y a une zone de conduites forcées à la base d'un massif, et une zone d'écoulement libre systématiquement située au-dessus. Une conduite forcée peut très bien relier deux zones d'écoulement libre pourvu qu'elle constitue, entre les deux, un passage temporairement trop étroit pour écouler au fur et à mesure dans la zone inférieure toute l'eau collectée dans la zone supérieure.

En Belgique en tout cas, nous n'avons pas observé de "zones" anciennement en conduite forcée distincte de "zones" formées en écoulement libre. On pourrait attribuer ce fait à l'évolution "polycyclique" des grandes vallées: lors de chaque nouvelle phase d'encaissement de la rivière, l'écoulement libre aurait succédé à l'écoulement en conduite forcée. On retrouve dès lors juxtaposées les traces d'actions consécutives.

Il nous semble donc plus commode et plus significatif au point de vue morphologique de classer les modes de creusement de nos cavités, comme nous l'avons dit au chapitre précédent, en écoulements structuraux (c'est-à-dire imposés par les plans de stratification, les diaclases ou les failles, mais ne suivant pas nécessairement le pendage de la roche) et courants régularisés, caractérisés par un écoulement vers la rivière épigée principale, avec très nette tendance à la régularisation du profil en long. En Belgique, cette tendance à la régularisation est caractéristique de la "zone intermédiaire" de J. Cvijić.

Quant aux courants structuraux, leur signification nous apparaît double :

a - partout où nous pouvons accéder à des cavités situées à plusieurs mètres sous le niveau de la "rivière souterraine" qui exprime selon nous la "zone intermédiaire", ces cavités nous paraissent d'une forme déterminée par la structure. Les cavités de la "zone inférieure", "phréatiques", seraient dans ce cas.

b - Mais dans la zone d'aération les écoulements, surtout sous forme de ruissellement temporaire, diffus ou concentré, reprennent ces mêmes conduits structuraux ; en effet, les conduits régularisés ont une pente très faible (de quelques ‰) et ne mènent pas de la surface vers la zone noyée. Les écoulements structuraux au contraire, dans nos terrains paléozoïques plissés, suivent des pentes souvent notables, parfois d'ailleurs coupées de contre-pentes, mais, dans l'ensemble, ils représentent des drains favorables et donc utilisés par les eaux d'infiltration, alors que leur origine est en général beaucoup plus ancienne. D'ailleurs, c'est aussi par ces mêmes conduits que, à la suite de l'encaissement de la rivière principale, un nouveau cours inférieur, tendant à se régulariser, capture le cours ancien qui correspondait à la "zone intermédiaire" avant l'encaissement de la rivière principale.

Les courants "structuraux" nous apparaissent donc comme fonctionnant 1°) sous les "rivières souterraines", et alors les écoulements y sont probablement peu rapides : on est dans la zone phréatique ; 2°) au moment de la capture d'une "rivière souterraine" suspendue, par une nouvelle rivière en voie de creusement à un niveau inférieur, et alors l'écoulement est, pendant un temps géologiquement bref, rapide et puissant, puisque c'est toute une rivière qui descend ; 3°) aux époques ultérieures, où la cavité est dans la zone

d'aération et où des courants d'infiltration descendent vers la rivière souterraine, empruntant fréquemment des conduits anciens bien trop vastes pour eux.

Certes, cette classification est moins "élaborée" que les autres classifications que nous avons citées ; mais elle nous semble concorder étroitement avec nos observations et c'est dans les grottes mêmes qu'elle nous est apparue peu à peu au fil de nos travaux.

Nous tenons à préciser aussi qu'il ne s'agit en rien, on l'aura vu, d'une théorie, et que nous ne sommes nullement persuadé d'avance qu'elle pourrait s'avérer utile dans d'autres régions, p. ex. en terrains horizontaux, ou dans des régions de relief montagneux.

3. Importance spatiale et localisation des phénomènes phréatiques et vadoses.

a - Importance spatiale.

Les cavités qui ont gardé un aspect indubitablement "d'eau en écoulement très lent" occupent peu de secteurs dans les grottes cartographiées. Le plus grand est situé à l'extrémité W de la Grotte de Comblain-au-Pont (carte à la suite de la p. 31). D'autres grottes belges présentent amplement ces phénomènes, mais elles sont peu nombreuses. Dans les Grottes jumelles de Flère, p. ex., dont une partie est figurée en plan p. 53 (fig. 6), il apparaît nettement un réseau structural, suivant diaclases et direction des bancs. Les parois montrent un remarquable "boxwork". Ces grottes s'ouvrent au bord de la plaine alluviale et le fond de certaines fissures est au niveau de la Vesdre, et parfois inondé : la morphologie structurale et le "boxwork" sont donc bien dans un contexte d'origine phréatique.

Néanmoins, dans l'ensemble des cavités investiguées, les secteurs développés en milieu phréatique sont rares.

Evidemment, des cavités phréatiques peuvent avoir été simplement réaménagées par les eaux des zones "intermédiaire" et "supérieure" ; le fait est que le remaniement a alors effacé les indices de l'action phréatique.

b - Localisation des processus vadoses et des processus phréatiques.

En général, la nappe phréatique draine les eaux vers un cours d'eau principal, une grande rivière. Les phénomènes vadoses, eux, se déroulent au-dessus de la zone phréatique. Ces notions générales souffrent, dans les formations étudiées, deux sortes d'exceptions, dont la première est fréquente :

1°) La coupe I jointe à la carte de la Grotte de Belvaux, à Verviers (à la suite de la p. 15), montre que la grotte s'enfonce à plus de trois mètres sous le fond du lit de la Vesdre (quatre mètres sous le niveau de l'eau le jour des mesures) en un point distant d'une trentaine de mètres seulement de la rivière. Il n'y a donc, en cet endroit, pas de nappe phréatique amenant l'eau à la rivière. Lors des levés, la saison n'était pas particulièrement sèche, et la rivière était suspendue à 4 mètres au moins au-dessus de la nappe. Nous avons refait deux fois la même constatation, dont une fois en décembre (en période pluvieuse). Les couloirs bas ainsi repérés ne sont en fait envahis par l'eau que lors de crues exceptionnelles, et ce n'est alors pas par la montée d'une nappe mais par le débordement de la Vesdre, qui inonde la grotte. Une observation analogue peut se faire au Nou-Molin, à Rochefort : là, un vaste porche situé à trois mètres en contre-bas de la Lomme, à vingt mètres de distance de celle-ci, est protégé par une digue grossière de l'envahissement par la rivière. A trois mètres sous celle-ci, "l'eau de fond" est absente dans le porche. On peut faire une constatation semblable au Trou des Crevés, à Wavreille,

comme le montre la fig. 12, mais ici on dispose de plus de données.

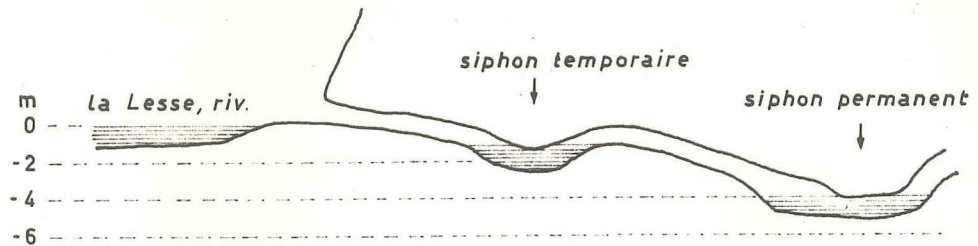


FIG. 12 : L'entrée du Trou des Crevés à Wavreille. Coupe développée. Echelle des hauteurs non exagérée. Un siphon temporaire a son plan d'eau situé à peu près un mètre plus bas que le niveau d'étiage normal de la Lesse ; un siphon permanent a son plan d'eau situé à 4 m sous ce niveau.

En effet, un siphon permanent, ayant son plan d'eau à 4 m sous le niveau normal d'étiage de la Lesse, a été franchi à plusieurs reprises par le S.C.U.C.L. (1), après assèchement partiel par pompage, et j'ai ainsi pu visiter le siphon et la grande grotte qui y fait suite. Le siphon s'amorce à nouveau de lui-même, en quelques minutes, dès qu'on cesse de pomper. Par contre, un siphon, intermédiaire entre le premier cité et la Lesse, s'amorce en temps de crue, par débordement de la Lesse, et se vide progressivement, tout seul, après la décrue. Il y a donc ici une eau de fond ayant au Trou des Crevés son plan d'eau à 4 m sous la Lesse, et remplissant le siphon inférieur. Par contre ce siphon, distant de la Lesse de moins de 30 m, est sans communication hydrologique avec la rivière puisqu'elle ne le remplit que par débordement lors des fortes crues.

Toutes ces observations montrent qu'on ne peut, dans nos calcaires, tabler sur l'altitude des grandes plaines

(1) Spéléo-Club Senior de l'Université de Louvain.

alluviales pour établir l'altitude sous laquelle agissent les processus phréatiques. La Vesdre à Verviers, la Lesse à Wavreille et la Lomme à Rochefort sont toutes suspendues à plus de 3 m au-dessus de la zone noyée, et les fissures sont soit absentes soit plus probablement colmatées, entre ces rivières et les cavités voisines situées dans les trois cas à une distance d'une trentaine de mètres ou moins.

2°) De profondes figures de corrosion, manifestant une dissolution intense en l'absence d'érosion mécanique (lits schisteux en relief), s'observent dans la Grotte de Remouchamps, au-dessus de la rivière souterraine (cf. p. 34). Ces phénomènes n'ont pu être représentés sur la carte morphologique car ils affectent surtout des parois verticales, jusqu'à plusieurs mètres au-dessus de la rivière, mais non le plafond qui est très élevé.

Ces formes d'eau calme, d'aspect *phréatique*, sont, nous allons le montrer, *contemporaines de l'écoulement "vadose" qui se fait sous elles.*

Le phénomène s'explique comme suit : la rivière souterraine de la Grotte de Remouchamps est accessible sur quelque 600 m en amont de sa résurgence. Mais, à l'état naturel, ces 600 m étaient coupés en deux tronçons par une longue voûte mouillante sous laquelle l'eau circulait en conduite forcée. En temps de crue, le niveau montait en amont de cette voûte mouillante et la partie supérieure de l'eau retenue, en crue, derrière ce siphon était calme. Plus la crue était forte, plus l'eau montait, et plus la tranche d'eau supérieure était calme (puisque l'écoulement se faisait par un conduit situé au niveau du lit de la rivière souterraine). Le processus n'a évidemment rien d'anormal, mais le résultat est un cas typiquement inverse du cas général théorique prévu par W.M. Davis (1930) et J.H. Bretz (1942) : des "actions phréatiques" se manifestent au-dessus du niveau des "actions vadoses", et pourtant bien liées à ces mêmes actions.

De plus, les formes phréatiques ne s'observent ici que dans la partie amont de la grotte, et, à l'aval de la voûte mouillante, les eaux débouchent dans une zone qui est actuellement marquée exclusivement par l'action de la rivière souterraine. C'est de nouveau l'inverse du cas théorique (où les eaux vadoses alimentent la zone phréatique).

En conclusion, au sujet de la distinction "vadoses" - "phréatique", nous croyons établis les faits suivants :

- 1°) La distinction "vadoses" - "phréatique" est pertinente, en tout cas pour l'étude des calcaires dinantiens, mais la classification en trois zones de J. Cvijic (1918) est mieux adaptée à l'étude des calcaires dévoniens.
- 2°) Les formes dites "phréatiques" par J.H. Bretz sont des formes d'eau calme, mais des critères hydrologiques ou la connaissance de l'évolution géomorphologique régionale ou d'autres critères peuvent être dans certains cas nécessaires pour démontrer que cette eau calme était bien "phréatique".
- 3°) En plusieurs endroits (Vesdre à Verviers, Lomme à Rochefort, Lesse à Belvaux) les réserves aquifères des calcaires n'affleurent pas sous forme d'une nappe au niveau de la rivière subaérienne. On n'est pas fondé, dans ces cas, à considérer comme phréatique tout ce qui se trouve sous le plan d'eau de la rivière.
- 4°) Des "actions phréatiques" peuvent se dérouler, de façon non aberrante en fait, au-dessus des "actions vadoses" à une même époque.
- 5°) Notre classification en courants dépendant de la structure et courants à profil en long régularisé, pour moins détaillée et moins génétique qu'elle soit, nous paraît une approche objective du problème dans la région étudiée et nous semble avoir des implications plus immédiates sur le plan morphologique.

