

# CHRONOSTRATIGRAPHIE ET EVOLUTION SEDIMENTAIRE EN MILIEU ALPIN DANS LA GALERIE ARANZADI (GOUFFRE DE LA PIERRE SAINT MARTIN, PYRENEES, FRANCE)<sup>1</sup>

par

Richard MAIRE<sup>2</sup> & Yves QUINIF<sup>3</sup>

(13 figures, 1 tableau et 3 planches)

**RESUME.-** Dans le Gouffre de la Pierre Saint Martin, la Galerie Aranzadi constitue un remarquable piège à sédiments. Un épais remplissage détritique est composé de trois ensembles : inférieur à galets roulés, principal à farine glaciaire, de terrasses fluviatiles étagées sur des replats élaborés dans l'ensemble principal. Ce dernier éclaire le fonctionnement sédimentologique d'une cavité de haute montagne durant les périodes glaciaires. Des stalagmites fournissent des jalons chronologiques depuis 300 000 B.P. jusqu'à l'Holocène.

**ABSTRACT.-** Chronostratigraphy and sediment evolution in an alpine karst : the Aranzadi Gallery (Gouffre de la Pierre Saint Martin, Pyrénées, France). In the «Gouffre de la Pierre Saint Martin», the Aranzadi Gallery is a notable sediment trap. A thick filling consists of three discordant detrital sets : a lower unit mainly made of round-stones, a main unit with largely predominant carbonated clays, river terrace deposits covering successive steps hollowed in the main unit. This set took place during glacial periods and shows how evolves the sedimentology in a high alpine cave during glacial periods. Dates obtained from the speleothems cover the period between 300 000 B.P. and the Holocene.

## I.- INTRODUCTION

Une des difficultés de la sédimentologie souterraine en milieu alpin est de trouver des séquences sédimentaires intactes dans les gouffres montagnards. En effet, ces cavités sont constamment soumises à des crues violentes qui balayent les puits et galeries, détruisant ainsi les témoins de remplissage. C'est dans les galeries supérieures, déconnectées des circulations torrentielles, que l'on a le plus d'espoir de découvrir des sédiments.

La Galerie Aranzadi, dans le Gouffre de la Pierre Saint Martin, par sa situation en aval et au sommet de la Salle de la Verna, renferme une remarquable séquence sédimentaire de plus de 20 mètres d'épaisseur, antérieure à la glaciation de Würm, scellée par

de nombreuses stalagmites. Cette séquence comprend un ensemble inférieur de galets roulés, un ensemble principal de sédiments proglaciaires et une série de terrasses fluviatiles étagées incisant l'ensemble principal. Plusieurs datations permettent d'élaborer une chronologie et de replacer cette évolution sédimentaire dans le Quaternaire pyrénéen (Maire & Quinif, 1984 ; Quinif & Maire, 1986 ; Cantillana, Quinif & Maire, 1986).

<sup>1</sup> Recherche subventionnée par le Fonds National de la Recherche Scientifique (FNRS).

<sup>2</sup> E.R.A. n° 282 du C.N.R.S., Institut de Géographie, 29 avenue Robert Schuman, F-13621 Aix-en-Provence (France).

<sup>3</sup> Centre d'Etudes et de Recherches Appliquées au Karst (CERAK) ; Faculté Polytechnique de Mons, 9 rue de Houdain, B-7000 Mons (Belgique).

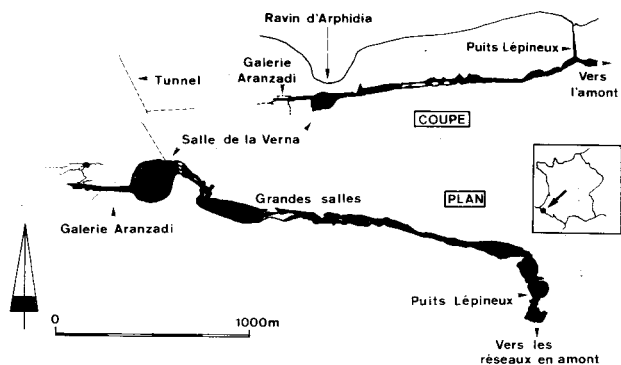


Fig. 1.- Localisation du réseau de la Pierre Saint Martin et topographie des galeries basses du gouffre.

Situation of the network of the «Pierre Saint Martin» and sketch of the lower parts of the cavity. This is a high Alpine network ; the highest entrance opens at 2 047 m a.s.l. in the lapiaz. It develops essentially under 400 m of Cretaceous limestones on the primary basement.

## II.- STRUCTURE DU GOUFFRE DE LA PIERRE SAINT MARTIN

Réseau de haute montagne, le gouffre comprend une enfilade de galeries et de grandes salles sous

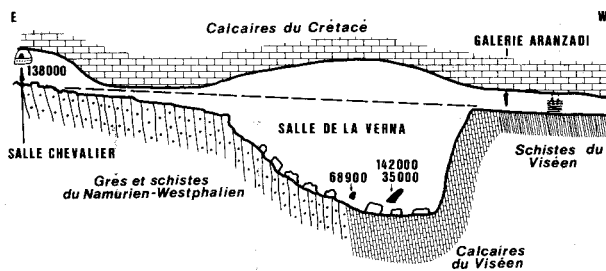


Fig. 2.- Coupe géologique simplifiée de la Salle de la Verna (d'après Gilli, 1984).

Simplified geological section of the Verna room (following Gilli, 1984).

400 m de calcaires crétacés au contact du socle paléozoïque (fig. 1 et 2). Plusieurs gouffres dont l'orifice le plus haut se trouve à 2 047 m d'altitude traversent les 400 m de calcaires pour donner accès aux rivières souterraines (Douat, 1976 ; Queffelec, 1976). L'épine dorsale du gouffre est constituée par une suite de salles géantes qui se termine avec la Salle de la Verna, longue de 270 m, large de 230 m et haute de plus de 120 m. La Galerie Aranzadi représente la suite du gouffre, lorsque la Salle de la Verna

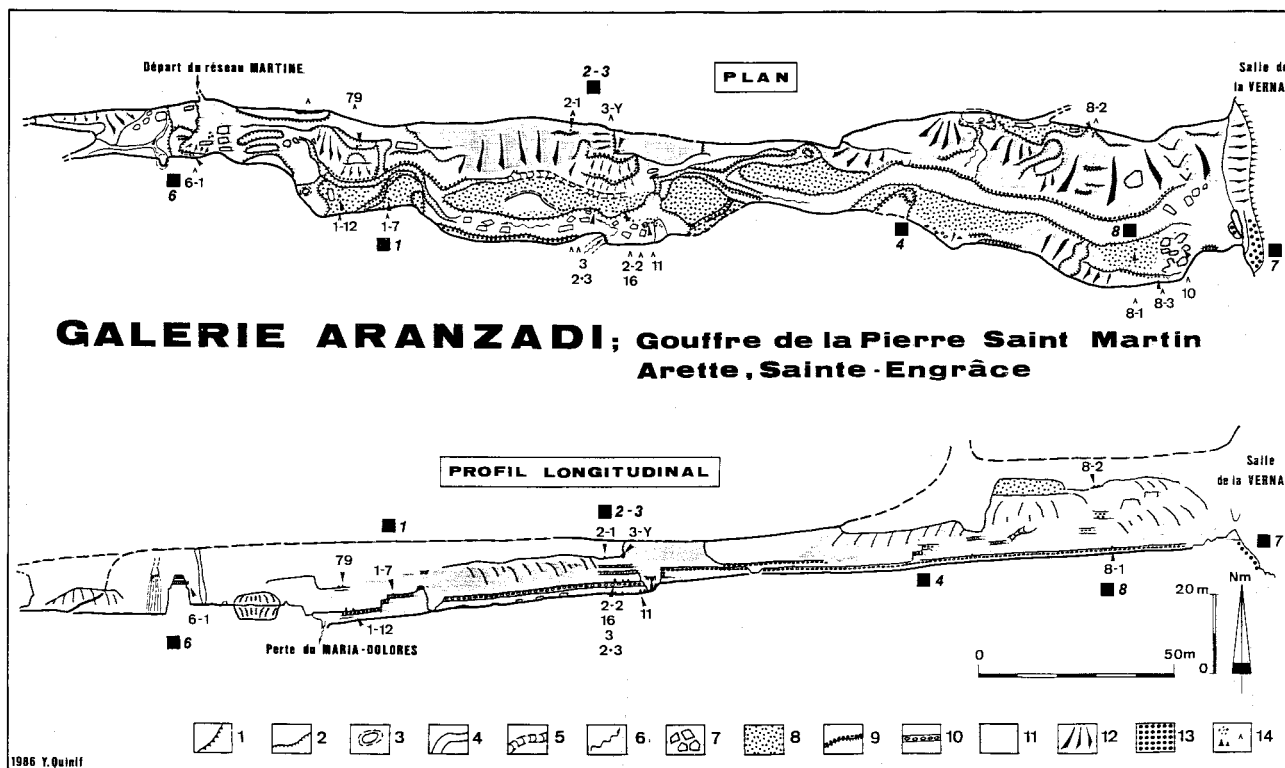


Fig. 3.- Topographie de l'Aranzadi et distribution des dépôts.

1. Escarpement de plus de 5 m ; 2. Escarpement de moins de 5 m ; 3. Cheminée ; 4. Talweg ; 5. Talweg abandonné ; 6. Ecoulement ; 7. Eboulis (roche ou sédiment) ; 8. Dépôt de terrasse fluviale ; 9. Rebord de terrasse ; 10. Niveau de terrasse ; 11. Dépôts de l'ensemble principal ; 12. Pente ; 13. Dépôts de l'ensemble inférieur ; 14. Stalagmites. Celles qui sont étudiées sont numérotées (nous avons omis d'indiquer les lettres AR-ST pour alléger le dessin).

