



HAL
open science

Aroca (domaine marin côtier, Pays basque, France)

Nathalie Vanara, Alain Perre, Marc Pernet, Serge Latapie, Stéphane Jaillet,
Olivier Martine

► **To cite this version:**

Nathalie Vanara, Alain Perre, Marc Pernet, Serge Latapie, Stéphane Jaillet, et al.. Aroca (domaine marin côtier, Pays basque, France). *Karstologia*, 2007, 49 (1), pp.43-55. 10.3406/karst.2007.2599 . hal-04704492

HAL Id: hal-04704492

<https://hal.science/hal-04704492v1>

Submitted on 20 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Nathalie VANARA 1,
Alain PERRE 2,
Marc PERNET 2,
Serge LATAPIE 2,
Stéphane JAILLET 3
et Olivier MARTINE 4

(1) CNRS-UMR 5185 ADES/DyMSET
- Bordeaux et Université
Paris 1-Panthéon-Sorbonne
nathalie.vanara@free.fr

(2) Cercle des Siphonnés
alain.perre@laposte.net
pernet.marc@wanadoo.fr
d.giger@wanadoo.fr

(3) Laboratoire EDYTEM,
Université de Savoie, CNRS
Stephane.Jaillet@univ-savoie.fr

(4) Club de Plongée Pau-Océan
milsabor64@orange.fr

Aroca (domaine marin côtier, Pays basque, France) : un karst continental ennoyé par les transgressions maritimes quaternaires

RÉSUMÉ : Les affleurements rocheux du domaine marin côtier atlantique restent mal connus car les études qui leur sont consacrées sont rares du fait des difficultés d'observation *in situ* (plongée sous marine à -20/-40 m, mer agitée, eau rarement claire). Une première étape a consisté à réaliser la topographie détaillée d'un relief - Aroca - situé 4 km au large du port de Socoa (baie de Saint-Jean-de-Luz). L'originalité du massif n'avait pas échappé aux spéléo-plongeurs. Ce plateau présente en effet sur une surface réduite (150 x 100 m) une grande variété de formes. Cinq zones caractéristiques ont été distinguées. Le cœur du massif comprend des modelés « exokarstiques » (1/ une surface sommitale à chenaux, 2/ une surface démantelée à pitons) et des modelés « endokarstiques » (3/ grottes, galeries et arches). Les bordures sont constituées de : 4/ trois plans inclinés (ouest, nord et est) et 5/ d'un tombant (sud). Une typologie des formes à grande échelle prouve la prédominance des modelés d'ablation : surface d'aplanissement, chenaux de surcreusement, salles et galeries souterraines, arches, pitons résiduels. Les modelés d'accumulation regroupent les chaos de blocs, les accumulations de galets et les couvertures sableuses. L'énoncé des facteurs explicatifs passe par la reconnaissance de la nature et de l'âge des affleurements (des calcaires de l'Yprésien terminal aux marnes du Bartonien) et de la succession des agents d'érosion actifs au cours du Pléistocène. L'érosion continentale - lors des régressions marines - est responsable de modelés (exemple : banquettes pariétales de méandre) et de dépôts (exemple : galets allochtones) caractéristiques. Les érosions actuelles (exemple : encoches de surcreusement) sont marines et doivent leur vigueur aux agents que sont les tempêtes et

la houle, la dissolution et les actions bio-chimiques (lithophages), la gravité. Pour conclure une reconstitution paléogéographique est proposée. Après la sédimentation essentiellement calcaire à l'Eocène, puis marneuse de l'Oligocène, la mer se retire progressivement au Miocène. La plate-forme exondée est alors soumise aux processus météoriques. Au Pliocène, l'évolution du massif est de type isovolumique (couverture marneuse et proximité du niveau de base). Au Pléistocène inférieur et moyen, le décapage de la couverture marneuse se poursuit. Au Pléistocène supérieur, la régression marine wurmienne (-18 000 BP) contribue à l'encaissement du réseau hydrographique et donc à l'augmentation des gradients hydrauliques (karst fonctionnel classique). A partir de 15 000 ans, la remontée générale du niveau marin se fait par étapes successives. Au Boréal, un arrêt de la transgression permet l'édification d'un paléo-rivage à -20/-30 m (phase d'aplanissement en zone tidale ou infra-tidale). A partir de -7 500 BP, la hausse rapide du niveau de la mer de -23 à -8 m, puis plus lente de -8 au niveau actuel a bloqué la karstification. Les formes évoluent désormais sous la seule emprise des érosions marines qui viennent progressivement oblitérer les modelés précédemment acquis. **MOTS CLÉS :** domaine côtier, plateau calcaire sous marin, régressions/transgressions marines, reconstitution paléogéographique, Tertiaire, Quaternaire, côte basque, Pyrénées-Atlantiques.