D. LES AGES DES GROTTES. LA KARSTIFICATION ACTUELLE.

1. Les phénomènes karstiques paléozoïques.

La grotte longue de 85 m, découverte à Engis en 1871 à 205 m sous la surface du sol, soit à plus de 120 m sous le niveau de la Meuse, est la première grotte d'âge probablement paléozoïque qui ait été décrite en Belgique. Elle avait été recoupée par une exploitation minière de sulfures de zinc, de plomb et de fer. Malheureusement, au moment où, plus de trente ans après sa découverte, E. Harzé prit conscience de l'intérêt de la cavité et entreprit de la décrire, elle était déjà devenue inaccessible (E. Harzé, 1904). Cet auteur, puis E. van den Broek, E. Martel et E. Rahir (1910, t. II, annexe p. 43) qui reprennent sa description, suggèrent que la grotte pourrait être d'âge paléozoïque; mais l'inaccessibilité de la cavité empêcha une étude détaillée et la question ne fut jamais résolue.

Depuis lors, cependant, on a pu, en d'autres endroits, établir avec certitude l'existence de phénomènes karstiques durant le Paléozoïque.

Bien que ce travail soit consacré au creusement des grottes, nous évoquerons brièvement ici l'âge de quelques phénomènes karstiques fossiles de surface.

Ce qui concerne les phénomènes karstiques proprement superficiels est indiqué en petits caractères.

La plus ancienne manifestation karstique que nous avons observée est constituée par un lapié frasnien, visible sur une paroi de la Grotte de Remouchamps, dans des bancs du Frasnien moyen, au bord de la rivière souterraine (fig. 13).

Il est aisé de distinguer ce lapié des stylolithes fréquents dans la formation, car il est plus grand que tous ceux qu'on y observe, et, contrairement à eux, il est limité à sa partie supérieure comme à sa partie inférieure (le "fond") par des surfaces assez planes et de niveau à peu près constant.

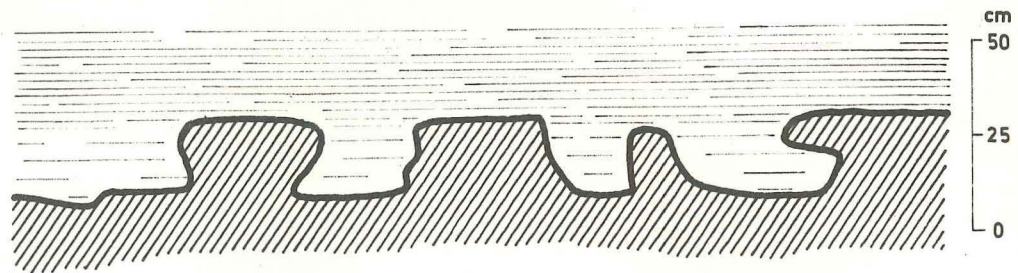


FIG. 13 : Lapié "intraformationnel" dans le Frasnien moyen. Grotte de Remouchamps, étage inférieur, près du Pont des Titans.

J.M. Graulich a signalé en 1954 que trois cavités avaient été recoupées vers 1000 m de profondeur par le sondage de Wépion (Namur) (1). Ces trois cavités, dont l'une comportait des concrétions de calcite fibro-radiée et rubanée, totalisent 20 m de vide dans le sondage et se trouvent entre 816 et 857 m sous le niveau de la mer. J.M. Graulich (1954), envisageant deux âges possibles pour ces cavités, un âge pré-hercynien et un âge triasique, pencha d'abord pour la seconde hypothèse, mais préféra ultérieurement la première (J.M. Graulich, 1963).

C'est à la suite de nouvelles observations, et en particulier de l'étude des sondages de Soumagne et de Soiron (province de Liège) que J.M. Graulich considéra l'existence de poches de dissolution d'âge namurien, et qu'il data du Namurien également les cavités du sondage de Wépion. L. Callembert (1954), sans décider qu'il s'agissait d'un âge namurien, avait déjà considéré qu'il existait dans la région de Thiarmon d'importants phénomènes de dissolution pré-crétacés.

G. Damiean (1956) a relevé dans la vallée de la Mehaigne les vestiges de conduits karstiques fossiles dans

(1) J. Corbel (1957, p. 419) y voyait le signe que l'action dissolvante des eaux s'exerce "jusqu'à la base du calcaire, quelle qu'en soit la profondeur". Il n'en est rien, comme on va le voir dans la suite du texte.

des formations tournaisiennes. Ces conduits seraient eux-mêmes antérieurs au dépôt viséen qui les surmonte et qui les a partiellement remblayés.

H. Pirlet (1967) décrit, entre Huy et Namur, un phénomène de dissolution important, qu'il date du Viséen inférieur. Il s'agit d'une dépression d'une dizaine de mètres de profondeur, dont la surface présente des creux de dissolution remplis, comme l'ensemble de la dépression, de sédiments d'âge Viséen inférieur. J. Thorez et W. van Leckwijck, dans une étude détaillée du remplissage d'une poche de dissolution au contact du Viséen et du Namurien, dans la région d'Andenne, considèrent comme très probable l'existence là aussi d'un karst pré-namurien donc, en l'occurrence, viséen (J. Thorez et W. van Leckwijck, 1967).

L'existence de phénomènes karstiques au Paléozoïque, durant le Frasnien et le Viséen, est certaine. Malheureusement, les deux cavités pouvant être de réelles grottes non fossiles (1), la Grotte d'Engis et les cavités du sondage de Wépion sont inaccessibles.

2. Les phénomènes karstiques au Secondaire et au Tertiaire.

L'ère secondaire a également connu des phénomènes karstiques. Un puits naturel, à Strépy-Braquegnies, a englouti du Crétacé moyen avant l'érosion de cette formation lors du Turonien (G. Lefèbvre et R. Legrand, 1964). De même les fameux iguanodons de Bernissart ont été enfouis au Crétacé inférieur dans une dépression partiellement comblée de dépôts d'âge wealdien comme eux.

Certes, on pourrait dire que le développement de tels "puits naturels" (comme il en apparaît encore de nos jours dans les mêmes régions) n'est pas nécessairement contemporain de l'activité de la dissolution. Ces puits se propagent en effet à l'intérieur du sol, de bas en haut. Ils

(1) Une cavité fossile est une cavité comblée par des sédiments.

constituent la propagation d'un effondrement localisé. On ne les observe que là où il existe en profondeur des roches solubles, et, malgré l'opinion de X. Stainier (1933) (1), il est maintenant acquis qu'ils sont rigoureusement liés à l'action de la dissolution (B. Aderca et J. Scheere, 1962 ; G. Lefebvre et R. Legrand, 1964 ; G. Lefebvre, R. Legrand et G. Mortelmans, 1967). Si l'existence du phénomène dépend de la dissolution, par contre les effondrements eux-mêmes pourraient se produire à des moments où la dissolution n'est pas active. Il s'agit là, en très grand, d'une forme d' "affaïssement-dissolution", dont les premières manifestations connues datent du Crétacé et dont les plus récentes sont actuelles.

Au sujet des Abannets de Nismes (région de Couvin), grands abîmes fossiles, exhumés par des exploitations de minerai de fer, E. van den Broeck, E. Martel et E. Rahir (1910) ont montré que leur remplissage a débuté au moins à l'Oligocène, peut-être à l'Eocène. Ces auteurs estiment cependant que le creusement des abîmes a dû débiter avant le Tertiaire (op. cit., pp. 247-258), tout en étant post-hercynien.

Plus récemment, L. Calembert (1945, 1959) a étudié les sédiments tertiaires, au moins partiellement d'âge oligocène, de grandes dépressions karstiques fossiles du Condroz. En montrant que les dépôts étaient contemporains d'actions de dissolution, il a donc mis en évidence que le Condroz a connu des phénomènes karstiques importants durant le Tertiaire.

Mademoiselle S. Leclercq (1925) considérait aussi l'abîme (non fossile) de Comblain-au-Pont comme tertiaire. R. Souchez (1963) pense de même pour diverses formes karstiques de la région de Couvin.

Le Secondaire et surtout le Tertiaire sont donc

(1) X. Stainier (1933) écrivait que l'on peut "considérer la supposition de l'existence de grandes cavités dans le Dinantien, sous les puits naturels du Hainaut, comme sans aucun fondement sérieux", et refusait d'y voir les effets de la dissolution.

riches en phénomènes karstiques, mais, ici encore, nous dénombrons des "puits naturels", des "poches de dissolution", des dolines, des ouvala, peut-être des poljés (R. Souchez, 1963), certainement des abîmes, mais nous ne connaissons pas de grotte assez importante, bien développée, fossile ou non, qui soit certainement tertiaire.

Il est très possible que certaines des grandes cavités connues aient été, au moins en partie, creusées au cours de cette époque, mais jusqu'ici il n'existe aucune preuve d'un tel fait. Il n'en est pas de même pour le Quaternaire.

3. Les phénomènes karstiques au Quaternaire.

Les phénomènes karstiques pléistocènes sont nombreux et divers. Ils se sont déroulés sous l'étroite dépendance de deux facteurs qui régissaient aussi l'évolution géomorphologique de surface. Le premier de ces facteurs est l'incision des vallées durant le Quaternaire, incision généralement vigoureuse dans la région étudiée, et qui s'est réalisée d'une façon discontinue, par une série de "cycles" d'érosion. Le second est l'existence de cycles climatiques - qui réglaient du reste le rythme des "cycles" d'érosion - au cours desquels la Belgique a vu le retour périodique de conditions périglaciaires. Bien que ces deux facteurs ne soient pas indépendants, pour la clarté de l'exposé, nous envisagerons séparément leurs effets directs respectifs sur la karstification.

a - l'incision des vallées et les terrasses :

B. Gèze (1961), dans un schéma théorique très clair, a montré que les creusements des grottes au Quaternaire ont dû s'opérer surtout, dans le cadre des cycles climatiques, vers la fin de chaque période (éventuellement, de chaque stade) glaciaire. Ceci concorde avec nos observations établissant

une étroite relation entre les niveaux de terrasses fluviales et certains niveaux de grottes (C. Ek, 1957, 1961). D'autre part, c'est surtout au Quaternaire supérieur que de tels niveaux s'observent. Nous attribuons principalement cela au fait que plus l'encaissement des vallées était fort, plus la circulation souterraine prenait le pas sur l'écoulement à l'air libre dans les vallons calcaires affluents des rivières (1).

De la sorte, au Karst tertiaire éparpillé sur les plateaux (cf. L. Calembert, 1945), présentant essentiellement, comme nous l'avons dit plus haut, des "poches de dissolution", des dolines, des ouvala, peut-être des poljés (R. Souchez, 1963), quelques abîmes, a succédé au Quaternaire un Karst linéaire, avec des phénomènes mieux développés en profondeur, des grottes étagées, limitées à la proximité immédiate des grandes vallées parce que liées à leur incision.

b - les effets des climats périglaciaires :

Un effet très important des climats périglaciaires qui ont régné à plusieurs reprises sur nos régions au cours du Quaternaire est l'important remblaiement qui s'est manifesté en de nombreux endroits, et particulièrement dans la plupart des vallons. Ce remblaiement, opéré surtout par la solifluxion (congélifluxion) et le ruissellement (J. Alexandre, 1957, 1960), a colmaté les dépressions préexistantes par du limon éolien et du matériel arraché aux versants. G. Seret et J. Lambion (1968) et R. Fourneau (1968) ont récemment mis en évidence le colmatage par ce matériel de dépressions occupées par des chantoirs (points d'enfouissement des eaux) préexistants. Les premiers de ces auteurs mettent l'accent

(1) Concernant ce problème, voir chapitre I, p. 26, et surtout Deuxième Partie, chapitre III, pp. 89 à 91.

sur l'interruption que ce phénomène a créée dans le drainage souterrain. Leurs observations portent sur une période froide qui est très probablement Würm, mais il semble logique d'admettre avec eux que le même mécanisme a dû jouer aux périodes froides antérieures. R. Fourneau (1968) considère également comme würmien le remblaiement de dépressions karstiques qu'il observe dans la région de Charleroi.

Cependant, R. Fourneau, comme nous (C. Ek, 1957, 1961), décrit un étagement de résurgences importantes qui, par leurs altitudes, ne peuvent être que quaternaires.

Il faut donc bien admettre soit que le colmatage n'était pas général, soit qu'il n'a pas subsisté de façon permanente. La seconde hypothèse rend mieux compte des faits car de très nets étagements de grottes quaternaires s'observent dans les régions où ont justement été décrits ces importants remplissages.

Or les grottes quaternaires présentent une caractéristique commune qui nous paraît importante : elles aboutissent à l'aval à de spacieuses résurgences au flanc des vallées, résurgences que l'on peut pénétrer sur plusieurs centaines de mètres parfois (à Tilff, à Remouchamps, à Hotton, ...). Ce sont de larges galeries, assez bien calibrées, qui diffèrent fort des secteurs karstiques amont, les secteurs proches des chantoirs. Là, on a affaire à des boyaux resserrés, présentant des élargissements souvent irréguliers, et généralement une portion du parcours entre les chantoirs et la galerie de résurgence est impénétrable.

Nous avons mis en évidence, dans la Première Partie, de ce travail, que les eaux exercent actuellement d'énergiques actions de dissolution dans les parties amont de leur cours souterrain, et que, dans le cours aval, par contre, ces actions sont inexistantes, en toutes saisons et par tous les

temps (1). L'érosion mécanique est également très faible dans les secteurs proches des résurgences car il n'y a guère de matériel solide transporté, si ce n'est de l'argile et parfois du limon.