Map and profile of the Aranazadi Gallery and distribution of the deposits.

1. Escarpment of more than 5 m ; 2. Escarpment of minus than 5 m ; 3. Chimney ; 4. Talweg ; 5. Forsaken talweg ; 6. River ; 7. Fallen rocks ; 8. River terrace ; 9. Border of a river terrace ; 10. Level of a river terrace ; 11. Main unit ; 12. Slope ; 13. Lower unit ; 14. Stalagmites. The speleothems which are studied are numbered (without the letters AR-ST for facility).

n'était pas encore creusée et que le torrent qui actuellement s'y perd continuait sa course vers l'aval. Elle s'ouvre à 100 m de hauteur dans les voûtes de la Salle de la Verna. Longue de 300 m, rectiligne, large de 20 à 30 m, la Galerie Aranzadi, par sa position perchée, est un remarquable piège à sédiments dont l'épaisseur dépasse la dizaine de mètres (fig. 3). Une coupe face au vide de la Verna témoigne de l'ancien passage du torrent avant la formation de la salle géante.

### III.- LITHOSTRATIGRAPHIE DE L'ARANZADI

La séquence décrite ci-dessous est une synthèse réalisée à partir de 8 coupes échantillonnées dans la Galerie Aranzadi. Elle comprend de bas en haut un **ensemble inférieur**, un **ensemble principal**, les **terrasses fluviales** étagées et les **concrétions stalagmitiques** qui, hormis deux d'entre elles scellent tous les sédiments détritiques quels qu'ils soient (fig. 4).

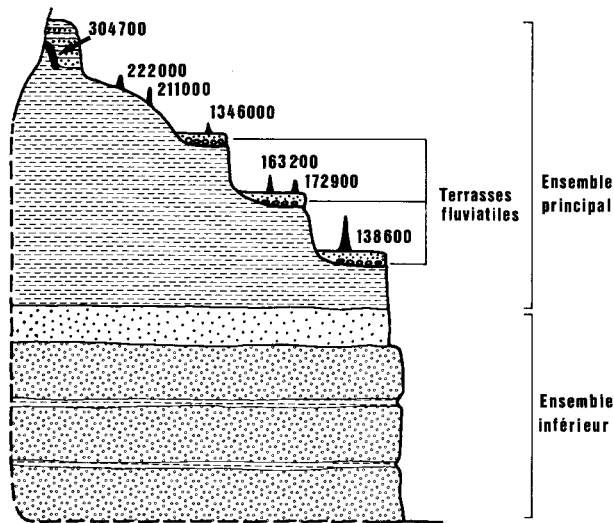


Fig. 4.- Coupe de principe des remplissages de la Galerie Aranzadi, montrant les trois ensembles sédimentaires détritiques et quelques stalagmites datées.

*Synthetic section through the deposits of the Aranzadi Gallery, showing the three detritic sedimentary units and some dated speleothems.*

#### A.- L'ENSEMBLE INFÉRIEUR (E.I.)

C'est au porche de l'Aranzadi, face au vide de la Verna, que l'ensemble inférieur apparaît le mieux (fig. 5). Il comprend presque essentiellement une puissante série de galets en couches métriques séparées les unes des autres par des strates centimétriques d'argile et de sable. Trois types de faciès à galets se succèdent stratigraphiquement :

- **des galets très hétérométriques** de 1 à plus de 20 cm avec une moyenne de 10 cm. Ces galets reposent sur le socle par l'intermédiaire d'une couche de sable. Une strate de sable et une autre de limon marron y sont incluses.
- **des galets de 8 à 12 cm**, comprenant une famille de galets centimétriques, à matrice argileuse.
- **des galets de 1 à 10 cm** avec une moyenne de 2 à 3 cm, séparés des précédents par une couche argileuse. Cette unité de galets se termine par un contact ravinant.

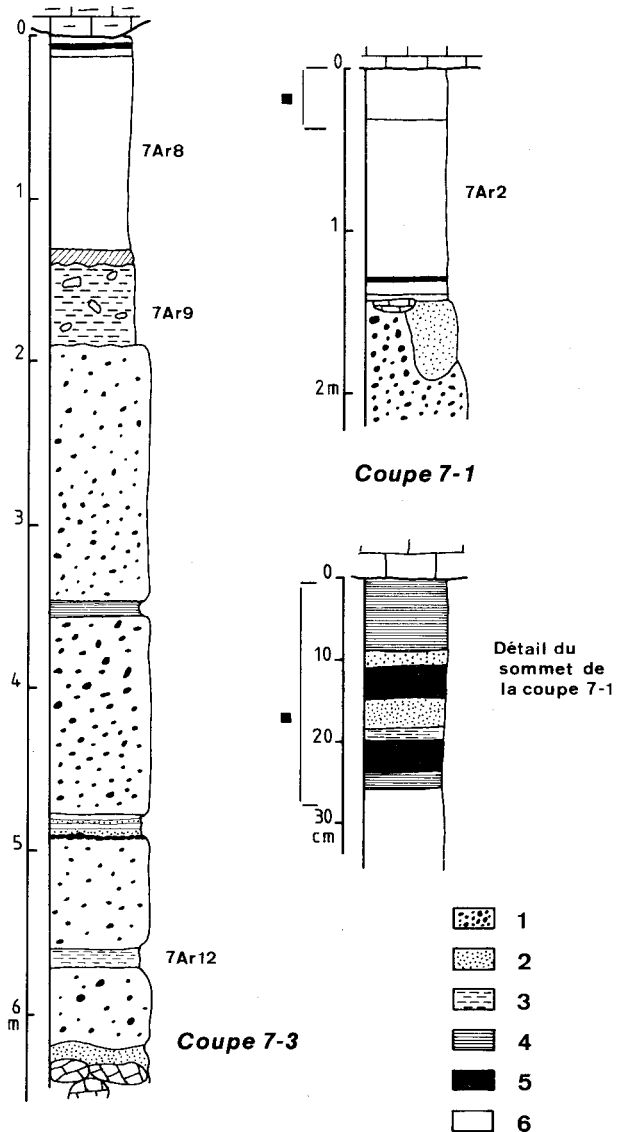


Fig. 5.- Lithostratigraphie de l'ensemble inférieur. La coupe 7-3 fait face à la Salle de la Verna, la coupe 7-1 est située dans la Galerie Aranzadi près de la lucarne par où on pénètre dans la galerie.

1. galets roulés ; 2. sable ; 3. limons et sables limoneux ; 4. argile feuilletée ; 5. argile jaune, plastique et compacte ; 6. alternances entre feuillets d'argile jaune et d'argile grise.

*Lithostratigraphy of the lower unit. The section 7-3 is in front of the Verna room, the section 7-1 is in the Aranzadi Gallery near the entrance window.*

1. roundstones ; 2. sand ; 3. loams and sandy loams ; 4. clay ; 5. plastic, compact, yellow clay ; 6. succession of yellow and grey clays.

Enfin, un **limon sableux marron** contenant des blocs de la voûte, de 50 cm d'épaisseur, sépare les galets de l'ensemble principal qui ravine le limon par une argile jaune-grise. Une autre coupe montre un chenal sableux décimétrique qui entaille les galets.

## B.- L'ENSEMBLE PRINCIPAL (E.P.)

L'ensemble principal n'est accessible que par des coupes tronquées (fig. 6 et 7). Le contact avec l'E.I. est visible à deux endroits, son sommet a été ôté par l'érosion sur une hauteur indéterminée sauf à la coupe 3.

D'une manière générale, l'E.P. est une série de fines strates argileuses jaunes plastiques et grises à

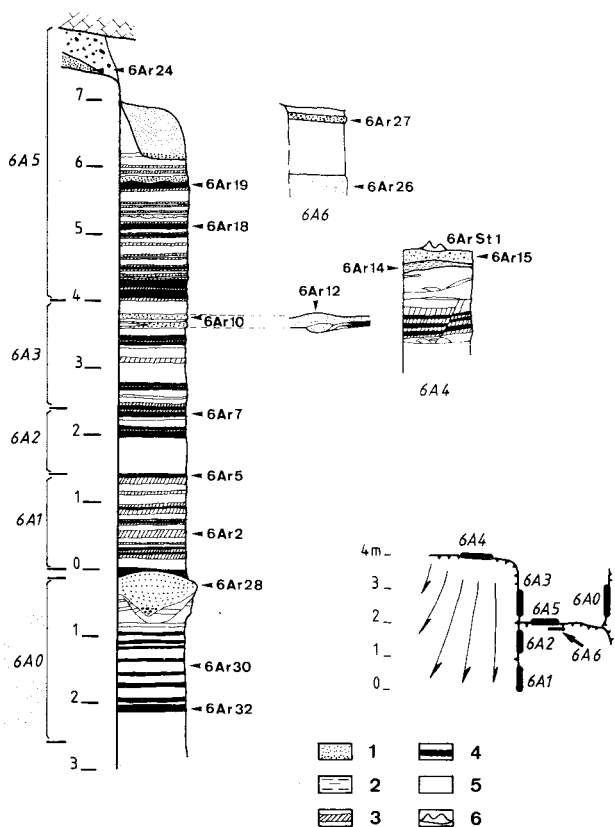


Fig. 6.- Lithostratigraphie de l'ensemble principal. Les coupes 6 ont été pratiquées à quelques mètres de l'ouverture du Réseau Martine. La figure au-dessus de la légende indique la disposition géométrique des différentes coupes partielles. Nous avons également indiqué les échantillons repris dans l'analyse sédimentologique.