ABSTRACT: AROCA (LITTORAL, BASQUE COUNTRY, FRANCE): A CONTINENTAL KARST DROWNED BY QUATERNARY MARITIME TRANSGRESSIONS. The rocky formations in shallow areas of the Atlantic coast are hardly known. Studies are rare because of the difficulties

of direct observation (diving in always agitated, troubled water, depth between -20 and -40 m).

Our first step was to make a detailed topography of a submarine plateau named Aroca, 4 km off Socoa harbour (bay of Saint-Jean-de-Luz). This plateau was already known for having a large variety of forms within a small surface (150 x 100 m). We gave names to most remarkable formations and defined five main characteristic zones:

- in the exokarstic domain 1/ a top surface with channels, 2/ a dismantled surface with pinnacles;

- in the endokarstic domain 3/ caves, galleries, arches;

- at the limits 4/ three inclined plans, west, north and east, 5/ a cliff to the south.

A typology of forms shows a predominance of ablation reliefs: aplanation, over-deepened channels, covered rooms and galleries, arches, residual pinnacles. Deposit accumulations regroup chaotic breakdown blocks, pebble accumulations and sand covers.

Statement of explanations requires recognition of the nature and age of the outcrops and succession of erosional agents during the Pleistocene. Rocks are dated from Ypresien (limestones) to Bartonian (marls). Continental erosion during sea regressions is responsible of characteristic landforms and deposits; for example wall banks, allochthonous pebbles... The currently active marine erosion during sea transgressions is due to storms, tide, dissolution, biochemical action (lithophages) and gravity.

We propose a paleogeographic reconstitution. After an essentially calcareous sedimentation in Eocene and an essentially marly sedimentation in Oligocene, the sea recedes during Miocene. From then, the platform, henceforward

above the water, is subject to meteoric erosion. In Pliocene, evolution of the massif is isovolumic (under a marly cover and with a low hydraulic gradient). During the lower and middle Pleistocene, the erosion of the marly cover goes on. During the upper Pleistocene, the wurmian (~18000 BP) marine regression allows entrenchment of the hydrographic system thanks to an increase of hydraulic

gradients (classic functional karst). From 15000 years onwards, a general transgression of sea level happens by successive steps. During the Boreal, a break in transgression allows the formation of a paleo-shore at -20 to -30 m, inducing a peneplanation phase in the tidal or infratidal zone. From 7500 BP onwards, a rapid transgression from -23 to -8, then a slower one from -8 to the

present level stops karstification on the massif. At present, only marine abrasion is active and tends to obliterate the previously built landforms. KEY WORDS: littoral zone, submarine limestone plateau, marine regressions/transgressions, paleogeographic reconstitution, Tertiary, Quaternary, Basque coast, Atlantic Pyrenees, France.

Introduction

Les recherches géomorphologiques menées ces dernières décennies sur les massifs karstiques ont montré tout l'intérêt et la pertinence de l'étude des karsts dans les reconstitutions paléogéographiques et paléoenvironnementales [Delannoy, 1997]. Alors que les domaines de la montagne [Vanara, 2000] et de la haute-montagne [Maire, 1990] sont traités par le biais de thèses; que les karsts de plateaux sont connus [Jaillet, 2005], que les littoraux calcaires sont décrits [Battistini, 1964], que les karsts extrêmes (tropicaux, froids) sont identifiés [Salomon et Pulina, 2005], les karsts sous-marins ne font l'objet que de très rares analyses poussées [Collin-Girard, 1996; Courrèges, 1997]. Les difficultés d'investigations liées aux conditions du milieu (plongée sous-marine), mais aussi l'arrêt ou la modification profonde des processus de karstogenèse n'ont pas incité les chercheurs, jusqu'à présent, à entreprendre des reconnaissances sur ces secteurs.