Le type de climat régnant actuellement ne rend donc pas compte du creusement des résurgences. Certes, aux résurgences, les divers ruisselets affluents ont été réunis, la masse d'eau est importante. Une dissolution ou une érosion mécanique faible, multipliée par le débit, pourrait donc donner des effets plus importants que ceux dus à la forte agressivité de l'eau plus en amont, en des endroits dispersés, où partout le débit est faible.

D'autre part, le secteur aval est celui qui s'établit le premier, et sa stabilité est donc de plus longue durée que celle du cours amont, qui ne s'établit que par une série de captures successives.

Mais, comme nous venons de le dire, la dissolution dans les secteurs des résurgences n'est pas faible, mais nulle, et la corrasion actuelle nous paraît-bien que nous n'ayons pas de données quantitatives- négligeable, au vu des formes et des dépôts.

Le creusement des résurgences quaternaires et des conduits qui y débouchent est donc dû à des conditions toutes différentes des actuelles. S'agit-il de conditions plus chaudes ou plus froides, plus sèches ou plus humides ?

Nous pensons qu'il s'agit surtout de conditions nettement plus froides. En effet, la dissolution est actuellement nulle aux résurgences parce que les eaux ont déjà dissous une quantité de calcaire telle que la légère agressivité théorique subsistant parfois à certaines résurgences est beaucoup trop faible pour donner lieu à des réactions mesu-

(1) *Première Partie, chapitre III (p. 88 et suivantes).*

rables. Or, plus la température est basse, plus les réactions sont lentes. En particulier, elles sont à peu près deux fois plus lentes à 0°C qu'à 10°C. Il en résulte de façon évidente qu'en climat froid les actions de dissolution, s'exerçant plus progressivement, perdurent plus longtemps, et agissent donc plus loin (vers l'aval) qu'en climat tempéré.

Ceci donne à penser que les résurgences étagées au flanc des vallées et les conduits qui y débouchent sont des formes de climat froid.

D'autre part, la section transversale des galeries aboutissant aux résurgences quaternaires est beaucoup plus grande qu'une section compatible avec les débits qui s'écoulent actuellement aux étages inférieurs, et suppose donc des débits beaucoup plus forts, au moins temporairement. Si les résurgences présentaient une section haute mais étroite, on pourrait dire que cette section est due à l'incision progressive du cours d'eau souterrain et que la résurgence n'a jamais fonctionné à gueule bée. Mais au contraire, dans bien des cas (Grotte de Remouchamps, Grotte Sainte-Anne, Grotte du Père Noël) la section transversale du couloir est de forme massive, et le plafond se raccorde par un arc en plein cintre avec les parois. Ce n'est donc pas une forme polygénique, résultant de modifications successives de la section mais bien une forme simple, due à un écoulement qui, à certains moments, devait occuper une très grande partie et peut-être l'entièreté de la hauteur du conduit. Il faut donc faire appel à des débits beaucoup plus forts que les débits actuels.

Les résurgences quaternaires des flancs de vallée sont donc des formes de climat plus froid que l'actuel et ont connu, au moins temporairement, des débits beaucoup plus importants.

Elles datent donc des phases périglaciaires et non des phases interglaciaires.

Il est toutefois impossible actuellement de préciser si elles correspondent au début, au milieu ou à la fin des périodes froides, et nous ne savons pas non plus la relation chronologique entre le creusement des grandes résurgences et les périodes de colmatage évoquées récemment par G. Seret et J. Lambion (1968) et par R. Fourneau (1968). La poursuite de l'étude de cette question apporterait certainement une utile contribution à la question des influences climatiques sur le développement du karst.

4. Les phénomènes karstiques actuels.

Les manifestations actuelles de l'érosion karstique sont nombreuses.

C'est surtout au flanc même des vallées que le Quaternaire a laissé des traces imposantes. Actuellement, les phénomènes karstiques sont disséminés sur toute la superficie des terrains calcaires. La situation a donc quelque analogie à ce point de vue avec celle que nous avons décrite pour le Tertiaire, mais d'une part les phénomènes sont beaucoup plus modestes, et d'autre part les zones où les phénomènes karstiques sont les plus actifs actuellement sont situées en général à des altitudes nettement plus basses que celles des surfaces tertiaires.

La naissance de petites dolines, à proximité des axes hydrographiques surtout, est un phénomène fréquent. P. Macar (1946) en a cité des exemples et, récemment, M. Bay en a, dans un mémoire inédit (1), recensé un grand nombre dans le vallon de Beauregard, près d'Esneux. G. Lefèbvre et L. Legrand (1964) ont signalé l'actif développement actuel

(1) M. Bay : *Le vallon de Beauregard. Etude géomorphologique d'un synclinal calcaire. Mémoire de Licence en sciences géographiques, Université de Liège, 1968, 106 p. Polycopié. Déposé à l'Université de Liège.*

de "puits naturels" dans le Tournaisis et les mêmes auteurs en collaboration avec G. Mortelmans (1967) ont décrit les dolines qui se sont récemment ouvertes au Nord de Tournai, totalisant un volume en creux de 2.750 m^3 en quelques jours (1). Dans ces cas, il est évidemment impossible de préciser l'âge des dissolutions qui ont fini par provoquer de tels affaissements.

Dans les grottes mêmes, par contre, la morphologie peut donner des indices tangibles de la dissolution : nous avons décrit plus haut dans ce chapitre (p.103) le cas d'une dissolution de 4 à 6 mm de calcaire en 70 ans, observée sur un vaste pan de paroi à la Grotte de l'Adugeoir à Couvin, non loin du chantoir par où l' Eau Noire s'enfouit dans la Grotte.

La dissolution n'est pas le seul phénomène actuel dans les grottes : les profondes rigoles qui incisent les "chicanes" du Trou Bernard sont en pleine activité, transportent occasionnellement du sable et même des cailloux et sont donc probablement en cours d'approfondissement. Nous avons signalé d'autre part en de nombreux endroits sur nos cartes morphologiques des fissures fraîches dans des parois de grotte. La grande instabilité des éboulis témoigne qu'ils sont encore actifs.

Pour l'érosion mécanique par l'eau et pour les éboulis, nous n'avons aucune mesure. Par contre, en ce qui concerne la dissolution, il n'est que de retourner aux analyses de la Première Partie pour voir que l'eau dissout actuellement, sur les premières dizaines ou les premières centaines de mètres de son parcours sur calcaire une quantité importante de calcaire.

(1) *Des captages profonds ont, dans le Tournaisis, fortement rabattu la nappe phréatique, accélérant le drainage ; ils favorisent donc les actions karstiques, sans en être cependant la cause (voir les auteurs cités).*

Nous voudrions montrer ici une implication proprement morphologique des analyses.

La dissolution énergétique exercée par les cours d'eau au début de leur enfouissement dans les calcaires concorde avec un fait d'observation morphologique : parmi les phénomènes de surface du karst étudié, les chantoirs sont assurément ceux qui évoluent le plus vite - à l'échelle historique - et qui se modifient le plus souvent : la dissolution finit par provoquer des mises en porte-à-faux de masses calcaires qui s'écroulent, les chemins empruntés par l'eau se modifient, etc.

Le recul des chantoirs est d'observation courante dans la plupart des vallons calcaires. Il est sensible à l'échelle d'une vie humaine et l'ouvrage de van den Broeck, Martel et Rahir (1910) décrit plusieurs chantoirs qui sont aujourd'hui abandonnés au profit de pertes nouvelles situées un peu plus en amont.

Les zones de résurgences sont par contre, en général, des endroits dont la topographie ne subit pas, actuellement, de modification par des processus karstiques.

Ce fait est sous la dépendance étroite de la répartition et des mouvements du gaz carbonique, et surtout du gaz carbonique provenant des végétaux (Première Partie, p.167). Il est, à ce point de vue, lié au climat et à la végétation actuels.

CONCLUSIONS CONCERNANT L'AGE ET LA GENESE DES GROTTES.

Les cavités karstiques que l'on peut observer actuellement dans les calcaires paléozoïques de la Belgique ont un âge très variable : du Primaire au Quaternaire.

A part les "grottes" recoupées par le sondage de Wépion à 1000 m de profondeur, et qui sont donc inaccessibles, toutes les cavités connues d'âge Primaire et Secondaire sont fossiles. A partir du Tertiaire, jusqu'à l'époque actuelle, des phénomènes karstiques fossiles et non fossiles sont connus en plus grand nombre. Il y a donc, pourrait-on dire, des grottes de tous âges.

Certaines grottes ne peuvent pas être datées faute de repères chronologiques, surtout si elles ont un développement essentiellement vertical ; un argument de datation étant trouvé, le problème serait du reste ardu de savoir à quelle partie de la grotte étendre la datation. D'autres grottes "n'ont pas d'âge" car elles peuvent correspondre à un axe du drainage, ayant commencé à se développer il y a très longtemps, et s'allongeant, s'élargissant, ou se remblayant en fonction de conditions changeantes.

En ce qui concerne les parts respectives des conditions "vadoses" et "phréatiques", il est indubitable que les traces d'actions "vadoses" sont beaucoup plus nombreuses que les vestiges d'actions "phréatiques". Certes, des formes d'origine "phréatique" peuvent avoir été oblitérées par des actions ultérieures d'eaux courantes. Mais, comme déjà dit, il nous a paru nécessaire de nous limiter à interpréter les formes réellement observables, et il n'y a parmi celles-ci que de très rares traces d'actions certainement phréatiques, alors que les traces de rivières souterraines et de ruissellement sont abondantes.

En bien des lieux dans les calcaires étudiés, il n'y a en tout cas pas de surface de nappe aquifère au niveau des rivières ; les réserves d'eaux souterraines à Verviers, à Rochefort et à Han, sont plusieurs mètres plus bas que les rivières.

D'autre part nous avons montré que l'on peut observer des phénomènes "phréatiques" au-dessus du niveau normal des courants vadoses contemporains. Ceci n'est pas aberrant, mais est différent du schéma généralement proposé pour la relation vadose-phréatique.

Dans les calcaires dévoniens surtout se marque, entre les zones vadose et phréatique, une zone intermédiaire qui a ses caractères propres, du fait de la présence de courants importants vers la rivière.

La corrosion nous est apparue comme le facteur déterminant du creusement des grottes car si elle n'agit pas d'abord, les processus d'érosion mécanique ne peuvent pas se produire. Mais, au fur et à mesure que progresse le creusement, la corrosion perd de son importance au profit des processus physiques.

Enfin, nous sommes revenus, dans ce chapitre, à une question déjà traitée, d'une autre façon, dans la Première Partie : c'est le problème si controversé de la prééminence des climats chauds ou des climats froids dans le développement des karsts.

Beaucoup plus importante que la différence entre les hautes et les basses températures est la distinction entre la sécheresse et l'humidité.

Sans nullement mettre en doute l'intérêt de la controverse sur la différence entre climats chauds et climats froids, nous concluons donc que la quantité d'eau écoulée est, à conditions lithologiques et structurales égales, de loin le facteur le plus important de l'intensité des processus karstiques.

+

+

+

C O N C L U S I O N S G E N E R A L E S

=====

L'étude des phénomènes karstiques dans les calcaires paléozoïques de la Belgique apporte des résultats nouveaux dans deux domaines : celui de l'origine des formes karstiques souterraines, et celui des processus actuels de la dissolution.

Dans ces deux domaines, à côté des résultats généraux, nous sommes amené, sur le plan régional, à une différenciation en deux types ("dévonien" et "dinantien") des formes et des processus karstiques.

1. Conclusions concernant l'origine de la morphologie des cavités karstiques.

a - Les facteurs géologiques.

Dans la région étudiée, les grottes se localisent essentiellement dans les roches carbonatées pures, c'est-à-dire contenant plus de 90% de carbonates. Au-dessus de ce seuil, la plus ou moins grande pureté n'a guère d'influence sur la localisation et la grandeur des cavités. Cependant, lorsque le fer est suffisamment abondant pour donner naissance à une croûte limonitique continue, il immunise les bancs par cet enduit protecteur ; les minéraux argileux diffus dans la roche ralentissent la dissolution ; s'ils constituent au contraire des lits ou des lentilles, ils sont un facteur d'accélération de l'attaque (Deuxième Partie, I et II).

Dans les calcaires purs, et en l'absence d'influence de constituants étrangers (particulièrement ceux qui viennent d'être cités), la calcite cryptitique (< 4 microns) s'avère nettement plus sensible à la dissolution que la calcite grenue (observations de terrain et expériences de dissolution, Deuxième Partie, II).

Les joints schisteux, généralement peu abondants et assez minces, qui s'observent dans les formations étudiées sont un facteur favorable à la karstification : ils facilitent une certaine concentration de l'eau et, après développement des cavités, favorisent les écroulements (Deuxième Partie, I).