1. sable ; 2. limon brun ; 3. argile grise ; 4. argile jaune plastique ; 5. alternances entre feuillets d'argile jaune et d'argile grise ; 6. stalagmite.

*Lithostratigraphy of the main unit. The section 6 has been made some meters from the entrance of the «Martine network». We have indicated the samples selected for the sedimentological analysis.*

1. sand ; 2. brown loam ; 3. grey clay ; 4. plastic, yellow clay ; 5. succession of yellow and grey clays ; 6. speleothems.

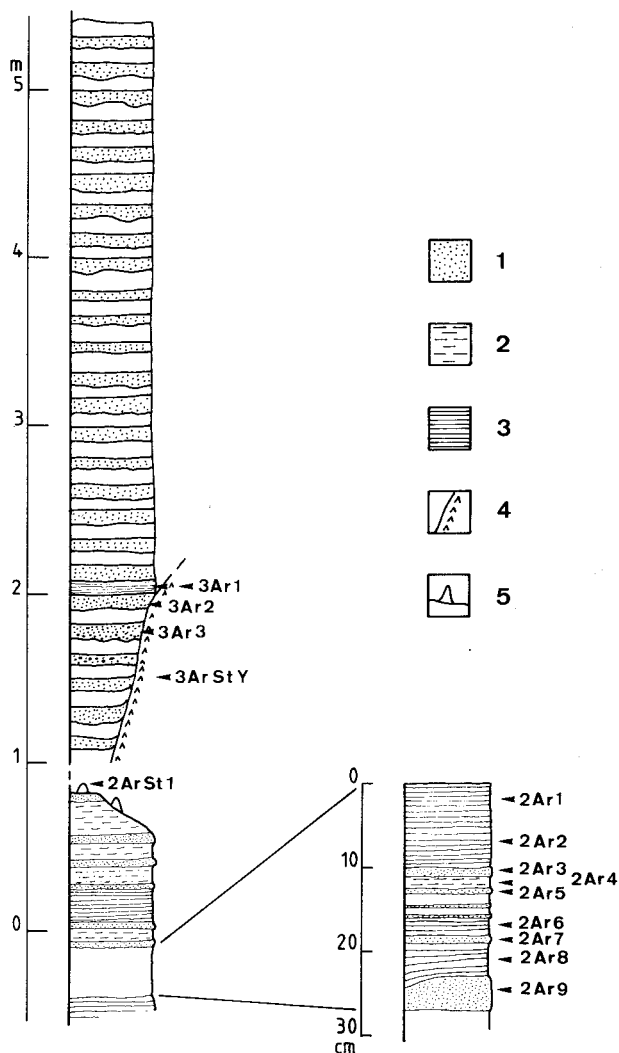


Fig. 7.- Lithostratigraphie du sommet de l'ensemble principal. Ces coupes ont été établies au sommet de la coupe complexe face à l'arrivée du ruisseau Maria-Dolorès.

1. sable ; 2. limon ; 3. argile ; 4. coulée stalagmitique ; 5. stalagmite.

*Lithostratigraphy of the top of the main unit. These sections have been made at the top of the complex section in front of the «Maria-Dolorès river».*

1. sand ; 2. loam ; 3. clay ; 4. flowstone ; 5. speleothems.

très nombreuses lamines. Chaque unité est épaisse de quelques centimètres à quelques décimètres. Des couches sableuses en chenaux interrompent cette succession à quelques endroits. Deux unités lithologiques principales composent l'E.P. : une **argile jaune plastique** et une **argile grise** qui se présente parfois sous une forme plus blanche, plus sableuse aussi. Ces faciès apparaissent souvent, sous leur forme pure, en strates peu épaisses (inférieures à 10 cm). Ils se présentent la plupart du temps en lamines millimétriques alternantes. L'argile jaune est en straticules plus épaisses que l'argile grise.

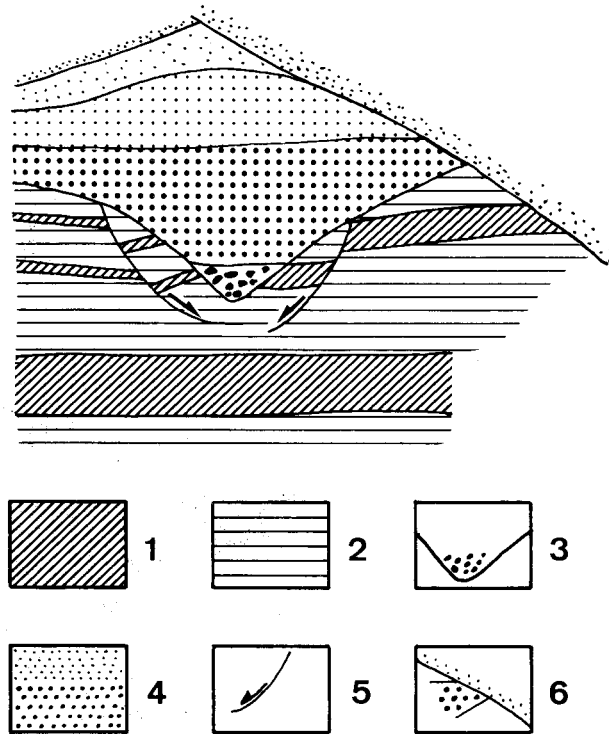


Fig. 8.- Coupe au travers d'un chenal sableux de l'ensemble principal.

1. argile jaune plastique de l'ensemble principal ; 2. argile grise de l'ensemble principal ; 3. petits galets au fond du chenal ; 4. sables du chenal ; 5. faille panaméenne ; 6. troncature sommitale due à la présence d'une voûte.

*Section of a sandy channel of the main unit.*

1. plastic, yellow clay of the main unit ; 2. grey clay of the main unit ; 3. little roundstones at the bottom of the channel ; 4. sands of the channel ; 5. panamean fault ; 6. summit truncation due to the presence of a vault.

Les **niveaux sableux** sont beaucoup plus rares et ne sont pas dûs, dans le cœur de l'E.P., à une influence géométrique (proximité des parois). Ils sont ravinants. A un endroit, le remplissage sableux s'est installé dans un chenal creusé au préalable, car délimité par de petits panneaux de l'E.P. glissés le long de failles panaméennes (fig. 8).

Le contact basal de l'E.P. est constitué, ainsi que nous l'avons déjà signalé, par deux contacts ravinants qui encadrent un limon marron dont l'origine est incertaine. Le sommet de l'E.P. devient de plus en plus sableux jusqu'à présenter une alternance régulière entre des strates sableuses avec parfois des petits galets et des strates argileuses (coupe 3, fig. 7).

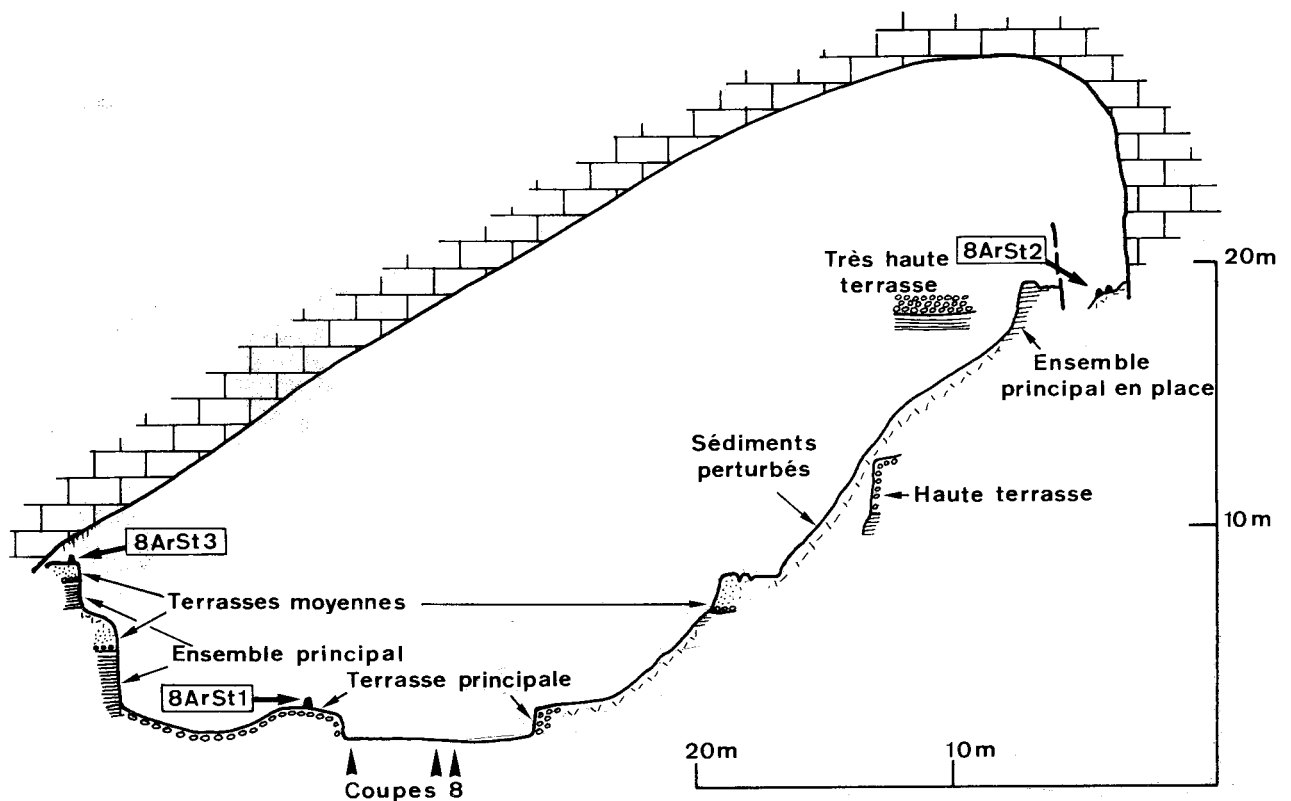


Fig. 9.- Section de la Galerie Aranzadi, à quelques dizaines de mètres du porche s'ouvrant sur la Salle de la Verna.