Sur un autre plan, les facteurs tectoniques jouent un grand rôle : la structure plissée de nos terrains paléozoïques fait que les formations calcaires affleurent sous forme de petits karsts barrés. De façon très générale, la structure a commandé la direction d'allongement des grottes (parallèle à la direction des bancs) mais non leur pente ni leur altitude (sauf pour de petits conduits). Les failles varisques jouent un rôle (passif) considérable, particulièrement dans la localisation des salles. Le levé de la carte géologique à 1/500 de la Grotte de Remouchamps a mis ce point en évidence d'une façon indubitable, et a permis l'étude des relations entre structure tectonique et morphologie karstique (Deuxième Partie, III).

La tectonique active (^{soulèvement l'ensemble} surrection de l'Ardenne) a contrôlé le niveau des couloirs de grottes quaternaires (Deuxième Partie, III).

b - Les processus.

Nos expériences de dissolution ont démontré, dans des conditions similaires aux conditions naturelles, que la corrosion, même dans des calcaires purs, va presque toujours de pair avec des départs de matières non dissoutes (donc, au sens large, une érosion mécanique), même en milieu calme. Ces expériences sont, à notre connaissance, les premières à avoir reconstitué, sous le contrôle de mesures rigoureuses, la dissolution des calcaires sous une pression de CO₂ que l'on peut trouver aisément dans la nature. Elles montrent aussi que le résidu de dissolution n'est pas nécessairement un résidu insoluble (Deuxième Partie, II).

Les expériences et les observations de terrain nous montrent que la corrosion doit agir pratiquement seule tout au début, pour faire démarrer le processus de karstification. Ce premier stade peut ne concerner qu'un départ de matière infime et être d'une durée très brève (négligeable à l'échelle géologique). Ensuite, les transports de matière non dissoute prennent de plus en plus d'importance. La morphologie des plus grandes cavités karstiques de Belgique (les grandes salles de grottes) montre surtout, actuellement, les résultats de l'érosion mécanique (Deuxième Partie, II ; Troisième Partie, I (cartes) et III).

La dissolution n'en reste pas moins le facteur déterminant et le facteur caractéristique de l'évolution géomorphologique des calcaires (Troisième Partie, III).

Les grottes belges montrent très peu de formes caractéristiques d'une origine phréatique. Sans nullement nier l'importance possible d'actions phréatiques dans les premiers stades du développement des cavités karstiques, nous concluons avec certitude que les dimensions et la morphologie actuelles des grottes sont, en Belgique, dues essentiellement à l'action d'eaux vadoses. La division hydrologique des massifs karstiques en trois zones de J. Cvijić (1918) et de B. Gèze (1958) (Troisième Partie, fig. 11) nous semble mieux adaptée, surtout en ce qui concerne les calcaires dévoniens, que la division *phréatique-vadoses*, en ce qu'elle fait une place spéciale à la zone la plus importante dans les calcaires dévoniens: celle de la circulation permanente des eaux karstiques en direction des rivières épigées principales (Troisième Partie, III).

Au point de vue proprement morphologique, la classification la plus objective et correspondant le mieux, dans la région étudiée, à deux catégories bien distinctes de conduits, est une division en conduits structuraux, déterminés par le pendage des bancs, par des diaclases, des failles, des

axes de plis, etc., et en conduits régularisés, correspondant aux "rivières souterraines" (Troisième Partie, II).

c - Les formes.

De nombreuses études avaient été avant celle-ci consacrées aux divers éléments de la morphologie des cavités. Mais les cartes morphogénétiques ici présentées montrent - pour la première fois, croyons-nous - les relations spatiales entre les éléments morphologiques, et fournissent des renseignements objectifs sur l'espace occupé et sur la forme du périmètre délimitant les éléments de la morphologie (Troisième Partie, I).

Le présent travail a en outre apporté des explications nouvelles de la genèse de deux types de "cloches" (formes en creux dans les parois des conduits karstiques), dont nous considérons qu'ils sont dus tous deux à la corrosion, mais non à la corrosion par mélange des eaux (Troisième Partie, II).

L'étendue qu'occupent, sur nos cartes morphogénétiques, les éboulements, explique que nous ayons discuté assez longuement leur place dans la spéléogénèse. Les cavités où se produisent des éboulements ne sont pas nécessairement pour la cause en voie de comblement. Les éboulements constituent actuellement un processus très actif dans les grottes de Belgique (Troisième Partie, II).

2. Conclusions concernant les processus actuels de dissolution.

a - La géochimie des eaux karstiques (Première Partie).

Le présent travail apporte la première connaissance quantitative d'ensemble de la géochimie des eaux karstiques superficielles et souterraines des calcaires paléozoïques de

la Belgique, concernant la quantité des matières dissoutes, la vitesse de mise en solution, et l'évolution, dans le temps et dans l'espace, de ces deux variables.

La notion d'agressivité de l'eau vis-à-vis du calcaire, telle qu'elle découle des diagrammes d'équilibre, s'est avérée peu significative : l'agressivité est une qualité potentielle qui, dans bien des cas, ne se traduit pas en "actes", et c'est d'autre part une qualité assez théorique puisqu'elle se réfère à la mise en solution d'un ou deux sels dans de l'eau distillée.

La dureté dépend essentiellement de la teneur de l'eau en gaz carbonique. Dans les échantillons analysés, cette teneur correspond très généralement à des pressions partielles de 10^{-3} à 10^{-2} atm. Les teneurs inférieures à 10^{-3} atm (l'atmosphère libre comprend $3 \cdot 10^{-4}$ atm de CO_2) sont très rares. Le CO_2 atmosphérique ne contribue donc directement que pour une part négligeable à la mise en solution du calcaire(1).

La quantité de calcaire dissous transporté par unité de temps par un cours d'eau croît et décroît très fortement en fonction directe des variations du débit liquide.

Le gaz carbonique présent dans les eaux karstiques n'est, en grande partie, pas entré sous terre par les ruisseaux (ou les rivières) : il pénètre sous le sol soit dans les eaux qui s'infiltrant de façon diffuse, soit directement par l'air du sol ; c'est dans les fissures et cavités souterraines que les eaux des ruisseaux trouvent une atmosphère riche en CO_2 et tendent à s'équilibrer avec elle. D'où l'importance des pressions partielles rencontrées par l'eau dans l'air des

(1) Dans des travaux antérieurs, nous avons montré la faiblesse de l'action dissolvante de l'eau dans certaines régions dépourvues ou presque dépourvues de végétation (C. Ek, 1964 et 1966, cf. Bibliographie de la Première Partie).

fissures et des grottes (1). L'accumulation sous terre du gaz carbonique est en quelque sorte un facteur auto-catalytique du karst : le CO_2 contribue (en se dissolvant dans l'eau) à l'agrandissement des cavités dans lesquelles il est piégé, et l'allongement ou l'élargissement des fissures permet à davantage de CO_2 de s'introduire sous terre.

Comment?

Tous ces résultats ne sont en rien liés aux circonstances régionales ou locales de notre étude, ni à une lithologie particulière, et il est très probable qu'ils s'étendent à l'ensemble des régions tempérées humides couvertes d'un sol et d'une végétation plus ou moins analogues à ceux de la région étudiée.

b - Les influences des conditions météorologiques sur la dissolution (Première Partie, V et VI).

Les variations à court terme (quelques jours, par exemple) des conditions météorologiques sont nettement prépondérantes sur le rythme des saisons comme facteurs physiques de la dissolution au point que, dans une large mesure, un même état géochimique des eaux peut se présenter dans n'importe quelle saison. Dans le détail, il faut évidemment tenir compte de ce que l'évaporation est, en surface, plus forte en été qu'en hiver, et en outre le gel et la neige peuvent induire temporairement des situations particulières.

D'une façon générale, on peut sans doute étendre à tous les karsts barrés notre conclusion sur la prépondérance dans la région étudiée du rôle de la cinétique sur celui des équilibres : c'est d'ailleurs cela qui nous a amené à ne pouvoir nulle part prendre en considération la théorie de Bögli, basée sur la rencontre d'eaux se trouvant

(1) Ces pressions partielles dans l'air des cavités souterraines ont été récemment l'objet de mesures en Belgique (C. Ek, F. Delcour et F. Weissen, 1968) et en Pologne (C. Ek, S. Gilewska, L. Kaszowski, L. Kobytecki, K. Oleksynowa et B. Oleksynówna, 1969 ; cf. bibliographie de la Première Partie).

"à l'équilibre" ; nous ne faisons cette réserve à la théorie de Bögli qu'en ce qui concerne la nature actuelle, et à l'exclusion des eaux qui circulent trop profondément sous la surface des aquifères pour que nous ayons pu les analyser.

c - Les grands facteurs climatiques.

Dans les traités qui en parlent, l'action du climat sur la géochimie des eaux karstiques est envisagée sous la forme d'une antithèse entre climats chauds et climats froids. B. Gèze (1961) par contre, insiste sur l'influence prépondérante de la quantité d'eau. C'est ce que nos mesures confirment à l'évidence.

Au cours de nos observations, l'amplitude de température a été de 15 à 18°C entre la moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid de chacune des années considérées. Certes, la température à l'intérieur des cavités souterraines restait comprise entre 8 et 10°C, et la flore est restée la même sauf quant à ses phases saisonnières de développement. Mais, si l'influence de la température était prépondérante, on observerait au moins dans les eaux de surface ses effets sur le coefficient de dissolution du CO₂ et sur les vitesses de réaction. De telles variations se sont avérées négligeables. Cette situation est due au fait que l'ordre de grandeur des variations de dureté qu'entraînent les effets physiques de la température (pour l'amplitude considérée) est bien inférieur à l'ordre de grandeur des variations provoquées par les autres facteurs : les précipitations et l'activité biologique du sol et de la végétation, activité dont l'effet principal qui nous concerne : la création et l'entretien d'une grande réserve de CO₂ sous le sol, se fait sentir tout au long de l'année (Première Partie, III et V).

Quant à l'influence des précipitations, des variations du débit du simple au centuple, par exemple, n'entraînent

guère que des variations - en sens inverse - de dureté de l'ordre du simple au triple. Le régime des cours d'eau a donc une influence directe considérable sur les variations de la quantité de sels dissous transportés (Première Partie, V).

L'intervention des acides organiques nous est apparue nettement moins importante que celle du gaz carbonique. Mais la plus grande partie de ce dernier - et de très loin - est directement d'origine organique. Il y a donc là une autre influence du climat, très importante, par l'intermédiaire de la végétation (voir ci-dessus, sub a).

On peut résumer comme suit la question de l'influence directe de la température sur la dissolution.

La teneur de l'eau en gaz carbonique est égale, lorsqu'il y a équilibre avec l'air, à la pression partielle du gaz carbonique dans l'air multipliée par un coefficient qui diminue lorsque la température s'élève :

$$[\text{CO}_2] = \frac{1}{D} P_{\text{CO}_2} \quad (7) \text{ p. 4, Première Partie}$$

Donc, disait-on, $[\text{CO}_2]$ diminue également lorsque la température s'élève.

Ce faisant, on négligeait les variations de P_{CO_2} dans l'air (du sol et du sous-sol, en l'occurrence). Nos² mesures et nos calculs montrent qu'en Belgique P_{CO_2} est en fait beaucoup plus variable que $\frac{1}{D}$ (1).

Nos conclusions concernant les processus de dissolution sont basées sur nos mesures faites en Belgique, et c'est donc pour les calcaires et dolomies de Belgique que nous les

(1) Des mesures, encore trop peu nombreuses, nous donnent d'ailleurs à penser que la variabilité de P_{CO_2} prend encore beaucoup plus d'importance lorsqu'on compare notre climat à certaines régions froides.

estimons assurées. Néanmoins, la plupart d'entre elles nous semblent applicables à tous les calcaires sous climat tempéré humide, se trouvant sous un sol et une végétation analogues.

3. Conclusions concernant l'existence de deux types de karsts différents en Belgique.

Sur le plan régional, le résultat principal de l'étude est de fournir une explication au fait que presque toutes les grandes grottes du pays se situent dans la bande de calcaires dévoniens qui sépare l'Ardenne du Condroz, alors que des affleurements aussi vastes de calcaires aussi purs abondent dans les synclinaux dinantiens du Condroz.

Cette question est traitée en quatre endroits de ce travail (1).

Les différences essentielles observées sont les suivantes :

- a) presque toutes les grandes grottes sont dans les calcaires dévoniens ;
- b) la morphologie des grottes est très différente dans les deux ensembles carbonatés : les "rivières souterraines" à pente régularisée, à section transversale calibrée sur d'assez longues distances sont pratiquement l'apanage des calcaires dévoniens, tandis que les calcaires dinantiens renferment de nombreuses grottes au profil longitudinal très irrégulier, comportant notamment de nombreuses apophyses en cul-de-sac ;
- c) l'attaque du calcaire est différente : bien que les pressions partielles les plus fortes de CO₂ aient été observées presque exclusivement dans les calcaires dinantiens,

(1) *Première Partie, chapitre IV : caractères des eaux ; Deuxième Partie, chapitre I : lithologie, et chapitre IV, B : influences structurales ; Troisième Partie, chapitre II, B : morphologie de surface et souterraine.*

la teneur en carbonates acquise par les eaux au cours de leur passage dans les formations calcaires mêmes est beaucoup plus élevée dans les calcaires mésodévoniens et néodévoniens que dans les calcaires dinantiens.

De ces trois différences, aucune jusqu'ici n'a été expliquée. Seule d'ailleurs la première avait été perçue.

Assez curieusement, les facteurs lithologiques intrinsèques aux formations calcaires concernées ne jouent dans ces différences qu'un rôle modeste. Les différences de pureté des calcaires n'y ont aucune part (Deuxième Partie, I et IV, B). L'existence de formations dolomitiques importantes dans le Dinantien a un rôle plus important, mais non primordial (ibid.). Les crinoïdes du Tournaisien ont aussi une action non négligeable, mais qui n'est pas la principale (Première Partie, IV, B). La plus grande fréquence des lits schisteux dans le Frasnien que dans le Viséen a une influence qui favorise, actuellement du moins, le Frasnien (Deuxième Partie, II, C, et IV, B).

Mais nous avons montré que la cause principale des trois différences réside dans la composition des formations qui dans tout le Condroz entourent les synclinaux de Calcaire Carbonifère. Les Psammites du Famennien supérieur comportent en effet, outre des bancs de calcaire et de dolomie, des grains de carbonates dans les bancs arénacés. Or les formations psammitiques, plus résistantes à l'érosion, dominant les synclinaux de calcaire dinantien qu'elles entourent, les alimentent en eau déjà dure et souvent incapable de dissoudre davantage. Au contraire les calcaires dévoniens sont surtout alimentés en eau par l'Ardenne, d'où leur arrivent des eaux douces, donc susceptibles d'une grande agressivité (Première Partie, IV, A).

Si la dureté est moins élevée à la sortie des formations carbonatées dévoniennes c'est pour deux raisons : non seulement les eaux qui y entrent sont plus douces, mais

aussi elles y effectuent un trajet plus court. Ceci explique que si la dureté des eaux est moins au sortir du Dévonien moyen, le coefficient de saturation surtout est nettement plus bas que dans les eaux quittant le Calcaire Carbonifère. Les eaux étant plus éloignées de l'équilibre, les réactions sont plus rapides, et on peut donc penser, puisque le déséquilibre persiste en général jusqu'aux résurgences des calcaires dévoniens, que les processus karstiques y sont actuellement plus intenses que dans les calcaires dinantiens (Première Partie, IV, B).

Autre motif de différenciation des deux séries calcaires, le débit et la dureté se sont avérés beaucoup plus variables (en fonction des conditions météorologiques) dans la bande calcaire qui borde l'Ardenne que dans les formations de Calcaire Carbonifère. Les crues sont un facteur de dissolution intense, d'abord du fait qu'un fort débit entraîne une grande quantité de sels dissous, ensuite parce que la turbulence provoquée par la crue chasse des cavités des réserves d'eau élaborée qui sont remplacées par une eau "fraîche" plus agressive. De plus, lors des crues, outre les matières dissoutes, des sédiments sont emportés en suspension, et notamment les résidus de dissolution et les dépôts fins divers qui, en l'absence de crues peuvent colmater des conduits ou à tout le moins les tapisser d'un enduit fin qui ralentit fortement la dissolution.

La plus grande variabilité des débits dans les formations calcaires dévoniennes différencie une fois de plus leurs eaux de celles des calcaires dinantiens.

Cette variabilité des débits provient en partie des différences morphologiques entre les grottes des calcaires dévoniens et celles du Dinantien ; cette différence est particulièrement nette entre les synclinaux carbonifères du Bassin de Dinant et la bande calcaire dévoniennne adossée à l'Ardenne. Les synclinaux dinantiens constituent en effet le

plus souvent d'amples dépressions, au sein desquelles se fait un drainage longitudinal s'effectuant très lentement, tandis que le palier que constitue la bande calcaire mésodévonienne et néodévonienne qui borde l'Ardenne est drainé par des courants plus rapides qui le traversent en général transversalement (Troisième Partie, II B).

On voit la grande interdépendance des facteurs structuraux, lithologiques et géomorphologiques qui contribuent conjointement à différencier deux types de karsts se développant respectivement dans les formations calcaires dévoniennes et dinantiennes.

+

+

+

- ADERCA B. et SCHEERE J. - 1962 - Un puits naturel à remplissage de conglomérats à ciment dolomitique aux charbonnages "Réunis" de Charleroi.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 71, 149-161.
- ALEXANDRE J. - 1957 - Le modelé quaternaire de l'Ardenne centrale.
Annales de la Société géologique de Belgique : 81, M 214-327.
- ALEXANDRE J. - 1960 - La succession probable des phases morphologiques au cours d'un cycle climatique quaternaire en Haute Belgique.
pp.63-72 in : Le Périglaciaire préwurmien, Colloque international tenu à l'Université de Liège. Liège, 197 p.
- BIROT P. - 1966 - Le relief calcaire (avec la collaboration de J. Roglic, J.M. Nicot et J.J. Dufaure), polycopié, 238 p. C.D.U., Paris.
- BÖGLI A. - 1960 a - Kalklösung und Karrenbildung.
Zeitschrift für Geomorphologie : Supplementband 2, 4-21.
- BÖGLI A. - 1960 b - Les phases de la dissolution du calcaire et leur importance pour les problèmes karstiques.
Rassegna Speleologica Italiana : 12, 167-180.
- BÖGLI A. - 1964 - Mischungskorrosion, ein Beitrag zum Verkarstungsproblem.
Erdkunde : 18, 83-92.
- BRETZ J.H. - 1942 - Vadose and phreatic features of limestone caverns.
Journal of Geology : 50, 675-811.
- BROD L.G. jr - 1964 - Artesian origin of fissure caves in Missouri.
Bulletin of the National Speleological Society : 26, 83-114.
- CALEMBERT L. - 1945 - Les gisements de terres plastiques et réfractaires d'Ardenne et du Condroz.
204 p., Vaillant-Carmanne, Liège.

- CALEMBERT L. - 1959 - Contribution à l'étude du paléokarst en Belgique.
Acad. roy. de Belgique, Bulletin de la Classe des Sciences : 5ème série, 45, 15-37.
- CHEVALIER P. - 1944 - Distinction morphologique entre deux types d'érosion souterraine.
Revue de Géographie alpine : 32, 475-492.
- CHEVALIER P. - 1947 - Sur la circulation des eaux dans le réseau souterrain de la Dent de Crolles.
Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris) : 224, 1210-1212.
- CORBEL J. - 1957 - Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe et de quelques régions de comparaison.
Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon, mémoires et documents, n° 12, 542 p. Lyon.
- COSYNS G. - 1907 - Essai d'interprétation chimique de l'altération des schistes et des calcaires.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 21, 325-346.
- CULLINGFORD C.H.D. (éd.) - 1953 - British caving : an introduction to speleology,
592 p., London.
- CVIJIĆ J. - 1918 - Hydrographie souterraine et évolution du karst.
Recueil des Travaux de l'Institut de Géographie alpine : 6, 1-56.
- CVIJIĆ J. - 1960 - La géographie des terrains calcaires.
Monographies de l'Académie serbe des Sciences et des Arts, tome CCCXLI, 212 p. Belgrade.
- DAMIEAN G. - 1956 - La sédimentation depuis la transgression dévonienne jusqu'au Viséen dans la région de Huccorgne (flanc nord du synclinal de Namur).
Annales de la Société géologique de Belgique : 79, B 365-382.
- DAUBREE A. - 1887 - Les eaux souterraines aux époques anciennes.
Dunod, Paris.
- DAUBREE A. - 1887 - Les eaux souterraines à l'époque actuelle.
2 vol. Dunod, Paris.

- DAVIS W.M. - 1930 - Origin of limestone caverns.
Bulletin of the Geological Society of America : 41, 475-628.
- DOLLFUS G. - 1904 - L'eau en Beauce.
Bulletin de la Carte géologique de France : 16.
- DROPPA A. - 1966 - Untersuchungen der Parallelität von Flussterrassen mit horizontalen Höhlen.
Troisième Congrès international de Spéléologie, Vienne (1961) : 5, 79-81.
- DUPONT E. - 1890 - Sur l'hydrographie souterraine dans les terrains calcaires.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 4, 201-206.
- DUPONT Ed.-1893 - Les phénomènes généraux des cavernes en terrains calcaireux et la circulation souterraine des eaux dans la région Han-Rochefort.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 8, Mém. 190-297.
- EK C. - 1957 - Les terrasses de l'Ourthe et de l'Amblève inférieures.
Annales de la Société géologique de Belgique : 80, B 333-353.
- EK C. - 1961 - Conduits souterrains en relation avec les terrasses fluviales.
Annales de la Société géologique de Belgique : 84, B 313-340.
- EK C. - 1962 - La genèse d'une cavité polycyclique : la Grotte Sainte Anne, à Tilff.
Rassegna Speleologica Italiana : 14, 3-11.
- EK C. - 1964 - Les phases successives de l'évolution de certains conduits vadoses.
Troisième Congrès international de Spéléologie, Vienne (1961) : 2, 49-52.
- EK C. - 1966 - Une relation entre des grottes à développement horizontal et les terrasses fluviales.
Troisième Congrès international de Spéléologie, Vienne (1961) : 5, 83-86.
- FENELON P. (sous la dir. de -) - 1968 - Phénomènes karstiques.
Mémoires et Documents du C.N.R.S., vol. 4, 392 p. Paris.

- FLAMACHE A. - 1895 - Sur la formation des grottes et des vallées souterraines.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 9, 355-367.
- FOURNEAU R. - 1968 - Les phénomènes karstiques de la région Marcinelle-Loverval.
Annales de la Société géologique de Belgique : 91, 387-392.
- FRAIPONT Ch. et LECLERCQ S. - 1925 - Compte rendu de la Session extraordinaire de la Société géologique de Belgique, tenue à Liège du 2 au 4 août 1925.
Annales de la Société géologique de Belgique : 48, B 323-349.
- GARDNER J.H. - 1932 - Origin and development of limestone caverns.
Bulletin of the Geological Society of America : 46, 1255-1274.
- GEZE B. - 1937 - Étude hydrogéologique et morphologique du Massif central.
Annales de l'Institut national agronomique : 29.
- GEZE B. - 1953 - La genèse des gouffres.
Premier Congrès international de Spéléologie, Paris : 2, 11-23.
- GEZE B. - 1961 - L'évolution karstique dans ses rapports avec les alternances climatiques quaternaires, pp.111-126 et 179-182 des Actes du Symposium International de Varenna sur les remplissages naturels des grottes, vol. I, Como, 190 p.
- GEZE B. - 1964 - Sur les profils normaux des entrées de grottes et des galeries simples.
Spelunca Mémoires : 4, 24-26.
- GEZE B. - 1965 a - Les conditions hydrogéologiques des roches calcaires.
Chronique d'Hydrogéologie, B.R.G.M. : 7, 9-39.
- GEZE B. - 1965 b - La spéléologie scientifique.
Le Seuil, Paris, 190 p.
- GOGUEL J. - 1953 - Données techniques sur l'effondrement des cavités souterraines.
Annales de Spéléologie : 8, 1-8.

- GRAULICH J.-M. - 1954 - Une grotte traversée par le sondage de Wépion à 1000 m de profondeur. Bulletin de la Société belge de Géologie : 63, 113-118.
- GRAULICH J.-M. - 1963 - La phase sudète de l'orogène varisque dans le synclinorium de Namur à l'Est du Samson. Bulletin de la Société belge de Géologie : 71, 181-199.
- GRUND A. - 1903 - Die Karsthydrographie. Penck's geographische Abhandlungen : 8, 200 p.
- HARZE E. - 1904 - Une grotte dans le Calcaire Carbonifère, à plus de 200 mètres de profondeur. Annales de la Société géologique de Belgique : 31, M 161-166.
- HEDGES J. - 1965 - Artesian origin of fissure caves in Missouri : discussion. Bulletin of the National Speleological Society : 27, 104-105.
- KYRLE G. - 1923 - Grundriss der theoretischen Speläologie. 353 p. Wien.
- LECLERCQ Suzanne - 1925 - Sur un poudingue de grotte. Annales de la Société géologique de Belgique : 48, B 314-318.
- LEFEBVRE G. et LEGRAND R. - 1964 - Les puits naturels du Tournaisis. Bulletin de la Société belge de Géologie : 73, 66-80.
- LEFEBVRE G., LEGRAND R. et MORTELMANS G. - 1967 - Essaim de puits naturels à Kain. Bulletin de la Société belge de Géologie : 76, 63-66.
- LOHEST M. et FOURMARIER P. - 1903 - L'évolution géographique des régions calcaires. Annales de la Société géologique de Belgique : 30, M 1-30.
- MACAR P. - 1946 - Phénomènes géologiques actuels, causes de dommages en nos régions. Annales de la Société géologique de Belgique : 69, B 226-249.