*Section of the Aranzadi Gallery.*

### C.- LES TERRASSES FLUVIATILES

Les terrasses fluviales sont des ensembles de sables et galets avec des strates limoneuses et argileuses étagées, discordantes sur l'E.P., présentant des variations latérales et longitudinales de faciès considérables. Si leur étagement dans un secteur donné ne pose aucun problème (fig. 9), les corrélations longitudinales sont difficiles, voire impossibles quand plusieurs terrasses se télescopent, par exemple là où la galerie devient plus basse. Le nombre de terrasses visibles à certains endroits va jusqu'à six unités.

### D.- LES CONCRETIONS STALAGMITIQUES

Ce sont le plus souvent des stalagmites-cierges qui scellent les terrasses ou l'E.P. Elles se situent dans tous les contextes morpho-sédimentaires possibles. Certaines sont donc postérieures à l'érosion qui a tronqué l'E.P., d'autres au dépôt de l'une ou l'autre terrasse. Deux concrétions sont plus vieilles et acquièrent ainsi une importance chronologique remarquable. L'une d'elles est une coulée interstratifiée dans le sommet de l'E.P. (3ARSTY). Elle scelle un creusement. L'autre est un encroûtement fragile, très corrodé, qui tapisse une paroi rocheuse dans le fond de la galerie. Il est recouvert par l'E.P.

## IV.- ANALYSE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'ENSEMBLE PRINCIPAL

Les résultats de l'analyse granulométrique ont été traités de trois manières : les diagrammes de Passega, une analyse en composantes principales et les corrélations. Dans le cadre de cet article, nous nous intéresserons uniquement à l'analyse par les diagrammes de Passega.

Les **argiles jaunes et grises** sont regroupées dans l'unité T qui représente les «suspensions pélagiques» ce qui signifie dans notre cas des conditions de décantation totale (fig. 10). Le régime hydrodynamique qui présidait au dépôt de la presque totalité de l'E.P. et, par voie de conséquence, d'une grande partie du vide de la galerie (et des autres galeries du réseau de la PSM) est un ennoyement total, avec peu de courant.

Les **couches sableuses** sont d'un grand intérêt parce qu'elles témoignent d'une modification dans les conditions de décantation totale. Deux des niveaux sableux du milieu de l'E.P. montrent, l'un des

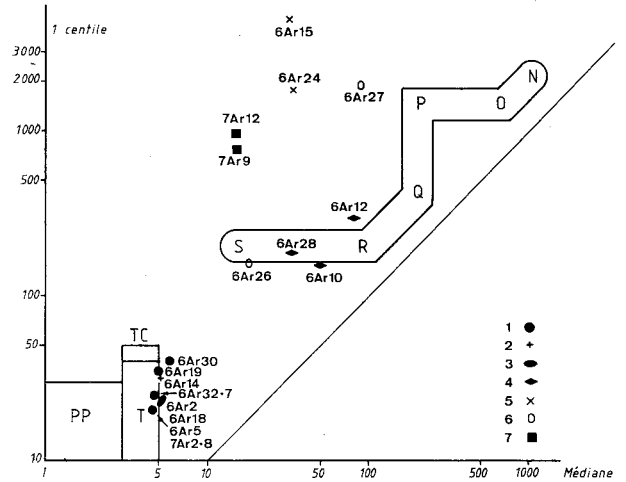


Fig. 10.- Diagramme bilogarithmique du premier centile en fonction de la médiane (d'après Passega in Rivière, 1977).

SR : dépôts de suspension uniforme trahissant une vitesse de fond trop faible pour produire un classement quelconque (par exemple, dépôts de lit majeur) ; RQ : dépôts de suspension gradée apparaissant lorsque la charge dépasse la capacité de transport ; QP : dépôt de sédiments transportés par roulement avec une part de suspension (courant pas encore assez capacitif) ; PO : dépôt comprenant de plus en plus de grains roulés ; ON : dépôt des seuls éléments roulés, les suspensions étant entraînées ; PP, T, TC : dépôt de décantation totale ; 1 : argile jaune plastique de l'E.P. ; 2 : limon brun discordant sur l'E.P. ; 3 : argile grise de l'E.P. ; 4 : sable de l'E.P. ; 5 : terrasse fluviale ; 6 : remplissage d'un chenal longitudinal ; 7 : dépôt de l'E.I.

*Bilogarithmic diagram of the one percentile in function of the median diameter (following Passega in Rivière, 1977).*

*SR : uniform suspension. Bottom speed is too weak to sort the sediments (f.e. : major bed of a river) ; RQ : graded suspension. Load exceeds the transport ability ; QP : bottom suspension and rolling ; PO, ON : rolling ; PP, T, TC : pelagic suspension ; 1 : plastic yellow clay of the main unit ; 2 : brown loam discordant on the main unit ; 3 : grey clay of the main unit ; 4 : sand of the main unit ; 5 : river terrace ; 6 : filling of a longitudinal channel ; 7 : lower unit.*

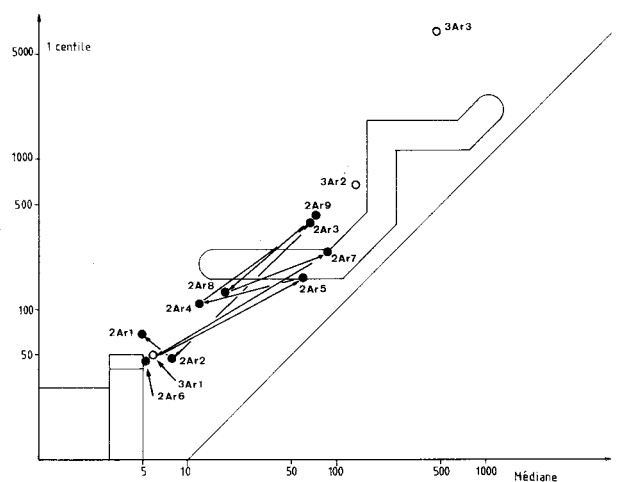


Fig. 11.- Diagramme de Passega pour une coupe partielle du sommet de l'ensemble principal.

*Passega's diagram for a partial section at the top of the main unit.*

conditions de suspension uniforme, l'autre des conditions intermédiaires entre suspension uniforme et suspension gradée. Par moment, un courant plus fort envahissait la galerie, creusant des chenaux, déposant des suspensions uniformes, dépôts caractéristiques des débordements de crues. De plus, la morphologie des chenaux examinée ci-dessus, avec les failles panaméennes, conduit à la séquence sédimentaire suivante :

- arrêt de la sédimentation argileuse en décantation totale ;
- écoulement libre en chenal avec recreusement ;
- érosion du chenal avec failles panaméennes prouvant que ce chenal était à ce moment libre de sédiment ;
- sédimentation sableuse ;
- retour des conditions de décantation totale.

Ces épisodes sableux étaient probablement très brefs, avec dénoyage mais sans atteindre une grande puissance érosive généralisée puisque la seule érosion, très localisée, est le chenal. La presque totalité de la strate représente des dépôts de suspension uniforme, donc de décantation (vitesse de fond nulle ou trop faible pour produire un classement). Seuls les fonds de chenaux appartiennent à des dépôts de suspension gradée.

Le diagramme de Passega groupant les échantillons prélevés de façon exhaustive dans une section de 30 cm du haut de l'E.P. montre les alternances entre conditions de décantation totale et conditions de suspension uniforme (fig. 11). Par contre, deux échantillons prélevés plus haut dans l'E.P. dans deux strates grossières indiquent un transport par roulement. La fin de la sédimentation dans l'E.P. est donc tributaire d'autres conditions hydrodynamiques, plus variées que précédemment.

## V.- GEOCHIMIE

Afin de mieux cerner la définition des ensembles sédimentaires et leur origine, nous avons procédé à une calcimétrie et une analyse en spectrométrie gamma de l'uranium, du thorium et du potassium. On sait que ces trois radioéléments constituent de précieux indicateurs de l'origine du sédiment, des conditions de transport et de sédimentation (Quinif, 1978 ; Quinif *et al.*, 1982). Isolons dans le cadre de cet article l'analyse en composantes principales regroupant ces variables géochimiques (fig. 12). On constate que l'axe 1, avec une inertie de 85 %, concentre une grande partie de la signification. Il est défini positivement par le thorium et le potassium qui

sont fortement corrélés entre eux ; il est défini négativement par le carbonate. L'axe 2 est essentiellement porté par la variable uranium. Le fait le plus remarquable est l'opposition entre le carbonate et le groupe thorium + potassium. Il faut y voir la liaison du thorium et du potassium avec les argiles primaires de type illite et chlorite qui composent les argiles de l'E.P., elles-mêmes en opposition avec le carbonate détritique. Ce dernier caractérise en fait l'E.P. où les teneurs atteignent parfois plus de 80 %. L'uranium a une autre signification encore obscure : il constitue une «variable chimique», indépendante des constituants détritiques. Notons les concentrations anormales en uranium dans certains échantillons de sable (jusqu'à 10 ppm).