- MARTEL E.A. - 1890 - Les Cévennes.
400 p. Delagrave, Paris.
- MARTEL E.A. - 1908 - L'évolution souterraine.
388 p. Flammarion, Paris.
- MARTEL E.A. - 1921 - Nouveau traité des eaux souterraines.
838 p. Doin, Paris.
- MEINZER O.E. - 1923 - Outline of groundwater hydrology, with definitions.
71 p. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper n° 494. Washington.
- MUGNIER C. - 1961 - Distinction entre trois types d'éboullis cryoclastiques rencontrés dans les cavernes. Symposium international de Spéléologie, Varenna (1960) : 2, 1-4. Como.
- d'OMALIUS d'HALLOY J.J. - 1843 - Précis élémentaire de géologie.
790 p. Paris.
- PIPER A.M. - 1932 - Ground water in north central Tennessee. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper n° 640. Washington.
- PIRLET H. - 1967 - Mouvement épeirogénique au sein du Viséen inférieur dans la partie centrale du synclinorium de Namur.
Annales de la Société géologique de Belgique : 90, B 255-260.
- RENAULT Ph. - 1957 - Sur deux processus d'effondrement karstique.
Annales de Spéléologie : 12, 19-46.
- RENAULT Ph. - 1963 - Etude granulométrique et morphométrique de blocs façonnés sans mouvements par une circulation aquifère.
Annales de Spéléologie : 18, 361-376.
- RENAULT Ph. - 1967 - Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse.
Annales de Spéléologie : 22, 5-17 et (suite) 209-267.
- RENAULT Ph. - 1968 - Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse (suite).
Annales de Spéléologie : 23, 259-307 et 529-596.

- ROQUES H. - 1963 - Sur la répartition du CO₂ dans les karsts (deuxième mémoire).
Annales de Spéléologie : 18, 141-184.
- ROQUES H. - 1968 - Chimie des carbonates et hydrologie karstique,
pp.113-141 in : Phénomènes karstiques, sous la dir. de P. Fénelon, Mémoires et documents du C.N.R.S., vol. 4, 392 p., Paris.
- SERET G. et LAMBION J. - 1968 - Erosion et remblaiement quaternaires dans le Vallon des Chantoires (Louveigné-Remouchamps).
Annales de la Société géologique de Belgique : 91, 377-385.
- SOUCHEZ R. - 1963 - Le relief de la région de Couvin-Nismes en tant que paléokarst de climat chaud et humide.
Bulletin de la Société belge d'Etudes géographiques : 32, 269-280.
- STAINIER X. - 1933 - Considérations sur les puits naturels du Houiller du Hainaut.
Annales de la Société scientifique de Bruxelles : 53, 79-97.
- SWINNERTON A.C. - 1932 - Origin of limestone caves.
Bulletin of the Geological Society of America : 43, 663-694.
- TELL L. - 1968 - Erosion-corrosion.
Actes du IVème Congrès international de Spéléologie en Yougoslavie (1965).
Ljubljana : 3, 233-234.
- THOREZ J. et van LECKWIJCK W. - 1967 - Minéralogie des argiles dans une "poche de dissolution" au contact du Viséen et du Namurien dans la région d'Andenne.
Annales de la Société géologique de Belgique : 90, B 381-394.
- TROMBE F. - 1947 - Sur la température des eaux souterraines dans les massifs calcaires. Cas particulier du réseau hydrologique de la Henne-morte (Haute-Garonne).
Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris) : 225, 1355-1357.
- TROMBE F. - 1952 - Traité de Spéléologie.
376 p. Payot, Paris.

- VANDENBOSCH A. - 1926 - L'abîme de Comblain-au-Pont.
Société belge d'Etudes géologiques et
archéologiques Les Chercheurs de la Wallonie :
8, 1-18.
- VAN DEN BROECK E. - 1895 - Réponse à la note critique de
M. Flamache sur la formation des grottes et
des vallées souterraines.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 9,
368-414.
- VAN DEN BROECK E., MARTEL E. et RAHIR E. - 1910 - Les cavernes
et les rivières souterraines de la Belgique.
2 tomes. Bruxelles, 1592 + 92 + LXVI p.
- VANDERSLEYEN P. - s.d. (vers 1961) - Atlas des grottes de
Belgique.
Première Partie. 45 planches. Centre national
de Recherches scientifiques souterraines, Liège.
- VANDERSLEYEN P. - 1967 - (avec la collaboration de M. Coen,
H. Gevaerts et J. Leclercq) - Atlas des grottes
de Belgique.
Deuxième Partie. 50 planches. Institut royal
des Sciences naturelles de Belgique. Documents
de travail, n° 5, Bruxelles.
- VERSTRAETEN Th. - 1895 - Hydrologie des bassins rocheux de
la Belgique.
Bulletin de la Société belge de Géologie : 9,
241-259.
- WARWICK G.T. - 1953 - The origin of limestone caves,
pp.55-82, in : British Caving, C.H.D.
Cullingford ed., 592 p. London.
- WILFORD C.E. - 1966 - Bell holes in Sarawak caves.
Bulletin of the National Speleological
Society : 28, 179-181.

T A B L E D E S M A T I E R E S
=====

Pages

TROISIEME PARTIE

Morphologie et Genèse des Grottes

<u>INTRODUCTION</u>	I
Plan de l'exposé	II
<u>Chapitre I</u>	
La morphologie de quelques grottes	
Sommaire	1
A. Le but et la méthode	2
La légende des cartes	3
B. Onze exemples de grottes	6
1. Le Trou Bernard, à Maillen	6
2. Le Trou du Renard, à Marche	10
3. La Grotte de Bellevaux, à Andrimont	13
4. Le Trou Bozard, à Sprimont	16
5. Le Trotti aux Fosses, à Marche	18
6. La Grotte de la Fontaine de Rivière, à Hamoir	21
7. La Grotte du Pont, à Esneux	24
8. La Grotte et l'Abîme de Comblain-au-Pont	28
9. La Grotte de Remouchamps	32
10. La Grotte de Rochefort	36
11. La Grotte du Père Noël, à Wavreille	40
C. En guise de première conclusion : critique de la méthode cartographique présentée	45
1. Originalité, utilité	45
2. Caractère synthétique	45
3. Le problème du tracé des limites	47
4. Le problème de la notion de genèse	47
5. Les résultats des premiers levés	48
<u>Chapitre II</u>	
Les types de morphologie karstique souterraine	
Sommaire	50
A. Les éléments de la morphologie	51
1. Les formes dues à l'action de l'eau	51
2. Les effondrements	72
3. Erosion et sédimentation	83

B. Différences morphologiques entre les cavités des formations calcaires dévoniennes et celles des formations dinantiennes	84
1. Rappel des différences structurales et hydrologiques déjà exposées	84
2. Nouvelles différences dans les facteurs de la karstification	85
3. Différences dans la morphologie des grottes	86

Chapitre III

Spéléogenèse

Sommaire	93
A. Les façons de poser le problème	94
B. La part de la dissolution et celle de l'érosion mécanique	100
1. Les domaines d'action respectifs de ces deux catégories de processus	100
2. Importance spatiale et localisation respectives	101
3. Ordre de succession des phénomènes	103
C. Origine phréatique, origine vadose	106
1. Signification des deux termes et délimitation des deux domaines	106
2. La non-équivalence entre "eau phréatique" et "eau calme"	110
3. Importance spatiale et localisation des phénomènes phréatiques et vadoses	114
D. Les âges des grottes. La karstification actuelle	119
1. Les phénomènes karstiques paléozoïques	119
2. Les phénomènes karstiques au Secondaire et au Tertiaire	121
3. Les phénomènes karstiques au Quaternaire	123
4. Les phénomènes karstiques actuels	128
Conclusions concernant l'âge et la genèse des grottes	131
Conclusions générales	134
1. Conclusions concernant l'origine de la morphologie des cavités karstiques	134
2. Conclusions concernant les processus actuels de la dissolution	137
3. Conclusions concernant l'existence de deux types de karsts différents en Belgique	141
Bibliographie	145

La présentation des figures et des cartes est due à

M. J. Pontus
maître-technicien à l'Université

Le coloriage à l'aquarelle est de

Madame A. Laurant
(cartes morphogénétiques)

Madame M. Bay
(carte géologique)

Madame J. Wilmet
(cartes de couverture)

Les photographies sont de

M. J. Courtois
et l'auteur

Elles ont été imprimées par

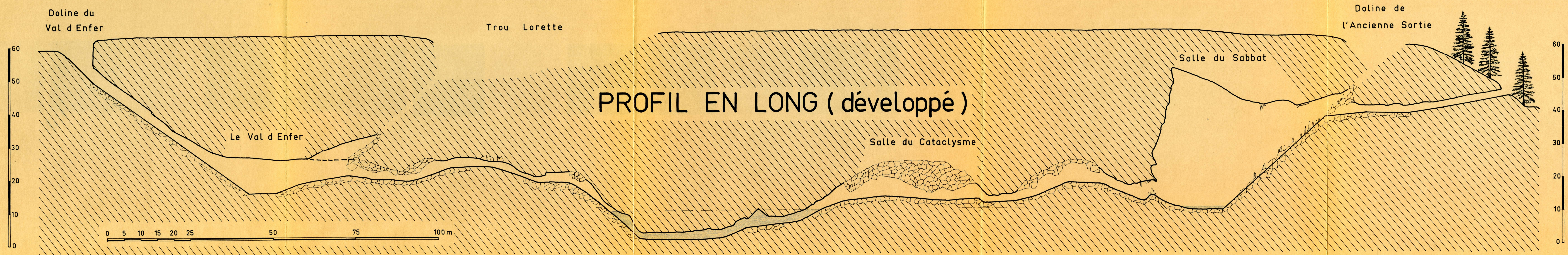
M. N. Simon
technicien à l'Université

Le texte a été dactylographié par

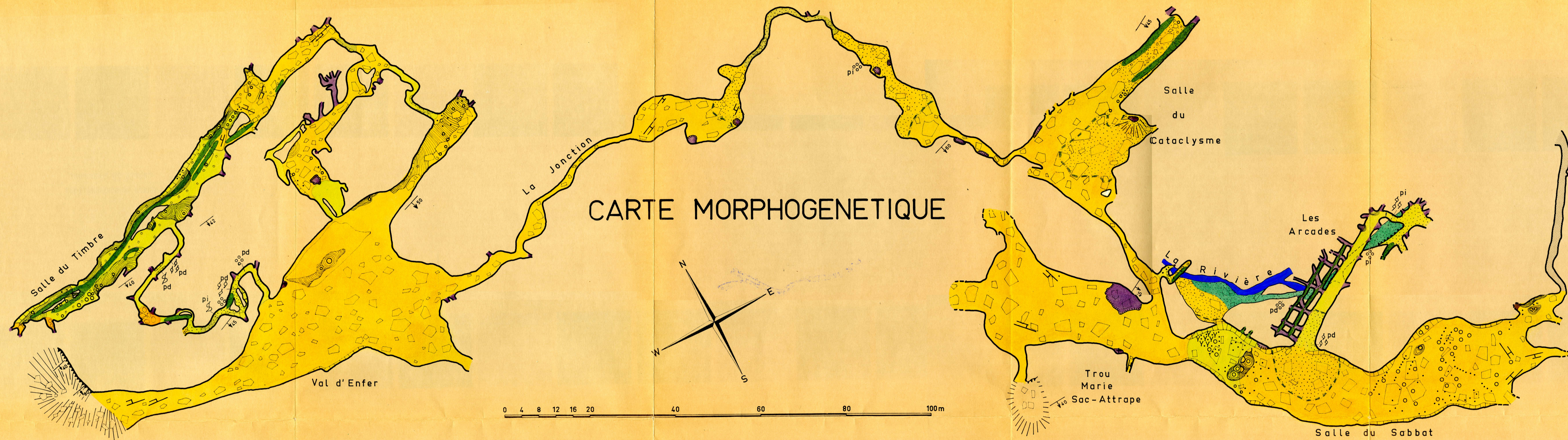
Madame Ph. Coenen

et les tableaux des annexes par

Madame J. Lezan de Malizard



GROTTE DE ROCHEFORT



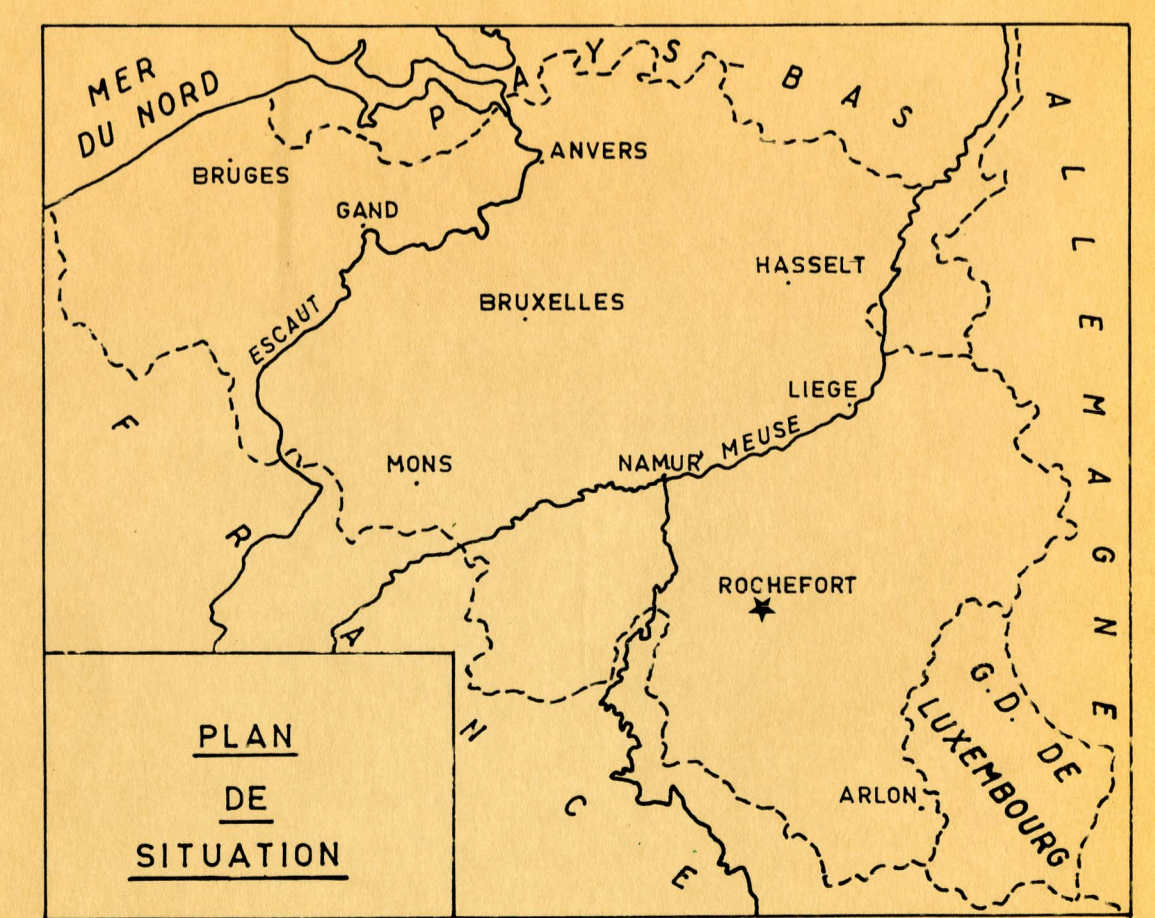
TYPE DE CREUSEMENT à l'origine de la forme observée

- A - ACTION DE L'EAU.**
- Creusement par l'eau stagnante ou en mouvement très lent.
 - Creusement par cours d'eau en conduite forcée ("tube").
 - Siphon.
 - Autres types de creusement par l'eau (eaux de ruissellement, de condensation, courants multiples ou indéterminés).
 - Creusement par eau courante dans fissures, puits et cheminées: mouvements à nette prédominance verticale.
 - Vestiges de chenaux anastomosés. Penditifs rocheux.
 - Cupules. (pd-pi: au plafond, sur paroi).

- B - ACTION DE LA GRAVITE.**
- Effondrement provoqué par rupture mécanique.
 - Effondrement provoqué par dissolution (de fissures, etc...).
 - Doline en surface.
 - Fissures actuelles importantes (cassures fraîches).
- C - ACTION DE L'HOMME.**
- Creusement anthropique: au maximum = galerie artificielle.

- A - DEPOTS PHYSIQUES**
- Eboulis de blocs anguleux.
 - Eboulis de blocs émoussés par corrosion.
 - Cailloux roulés.
 - Limon et argile.
 - Vermiculatons argileuses = argiles et parfois limon de plafond et de parois.

- DEPOTS**
- B - DEPOTS PHYSICO-CHIMIQUES**
- Stalactites.
 - Stalagmites.
 - Plancher stalagmitique même en forte pente.
 - Coulée de paroi ou de plafond; draperie.
 - Gours.



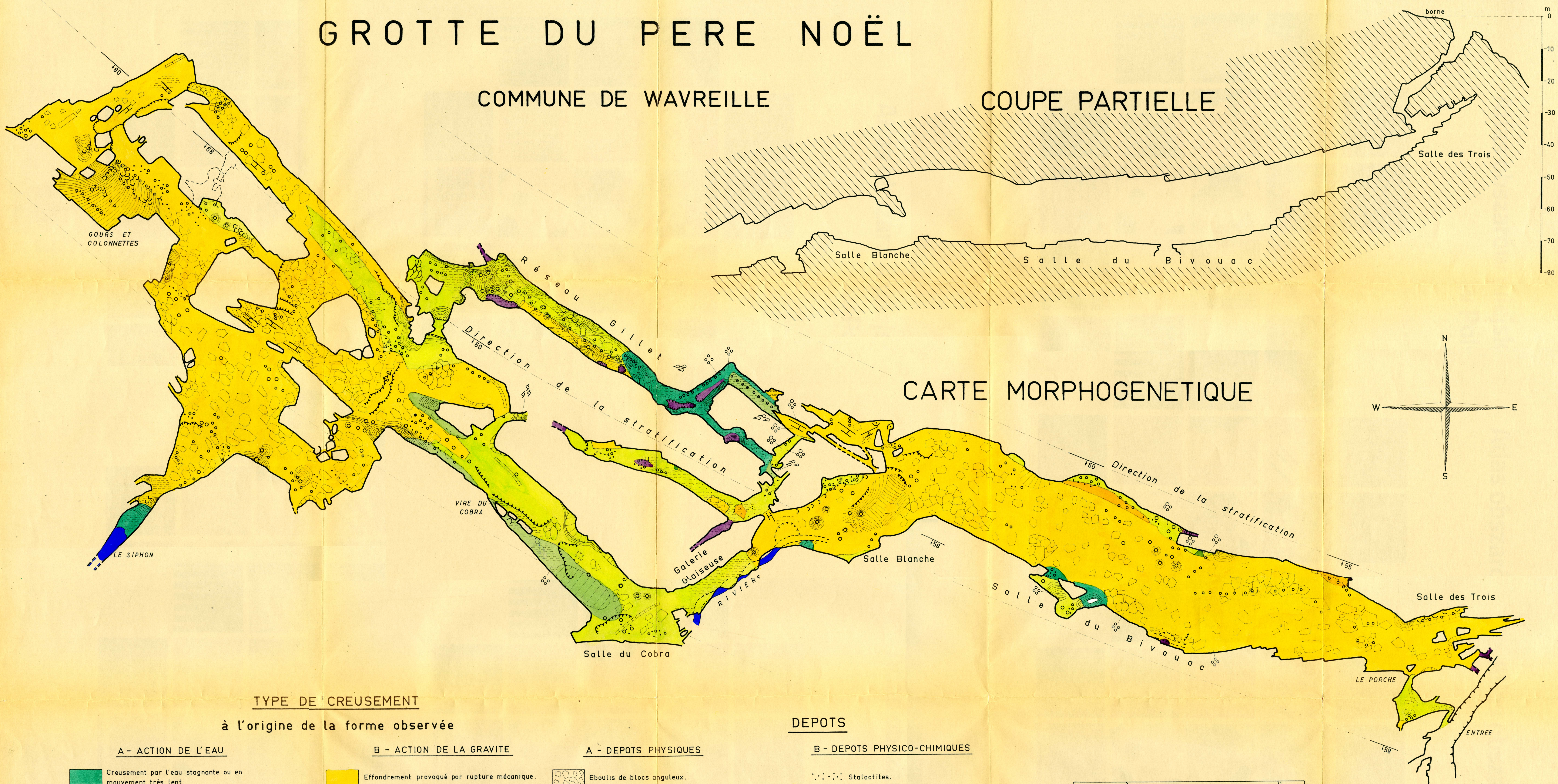
- Limite de l'inondation de 1958.
- Direction et pendage des couches.

Contours du plan d'après un levé de l'équipe AGOLINA (1950).

GROTTE DU PERE NOËL

COMMUNE DE WAVREILLE

COUPE PARTIELLE



TYPE DE CREUSEMENT

à l'origine de la forme observée

A - ACTION DE L'EAU

- Creusement par l'eau stagnante ou en mouvement très lent.
- Creusement par cours d'eau en conduite forcée ("tube").
- Creusement par cours d'eau (rivière souterraine).
- Autres types de creusement par l'eau (eaux de ruissellement, de condensation, courant multiples ou indéterminés).
- Creusement par eau courante dans fissures: puits: mouvements à nette prédominance verticale.
- Pendentifs rocheux.
- Cupules régulières. Cupules irrégulières.
- Lapiés en cannelures.
- Coups de gouge.

B - ACTION DE LA GRAVITE

- Effondrement provoqué par rupture mécanique.
- Effondrement provoqué par dissolution (de fissures, etc...).
- Effondrement du plancher: affaissement, tassement.
- Fissures actuelles importantes (cassures fraîches).

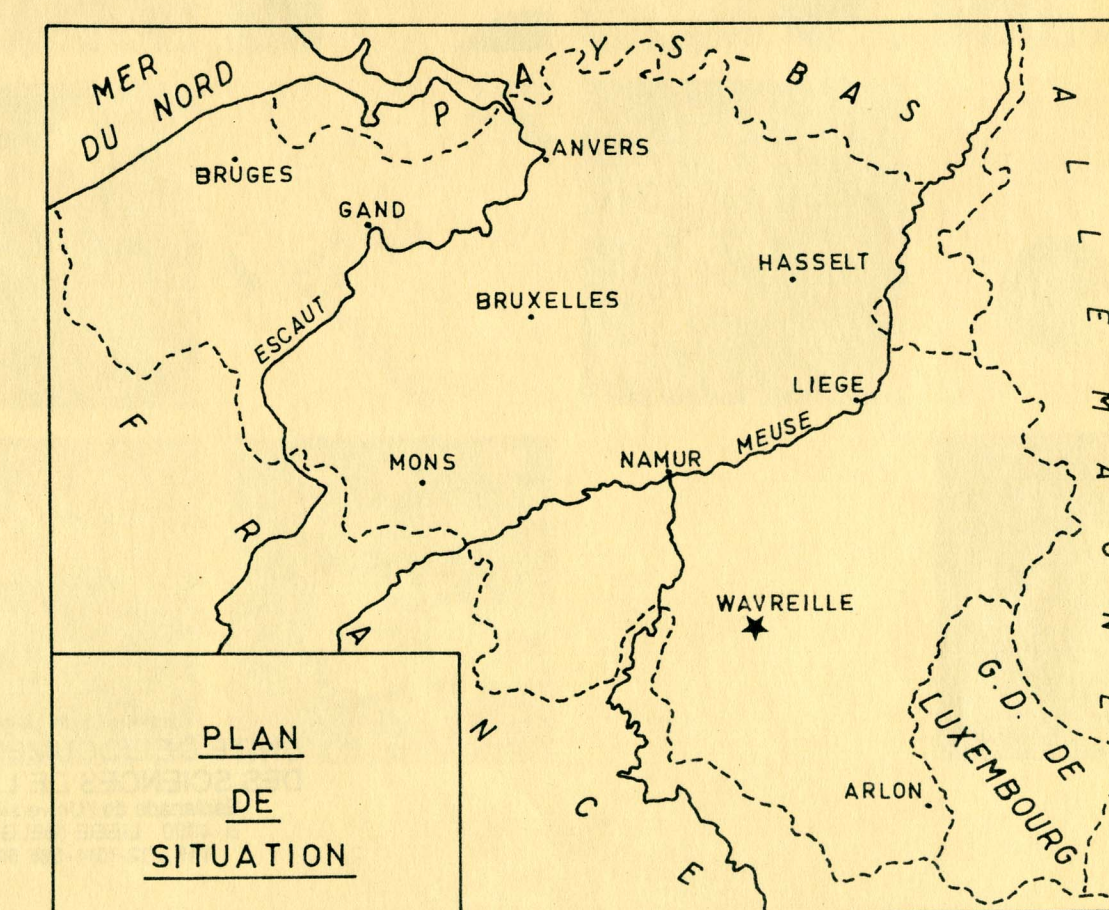
A - DEPOTS PHYSIQUES

- Eboulis de blocs anguleux.
- Eboulis de blocs émoussés par corrosion.
- Cailloux roulés.
- Sable.
- Limon et argile.