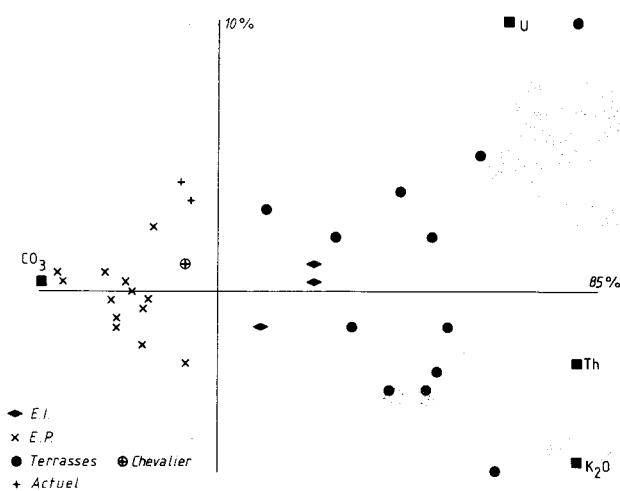


Fig. 12. - Analyse factorielle en composantes principales normées, plan des deux premiers axes groupant 95 % de signification. Quatre variables ont été traitées : les concentrations en uranium (U), thorium (Th), potassium ( $K_2O$ ) et en carbonates ( $CO_3$ ).

Factor analysis : two first axes plane with 95 % of signification. We have treated four variables : concentrations in uranium (U), thorium (Th), potassium ( $K_2O$ ), and carbonates ( $CO_3$ ).

La distribution des individus définit trois catégories : les échantillons carbonatés de l'E.P. groupés autour du pôle carbonate et indépendants du pôle chimique, les échantillons des terrasses fluviales vers le pôle Th- $K_2O$  et ceux vers le pôle U. Enfin, notons que les échantillons des niveaux fins appartenant à l'E.I. se situent près de l'intersection des deux ensembles.

## VI.- GEOCHRONOLOGIE

De nombreuses concrétions stalagmitiques occupent, dans la Galerie Aranzadi, des positions morpho-sédimentaires variées. Passons en revue les résultats des datations  $^{230}Th/^{234}U$  en fonction de ces positions (tabl. 1).

### A.- ENCROUTEMENT LATERAL CORRODE

Antérieure au dépôt de l'E.P., cette croûte qui tapisse la paroi droite dans le fond de la galerie présente un aspect saccharoïde dû à une intense corrosion qui rend aléatoires les résultats d'une datation U/Th. C'est la plus vieille concrétion de la galerie.

### B.- COULEE INTERSTRATIFIEE DANS LE SOMMET DE L'E.P. (fig. 7)

Située à quelques mètres du sommet de l'E.P., elle moule un creusement dont la géométrie est difficile à appréhender. L'E.P. présente une assez grande différence sédimentologique de part et d'autre de la coulée. C'est au-dessus de celle-ci qu'il acquiert le faciès d'alternance entre strates argileuses et strates sableuses à petits galets. L'âge est de 304 700 B.P. Le peu d'importance apparente de cette phase de concrétionnement par rapport à la sédimentation détritique correspondrait à une faible oscillation tempérée située à 300 000 B.P. L'E.P. daterait donc au moins de la partie médiane du Pléistocène moyen (Riss ancien dans l'hypothèse d'un Riss long, Duchadeau-Kervazo & Kervazo, 1983).

### C.- STALAGMITES SCELLANT L'E.P. (fig. 4 et 9)

Ce sont des petites stalagmites implantées sur une surface d'érosion de l'E.P. Les plus vieilles donnent une tranche d'âge pour le dépôt du sommet de l'E.P. et l'érosion qui a suivi entre 300 000 et 220 000 B.P. L'autre stalagmite est beaucoup plus jeune et ne peut nous donner d'indication stratigraphique.

### D.- STALAGMITES SCELLANT LES TERRASSES FLUVIATILES (fig. 4)

Ce sont les plus nombreuses et les âges se dispersent très fort. Les plus intéressants sont évidemment les plus vieux. La stalagmite la plus vieille est datée de 172 900 B.P. On ne constate pas de relation entre l'âge des différentes stalagmites scellant les terrasses et la position de ces dernières. Nous en déduisons que ces dépôts fluviaux se sont mis en place relativement vite. Si, en outre, nous faisons l'hypothèse que les terrasses sont postérieures aux stalagmites scellant le sommet de l'E.P. (hypothèse supportée par la position stratigraphique de ces sta-

lagmites et l'absence de concrétions de cette tranche d'âge sur les terrasses), les recouvrements de l'E.P. avec édification des terrasses sont situés entre 220 000 et 170 000 B.P. et correspondent ainsi avec l'importante amélioration climatique de 200 000 B.P.

### E.- AUTRES STALAGMITES

Dans la salle de la Verna, la date la plus vieille (142 500 B.P.) est celle d'une coulée édifiée contre la paroi non loin du mur. Elle est importante pour dater la formation de la Salle de la Verna qui se situe ainsi, tout au moins pour une phase majeure de sa formation, entre 170 000 et 140 000 B.P.

D'autres concrétions proviennent des grandes salles de la Pierre. Nous reviendrons sur ces implications dans les conclusions.

## VII.- SPELEOGENESE ET SEDIMENTOGENESE

L'E.P. est un ensemble de sédiments fluvioglaciaires, mis en place en galeries noyées sous une montagne recouverte par les glaciers. L'ensemble principal est ainsi caractérisé par un taux important de carbonates détritiques, des argiles primaires, très peu d'éléments radioactifs, car l'érosion durant une période glaciaire est presque exclusivement aérienne et affecte essentiellement le calcaire des canyons pauvre en uranium, thorium et potassium (Quinif, 1987). Il constitue une boue calcaire, typique des farines glaciaires. Notons au passage que la granulométrie n'intervient pas pour modifier la distribution des échantillons de l'E.P. dans l'analyse en composantes principales. Nous pouvons ainsi conclure que cet ensemble s'est mis en place durant une ou plusieurs périodes glaciaires, en galeries totalement noyées, probablement situées sous le glacier. Les torrents sous-glaciaires actifs ennoyaient complètement le karst sous-jacent. Les épisodes sableux correspondent à un arrêt de la sédimentation argileuse avec dénoyement. Une hypothèse plausible est d'y voir un paroxysme glaciaire durant lequel il n'y a plus à cette altitude de torrent sous-glaciaire. La fin de ce paroxysme commence par une reprise de l'écoulement avec un débit assez faible mais un écoulement rapide en régime dénoyé, précédant le retour aux conditions de décantation totale.

Le dépôt de l'E.P. se situe avant 304 700 B.P. Une étude préliminaire en paléomagnétisme indique que l'E.P. appartient à la période Brunhes, donc qu'il est



Tableau 1.- Résultats isotopiques et âges des stalagmites.

Echant.	U (p.p.m.)	U234/U238	Th230/U234	Th230/Th232	U234/U238 t = 0	Âges (ka)
<b>Galerie Aranzadi</b>						
3Ar-St-Y	0.101 ( $\pm 0.003$ )	1.189 ( $\pm 0.054$ )	0.986 ( $\pm 0.058$ )	20.5	1.443	304.7 (+ inf., - 71.8)
Ar-St-79 (A)	4.815 ( $\pm 0.146$ )	1.207 ( $\pm 0.039$ )	0.909 ( $\pm 0.033$ )	grand	1.385	222.2 (+ 33.4, - 24.9)
Ar-St-79 (B)	4.957 ( $\pm 0.139$ )	1.152 ( $\pm 0.035$ )	0.885 ( $\pm 0.033$ )	grand	1.275	211.2 (+ 31.2, - 23.5)
2ArSt1	3.790 ( $\pm 0.800$ )	1.107 ( $\pm 0.035$ )	0.871 ( $\pm 0.025$ )	grand	1.194	211 (+ 38, - 26)
Ar-St-3	39.2 ( $\pm 0.8$ )	1.553 ( $\pm 0.029$ )	0.856 ( $\pm 0.020$ )	grand	1.899	172.9 (+ 10.2, - 9.3)
2Ar-St-2	26.5 ( $\pm 0.4$ )	1.639 ( $\pm 0.023$ )	0.838 ( $\pm 0.016$ )	grand	2.042	163.2 (+ 6.9, - 6.5)
1Ar12 (bas)	6.6 ( $\pm 0.3$ )	1.352 ( $\pm 0.048$ )	0.754 ( $\pm 0.074$ )	grand	1.520	138.6 (+ 30.7, - 23.8)
1Ar12 (som)	8.0 ( $\pm 0.2$ )	1.459 ( $\pm 0.034$ )	0.306 ( $\pm 0.017$ )	grand	1.512	38.8 (+ 2.7, - 2.6)
1Ar7	40.7 ( $\pm 0.3$ )	1.161 ( $\pm 0.010$ )	0.728 ( $\pm 0.007$ )	grand	1.235	134.6 (+ 2.9, - 2.7)
Ar-St-(2 + 3)	16.81 ( $\pm 0.389$ )	1.690 ( $\pm 0.031$ )	0.654 ( $\pm 0.022$ )	grand	1.927	105.0 (+ 6.0, - 5.7)
6Ar-St-1	0.126 ( $\pm 0.003$ )	1.204 ( $\pm 0.054$ )	0.598 ( $\pm 0.724$ )	38	1.267	95.5 (+ 20.7, - 17.2)
Ar-St-11 A	3.127 ( $\pm 0.083$ )	1.236 ( $\pm 0.023$ )	0.532 ( $\pm 0.023$ )	grand	1.295	79.9 (+ 5.2, - 5.0)
8Ar-St-2	0.638 ( $\pm 0.016$ )	1.533 ( $\pm 0.033$ )	0.519 ( $\pm 0.013$ )	grand	1.659	75.5 (+ 2.9, - 2.8)
8Ar-St-1A	103.4 ( $\pm 0.2017$ )	1.721 ( $\pm 0.029$ )	0.480 ( $\pm 0.009$ )	grand	1.871	67.3 (+ 1.8, - 1.7)
8Ar-St-1B	7.216 ( $\pm 0.156$ )	1.650 ( $\pm 0.036$ )	0.471 ( $\pm 0.015$ )	grand	1.783	66.0 (+ 2.9, - 2.9)
8Ar-St-1C	110.4 ( $\pm 2.428$ )	1.649 ( $\pm 0.032$ )	0.464 ( $\pm 0.014$ )	grand	1.778	64.7 (+ 2.6, - 2.6)
8Ar-St-1D	134.6 ( $\pm 1.872$ )	1.726 ( $\pm 0.021$ )	0.459 ( $\pm 0.010$ )	grand	1.868	63.6 (+ 1.8, - 1.9)
8Ar-St-3A	86.09 ( $\pm 2.789$ )	1.577 ( $\pm 0.023$ )	0.467 ( $\pm 0.019$ )	grand	1.693	65.4 (+ 3.7, - 3.6)
8Ar-St-3C	3.332 ( $\pm 0.087$ )	1.642 ( $\pm 0.043$ )	0.416 ( $\pm 0.024$ )	grand	1.752	56.2 (+ 4.3, - 4.1)
Ar-St-16	7.214 ( $\pm 0.217$ )	1.545 ( $\pm 0.019$ )	0.355 ( $\pm 0.017$ )	grand	1.620	46.3 (+ 2.9, - 2.7)
Ar-St-10	4.815 ( $\pm 0.144$ )	1.581 ( $\pm 0.021$ )	0.027 ( $\pm 0.002$ )	grand	1.585	2.9 (+ 0.2, - 0.1)
<b>Salle Chevalier</b>						
1ChSt1	0.45 ( $\pm 0.01$ )	1.045 ( $\pm 0.027$ )	0.725 ( $\pm 0.116$ )	grand	1.066	138.0 (+ 59.2, - 37.6)
<b>Galerie du métro et Salle Loubens</b>						
M-St-4	1.826 ( $\pm 0.038$ )	1.245 ( $\pm 0.014$ )	0.437 ( $\pm 0.028$ )	grand	1.291	61.0 (+ 5.3, - 5.1)
L-St-III (1)	0.033 ( $\pm 0.001$ )	1.629 ( $\pm 0.074$ )	0.429 ( $\pm 0.030$ )	19	1.741	58.5 (+ 5.5, - 5.2)
L-St-I (1)	0.058 ( $\pm 0.007$ )	1.541 ( $\pm 0.246$ )	0.258 ( $\pm 0.059$ )	0.928	1.592	31.9 (+ 8.9, - 8.1)
M-St-2	0.012 ( $\pm 0.001$ )	1.128 ( $\pm 0.208$ )	1.445 ( $\pm 0.275$ )	24		
<b>Arphidia</b>						
Ap-St-1	0.063 ( $\pm 0.0004$ )	2.149 ( $\pm 0.162$ )	0.535 ( $\pm 0.037$ )	53	2.425	76.8 (+ 7.9, - 7.3)
<b>Salle de la Verna</b>						
VR-5(1)	0.650 ( $\pm 0.020$ )	0.936 ( $\pm 0.021$ )	0.722 ( $\pm 0.052$ )	grand	0.904	142.5 (+ 26.6, - 20.6)
Vr-St-1	0.290 ( $\pm 0.010$ )	1.059 ( $\pm 0.040$ )	0.473 ( $\pm 0.125$ )	grand	1.072	68.9 (+ 29.5, - 22.9)
VR-5(4)	0.770 ( $\pm 0.020$ )	0.870 ( $\pm 0.026$ )	0.293 ( $\pm 0.014$ )	88	0.855	38.0 (+ 2.4, - 2.3)
VR-5(6)	0.770 ( $\pm 0.010$ )	0.905 ( $\pm 0.017$ )	0.256 ( $\pm 0.008$ )	grand	0.896	32.3 (+ 1.2, - 1.2)
VR-5(5)	0.090 ( $\pm 0.020$ )	0.906 ( $\pm 0.021$ )	0.243 ( $\pm 0.008$ )	58	0.898	30.4 (+ 1.2, - 1.1)
VR-St-6	1.543 ( $\pm 0.067$ )	1.150 ( $\pm 0.030$ )	0.026 ( $\pm 0.003$ )	41	1.151	2.8 (+ 0.4, - 0.3)

postérieur à 700 000 B.P. Il s'est mis en place dans une galerie à la morphologie semblable à l'actuelle. La spéléogénèse doit donc être antérieure.

L'E.I., plus ancien, n'est pas actuellement daté. Son contexte climatique reste lui aussi obscur. Les terrasses se sont édifiées durant une importante amélioration climatique entre 210 000 et 170 000 B.P. Ensuite, la Galerie Aranzadi ne connaît plus d'activité hydraulique importante, excepté les rehaussements postérieurs des ruisseaux actuels,

Maria-Dolorès et Martine. Cet arrêt est dû à la formation de la Salle de la Verna que nous situons entre 170 000 et 140 000 B.P., donc durant le Riss récent.

La spéléogénèse de la Galerie Aranzadi débute ainsi au minimum dans la partie médiane du Pléistocène moyen. La formation des grandes galeries de la Pierre Saint Martin en est contemporaine. Le commencement de la karstification dans ce massif est ainsi rejeté dans le Pléistocène ancien, peut-être avant car des fragments de réseau découverts dans

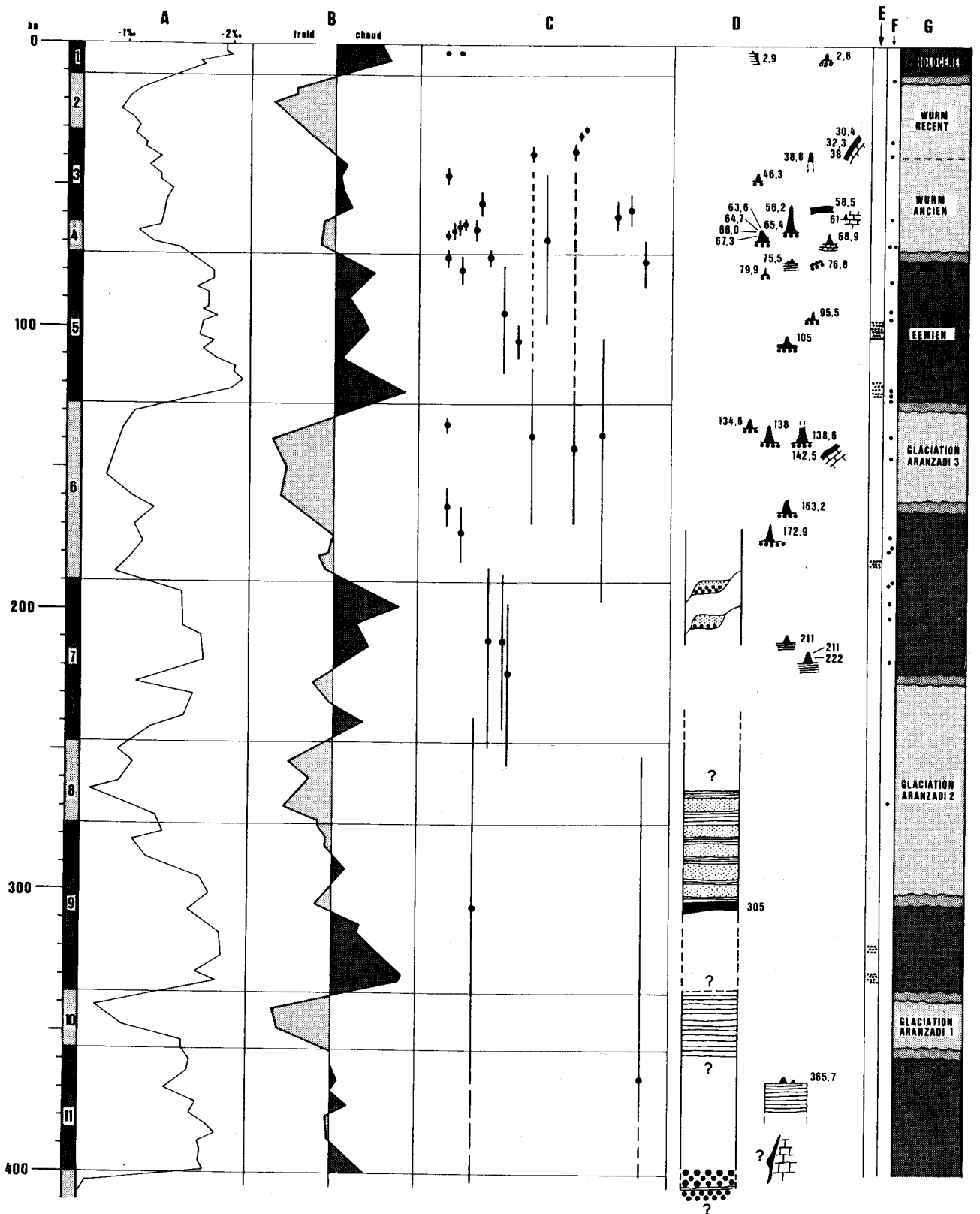


Fig. 13.- Chronostratigraphie

A : variations isotopiques de l'oxygène de *Globigerinoides sacculifera* du sondage océanique V28-238 (Shackleton & Opdyke, 1973) ; B : variations paléoclimatiques d'après le modèle de Berger (1980) ; C : datations U/Th ; D : situation des remplissages ; E : phases de concrétionnement à Niaux (d'après Sorriaux, 1982) ; F : datations en karsts haut-alpins (résultats CERAK) ; G : interprétation paléoclimatique.