DEPOTS

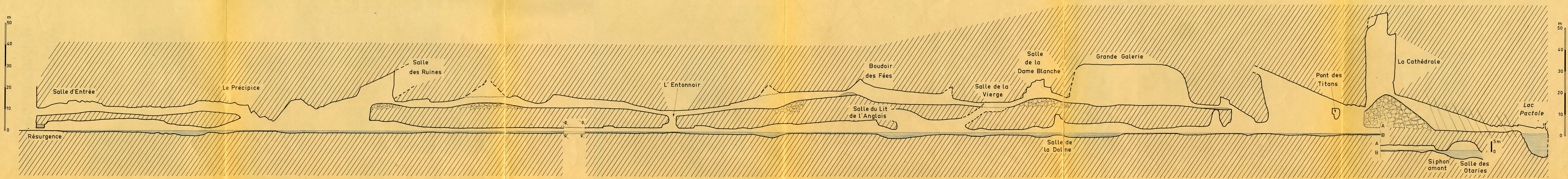
B - DEPOTS PHYSICO-CIMIQUES

- Stalactites.
- Stalagmites; stalagmite sous stalactite.
- Plancher stalagmitique même en forte pente.
- Coulée de paroi ou de plafond; draperie.
- Gours.



Contours de la carte et de la coupe d'après un levé de P.VANDERSLEYEN. 1967.

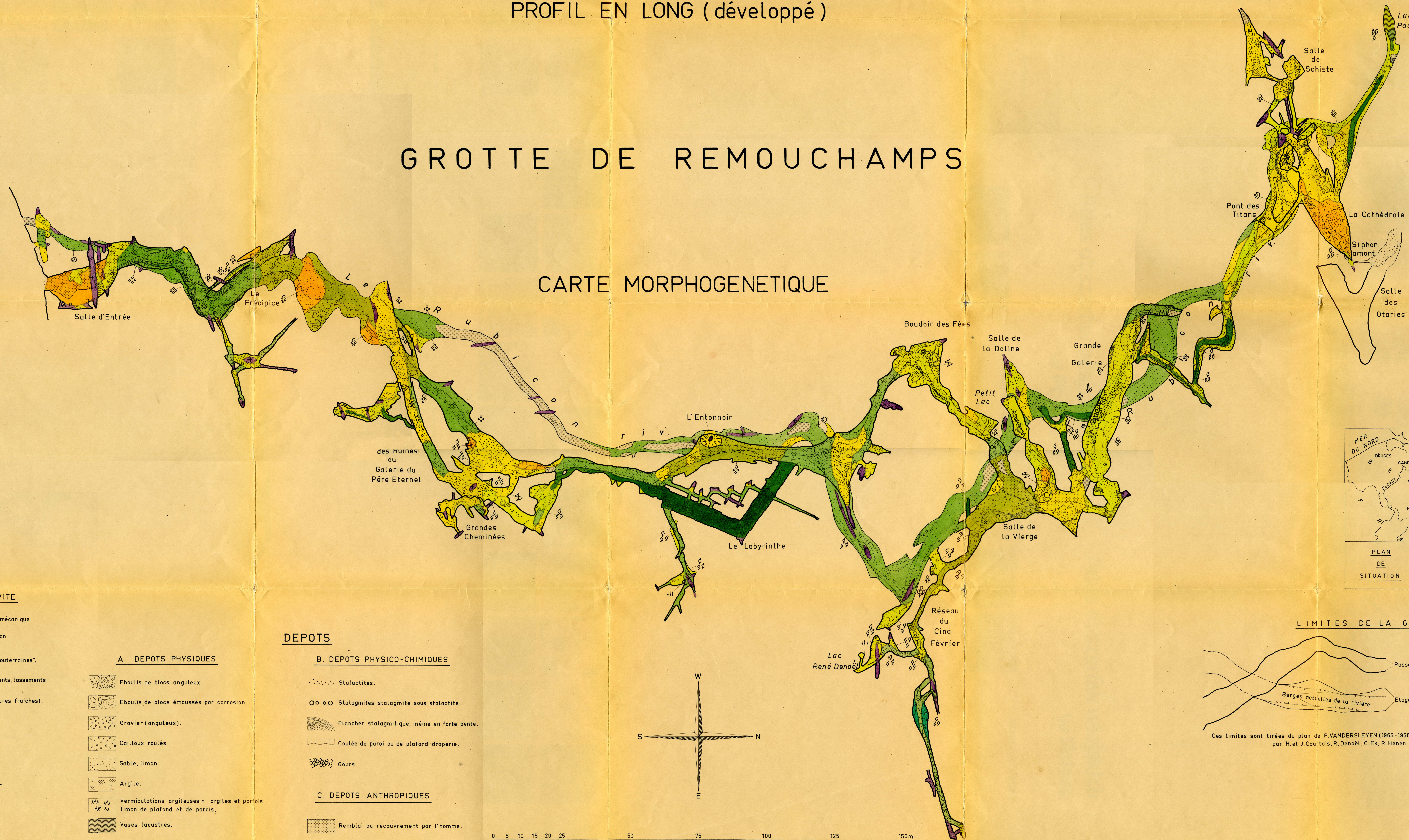
CAMILLE EK. 1969.



PROFIL EN LONG (développé)

GROTTE DE REMOUCHAMPS

CARTE MORPHOGENETIQUE



TYPE DE CREUSEMENT à l'origine de la forme observée

A. ACTION DE L'EAU

- Creusement par l'eau stagnante ou en mouvement très lent.
- Creusement par cours d'eau ("érosion fluviale", rivière souterraine).
- Creusement par cours d'eau en conduite forcée ("tube").
- Ancien siphon.
- Autres types de creusement par l'eau (eaux de fuisselement de condensation; courants multiples ou indéterminés).
- Creusement par eau courante dans fissures, puits et cheminées; mouvements à nette prédominance verticale.
- Vestiges de chenaux anastomés. Penditifs rocheux.
- Cupules régulières. Cupules irrégulières.
- Creux cupuloïdes. Coups de gouge.
- Lapiés en cannelures.

B. ACTION DE LA GRAVITE

- Effondrement provoqué par rupture mécanique.
- Effondrement provoqué par dissolution (de fissures, etc...).
- Effondrement du plancher "dolines souterraines".
- affaissements, tassements.
- Fissures actuelles importantes (cassures fraîches).

C. ACTION DE L'HOMME

- Creusement anthropique; ou maximum = galerie artificielle.

A. DEPOTS PHYSIQUES

- Eboulis de blocs anguleux.
- Eboulis de blocs émoussés par corrosion.
- Gravier (anguleux).
- Cailloux roulés.
- Sable, limon.
- Argile.
- Vermiculatons argileuses = argiles et parois limon de plafond et de parois.
- Vases lacustres.

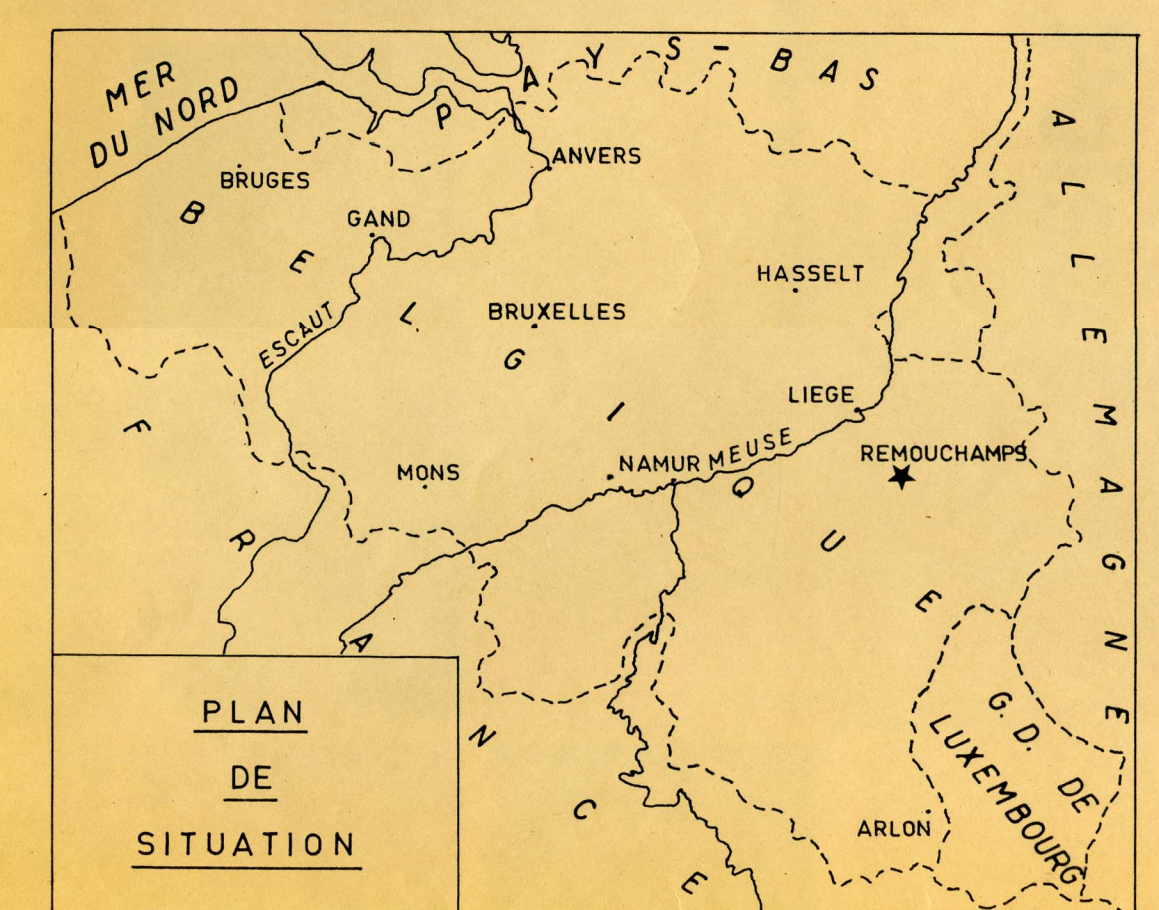
DEPOTS

B. DEPOTS PHYSICO-CHEMQUES

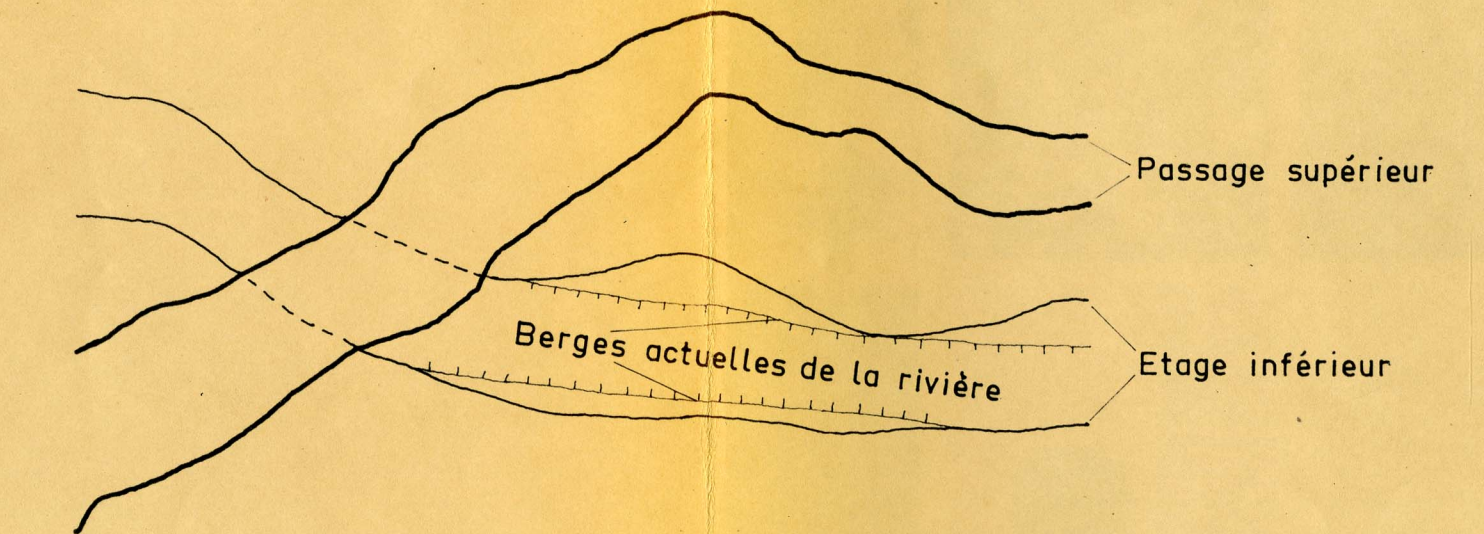
- Stalactites.
- Stalagmites; stalagmite sous stalactite.
- Plancher stalagmitique, même en forte pente.
- Coulée de paroi ou de plafond; draperie.
- Gours.

C. DEPOTS ANTHROPIQUES

- Remblai ou recouvrement par l'homme.



LIMITES DE LA GROTTE



Ces limites sont tirées du plan de P. VANDERSLEYEN (1965-1966) et de divers levés complémentaires par H. et J. Courtois, R. Denoël, C. Ek, R. Hénen et L. Lawarée.