## Chronostratigraphy

A : oxygen isotopic variations of *Globigerinoides sacculifera* of the oceanic borehole V28-238 (Shackleton & Opdyke, 1973) ; B : paleoclimatic variations following Berger's model ; C : U/Th datations ; D : situation of the fillings ; E : dates from Niaux Cave (following Sorriaux, 1982) ; F : datings in high alpine karsts (CERAK results) ; G : paleoclimatic interpretation.

certaines cavités sont déconnectés des écoulements actuels, ainsi que de la topographie contemporaine. Cette conclusion rejoint d'autres arguments dans les massifs alpins tendant à prouver l'ancienneté des grands réseaux montagnards.

### VIII.- CONCLUSIONS

Les dépôts du Gouffre de la Pierre Saint Martin et plus particulièrement de la Galerie Aranzadi apportent de précieuses données pour la connaissance non seulement de l'évolution du réseau karstique, mais aussi du Quaternaire pyrénéen, par un remarquable enregistrement du Pléistocène moyen et supérieur. Ils témoignent de phases de sédimentation typiques de périodes glaciaires (argiles primaires carbonatées), de recreusements avec dépôts de terrasses fluviatiles et concrétionnements stalagmitiques durant des périodes tempérées. Ces derniers fournissent les jalons chronologiques indispensables pour positionner les séquences. Ces périodes de concrétionnement se retrouvent dans les Montagnes Rocheuses (Harmon *et al.*, 1977) et les karsts anglais (Atkinson *et al.*, 1978 ; Gascoyne & Ford, 1984). Dans le réseau de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées Ariégeoises), parmi l'ensemble de ses datations, Sorriaux (1982) date une stalagmite à 185 200 B.P. et deux autres à 120 500 et 126 000 B.P. Enfin, Glazek & Harmon (1981) retrouvent également des périodes de concrétionnement analogues dans le karst polonais.

Une synthèse de la géochronologie est présentée à la figure 13. Nous y avons défini, en fonction des considérations précédentes, les glaciations d'Aranzadi 1, 2 et 3, corrélées avec les stades isotopiques (Shackleton & Opdyke, 1973) et la courbe de Berger (1980). Notre chronologie est proche de celle présentée par Kukla (1977) sur base de la datation U/Th des terrasses de coraux, des estimations astronomiques de Hays, Imbrie & Shackleton («Tune-up») (1976) et de Berger (1980). Elle s'éloigne plus des dates obtenues par la méthode du  $^{230}\text{Th}$  dans les vases océaniques par Broecker & Van Donk (1970) et par Kominz *et al.* (1979) calibrées sur la date de 730 000 B.P. pour l'inversion Matuyama-Brunhes.

Quelques faits sont à souligner. Plusieurs stalagmites fournissent des âges autour de 140 000 B.P., ce qui précède le Riss-Würm. Le Würm ancien, à l'encontre du Würm récent, connaît un abondant concrétionnement qui s'oppose à une péjoration climatique extrême. Cette constatation se rapproche

de ce que nous observons en Belgique où de nombreuses concrétions sont aussi datées de cette période (Gewelt, 1985 ; Quinif, résultats inédits). L'interglaciaire de 200 000 B.P. est particulièrement bien représenté dans le contexte haut-alpin (Pyrénées et Alpes : Quinif, résultats inédits), à la fois par l'abondance des concrétions et, ici, par les recreusements avec édification des terrasses. Dans ce cas-ci, cette séquence, par son importance morpho-sédimentologique, indique la présence d'un épisode à caractère interglaciaire plutôt qu'interstadiaire, dans l'optique de l'interprétation de Duchadeau-Kervazo & Kervazo (1983). Cet épisode tempéré prend place dans la glaciation de Riss, suivant l'appellation classique des glaciations alpines (hypothèse d'un Riss long, *in* Duchadeau-Kervazo & Kervazo, 1983).

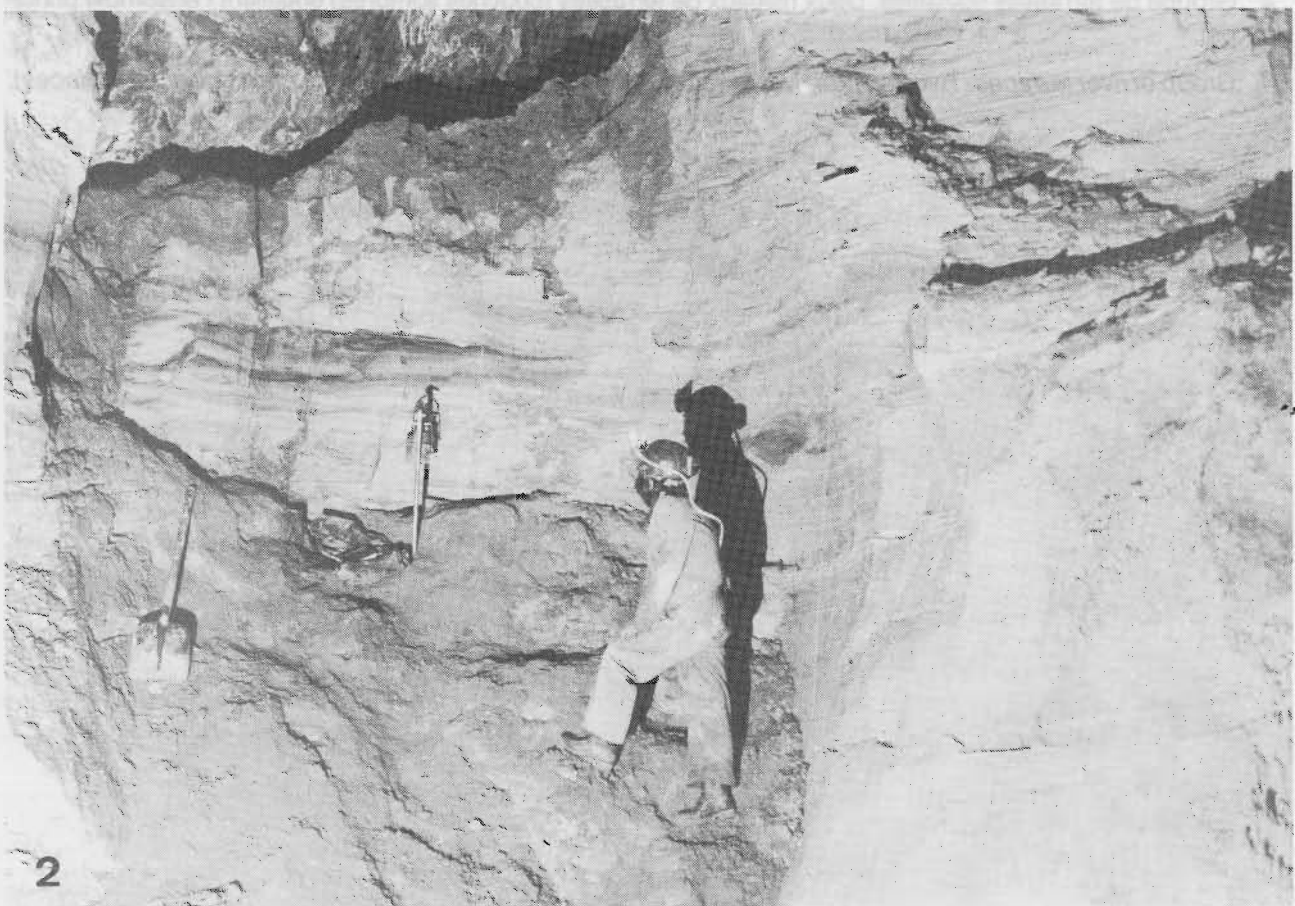
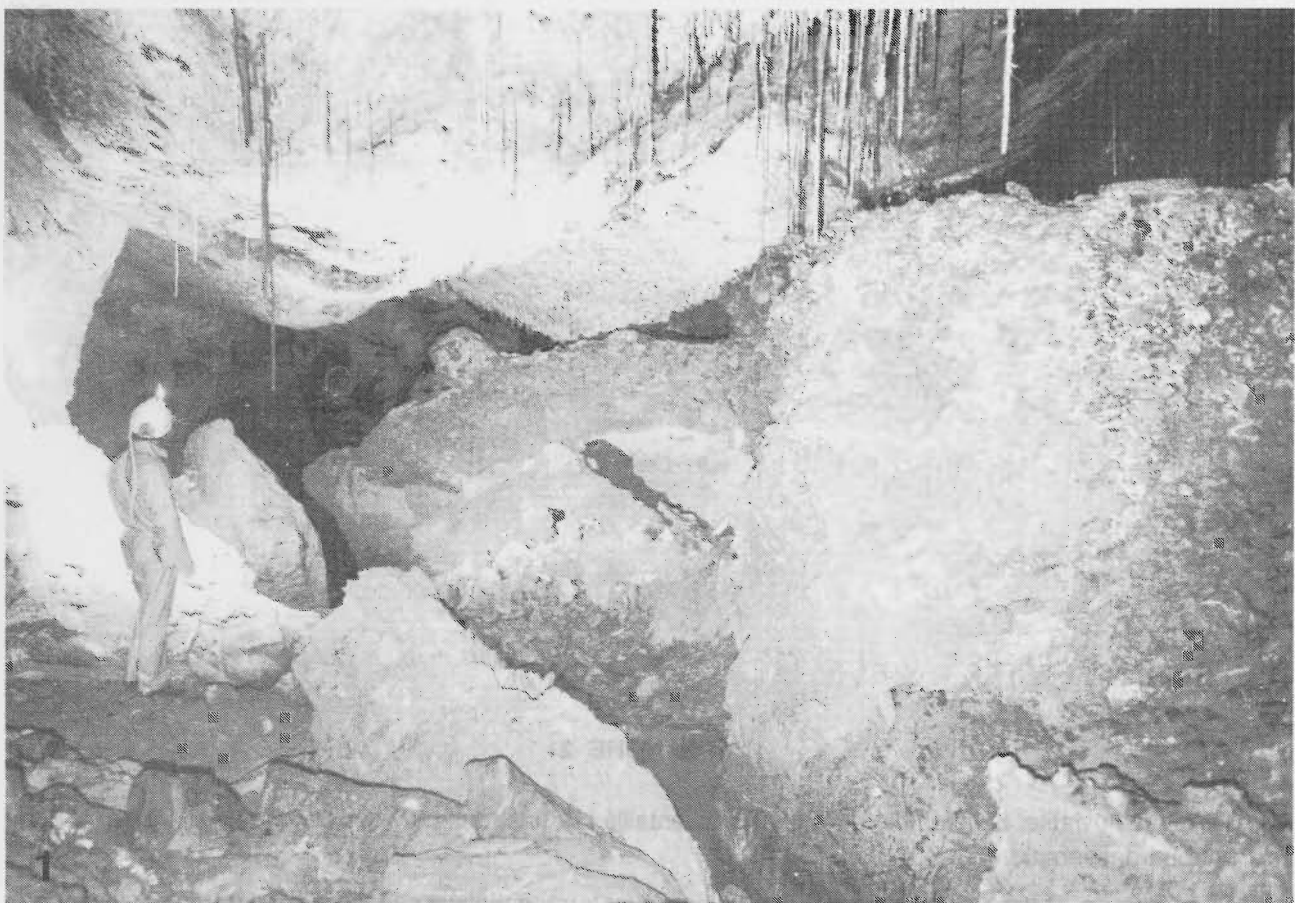
### BIBLIOGRAPHIE

- ATKINSON, T.C., HARMON, R.S., SMART, P.L. & WALTHAM, A.C., 1978.- Paleoclimatic and geomorphic implications of  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dates on speleothems of Britain. *Nature*, 272 : 24-28.
- BERGER, A.L., 1980.- A critical review of modeling the astronomy theory of paleoclimates and the future of our climate. *Actes des Journées d'Etudes Internationales «Soleil et Climat»*, Toulouse : 325-355.
- BROECKER, W.S. & VAN DONK, J., 1970.- Insolation changes, ice volumes, and  $\text{O}^{18}$  record in deep-sea cores. *Rev. of Geophys. and Space Phys.*, 8 (1) : 169-198.
- CANTILLANA, R., QUINIF, Y. & MAIRE, R., 1986.- Uranium-thorium dating of stalagmites applied to study the Quaternary of the Pyrénées (France) : The example of the «Gouffre de la Pierre-Saint-Martin». *Chemical Geology*, 57 : 137-144.
- DOUAT, M., 1976.- Spéléométrie de la Pierre Saint Martin. *Bull. ARSIP*, 9-10-11 : 6-10.
- DUCHADEAU-KERVAZO, C. & KERVAZO, B., 1983.- Confrontation de plusieurs types de courbes climatiques et corrélations avec quelques dépôts du Quaternaire récent. *Bull. Ass. Franc. Et. Quat.*, 20e année, 13 : 25-38.
- GASCOYNE, M. & FORD, D.C., 1984.- Uranium series dating of speleothems, Part II. Results from the Yorkshire Dales and implications for cave development and quaternary climates. *Cave Science*, 11 (2) : 65-85.
- GEWELT, M., 1985.- Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges : apport des datations  $^{14}\text{C}$  et  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 108 : 267-274.
- GILLI, E., 1984.- *Recherches sur le creusement et la stabilité des grands volumes karstiques souterrains*. Thèse de 3ème cycle, Univ. de Provence, Aix-Marseille, 180 p.
- GLAZEK, J. & HARMON, R.S., 1981.- Radiometric dating of Polish cave speleothems : current results. *In* B.F. BECK, edit., *Proceed. 8th Int. Speleol. Congr.*, Bowling-Green, U.S.A. : 424-427.
- HARMON, R.S., FORD, D.C. & SCHWARCZ, H.P., 1977.- Interglacial chronology of the Rocky and Mackenzie Mountains based upon  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dating of calcite speleothems. *Can. Journ. Earth Sci.*, 4 : 2543-2552.
- HAYS, J.D., IMBRIE, J. & SHACKLETON, N.J., 1976.- Variations in the Earth's Orbit : Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194 : 1121-1132.
- KOMINZ, M.A., HEATH, G.R., KU, T.L. & PISIAS, N.G., 1979.- Brunhes time scale and the interpretation of the climatic change. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 45 : 394-410.
- KUKLA, G.J., 1977.- Pleistocene land-sea correlations. I. Europe. *Earth Sci. Rev.*, 13 : 307-374.

- MAIRE, R. & QUINIF, Y., 1984.- Un complexe sédimentaire karstique en milieu alpin : les dépôts de la galerie Aranzadi (Gouffre de la Pierre-Saint-Martin, Pyrénées Atlantiques). *C.R. Acad. Sc. Paris, sér. II*, 298 (5) : 183-186.
- QUEFFELEC, C., 1976.- Tentative de première synthèse concernant les réseaux de la Pierre Saint Martin. *Bull. ARSIP*, 9-10-11 : 23-28.
- QUINIF, Y., 1978.- Les radioéléments naturels dans les dépôts détritiques de grottes - Premiers résultats. *Actes du 6e Congrès suisse de Spéléologie*, Porrentruy : 139-146.
- QUINIF, Y., 1987.- Concentrations anormales en uranium dans les stalagmites (Gouffre de la Pierre Saint Martin, Pyrénées, France). *Bull. Soc. belge Géol.*, 96 (2) : 121-128.
- QUINIF, Y., CHARLET, J.M. & DUPUIS, C., 1982.- Géochimie des radioéléments : U-Th-K  $^{20}$ O dans les roches détritiques : une nouvelle méthode d'interprétation. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 105 (2) : 223-233.
- QUINIF, Y. & MAIRE, R., 1986.- Etudes sédimentologiques et datations radiométriques dans le Gouffre de la Pierre Saint Martin (Pyrénées, France) : contribution à l'étude du Quaternaire pyrénéen. *Actes 9e Congr. Int. Espeleol.*, Barcelona, 1 : 294-296.
- RIVIERE, A., 1977.- *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations*. Masson, Paris, 167 p.
- SHACKLETON, N.J. & OPDYKE, N.D., 1973.- Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific Core V28-238 : oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and a  $10^6$  year scale. *Quatern. Research*, 3 : 39-55.
- SORRIAUX, P., 1982.- *Contribution à l'étude de la sédimentation en milieu karstique. Le système de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées Ariégeoises)*. Thèse de 3ème cycle, Laboratoire souterrain du CNRS, Moulis, 255 p., 84 fig., 34 tabl., 1 annexe, 1 plan h.t.

## PLANCHE 1

1. Le canyon du «Maria-Dolorès». L'incision du ruisseau «Maria-Dolorès» met en évidence la puissance des dépôts de l'Aranzadi. Nous nous trouvons ici au voisinage de la voûte de la galerie. Sous les pieds du spéléologue, il y a entre 10 et 20 mètres de sédiments.
1. *The «Maria-Dolorès» canyon. The incision of the «Maria-Dolorès» river shows the thickness of the Aranzadi deposits. We are here near the roof of the gallery. Under the feet of the caver, there are sediments between 10 and 20 meters thick.*
2. Coupe dans l'ensemble principal. Il atteint ici une grande épaisseur. On distingue la stratification des argiles proglaciaires entrecoupées de strates sableuses (plus sombres, au-dessus du piolet supportant une lampe). Le sommet de la coupe, à gauche, est constitué d'une terrasse fluviale.
2. *Section in the main unit. The main unit has here a great thickness. One sees the stratification of the proglacial clays intersected by sandy strata (darker above the ice-axe). The top of the section is constituted by a river terrace.*



**PLANCHE 2**

3. Terrasse fluviatile. L'ensemble principal est ici entaillé par une terrasse fluviatile que l'on voit suivant une coupe transversale.
3. *River terrace. The main unit is here hollowed by a river terrace that we see following a transversal section.*
4. Groupe de terrasses fluviatiles. Deux niveaux de terrasses (couches sombres) entaillent l'ensemble principal.
4. *Group of river terraces. Two levels of river terraces deposits (dark layers) slash the main unit (light surfaces).*



### PLANCHE 3

5. Coupe longitudinale d'une terrasse fluviatile. Les dépôts de terrasse, constitués ici de galets et de sables, surmontent l'ensemble principal. Des stalagmites scellent la terrasse et le creusement. C'est l'une d'elles qui a donné une date de 172 900 B.P.
5. *Longitudinal section of a river terrace. The terrace deposits, here constituted of roundstones and sands, top the main unit. Stalagmites seal the terrace and the hollowing. One of them has given a dating of 172 900 B.P.*
6. Sommet de l'ensemble principal. Le faciès est devenu plus grossier : les couches sombres sont des sables avec, par place, des petits galets tandis que les couches claires sont des argiles proglaciaires. A droite du spéléologue, une pente plus sombre est due à la croûte stalagmitique interstratifiée dans l'ensemble principal et datée de 309 000 B.P.
6. *Top of the main unit. The main unit becomes here coarser. The dark levels are sands with, locally, little roundstones. The light levels are proglacial clays. At the right of the caver, a darker slope is a flowstone interstratified in the main unit, the age of which is 309 000 B.P.*
7. Détail de l'ensemble principal. La photo montre les argiles proglaciaires finement stratifiées avec des intercalations plus sableuses.
7. *Detail of the main unit. The photo shows the proglacial clays which are stratified with layers of more sandy character.*
8. Stratification entrecroisée dans l'ensemble principal.
8. *Trough-cross bedding in the main unit.*