Au large de Saint-Jean-de-Luz, entre 20 et 40 m de profondeur, un « rocher »

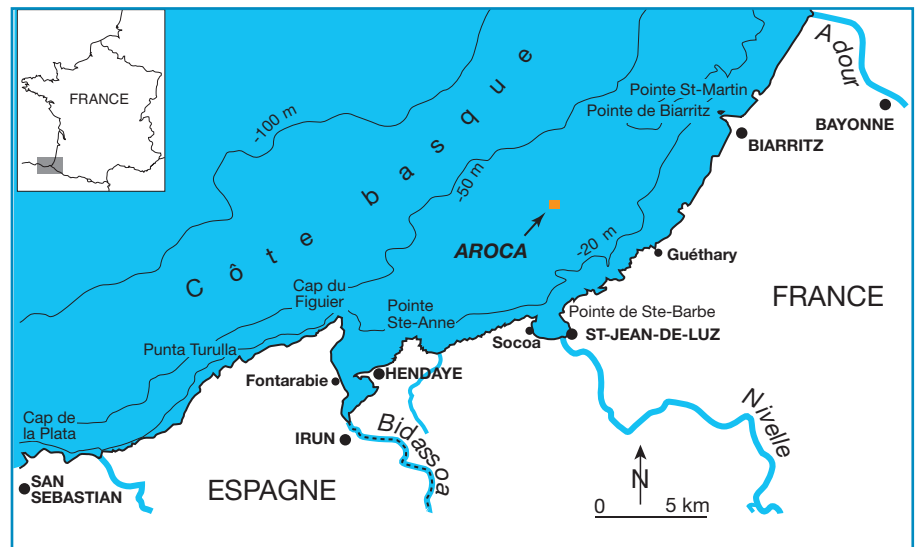


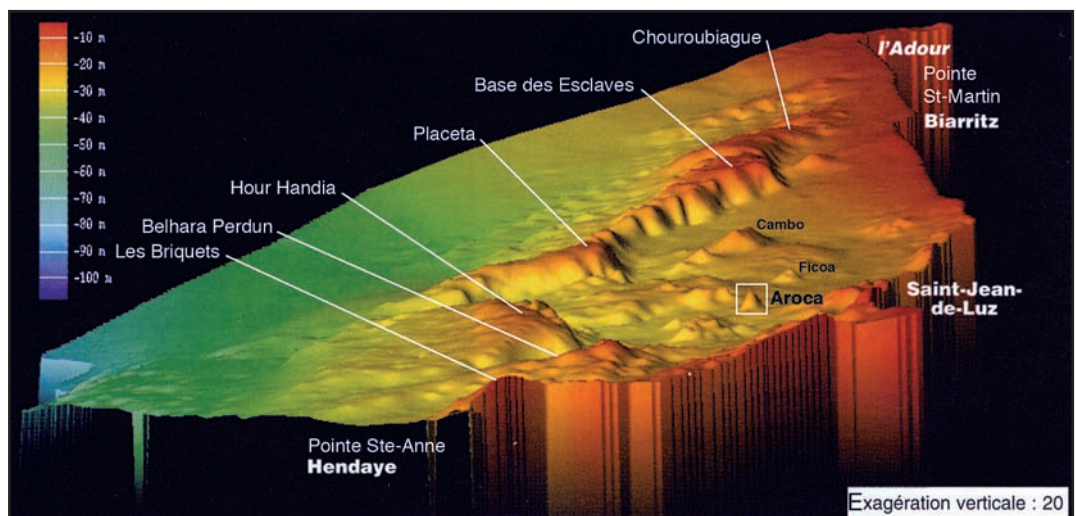
Figure 1 : Localisation de la zone d'étude. The basque coast at the spanish-french border.

connu des pêcheurs, puis des plongeurs de loisirs a fini par attirer un groupe de spéléo-plongeurs. La topographie de ce petit plateau calcaire, complétée par une série d'observations morphologiques et sédimentologiques préliminaires, montre qu'Aroca constitue un jalon remarquable de l'évolution géomorphologique de la côte basque au cours du Tertiaire et du Quaternaire dans un contexte d'évolution du niveau marin.

I. Aroca, un petit massif du domaine maritime de la côte basque

Par ses falaises (20-30 m de hauteur) plongeant dans l'océan Atlantique, la côte basque, de 35 km de longueur, contraste avec le littoral sableux des Landes. Elle est jalonnée par des promontoires (cap du Figuier; pointes Sainte-Anne, de Sainte-Barbe, de Biarritz, Saint-Martin) entre lesquels

Figure 2 : Vue en relief des fonds marins depuis Hendaye (élévation 25°) [Augris, 1999; figure complétée]. Les hauts-fonds des Briquets à Chouroubiague séparent du large un bassin interne accidenté de pointements isolés tels celui d'Aroca. Relief view of the underwater landscape seen from Hendaye (angle of view 25°), after Augris 1999, modified. The submarine swell from Briquets to Chouroubiague generally encloses an internal basin that contains some isolated points like Aroca.



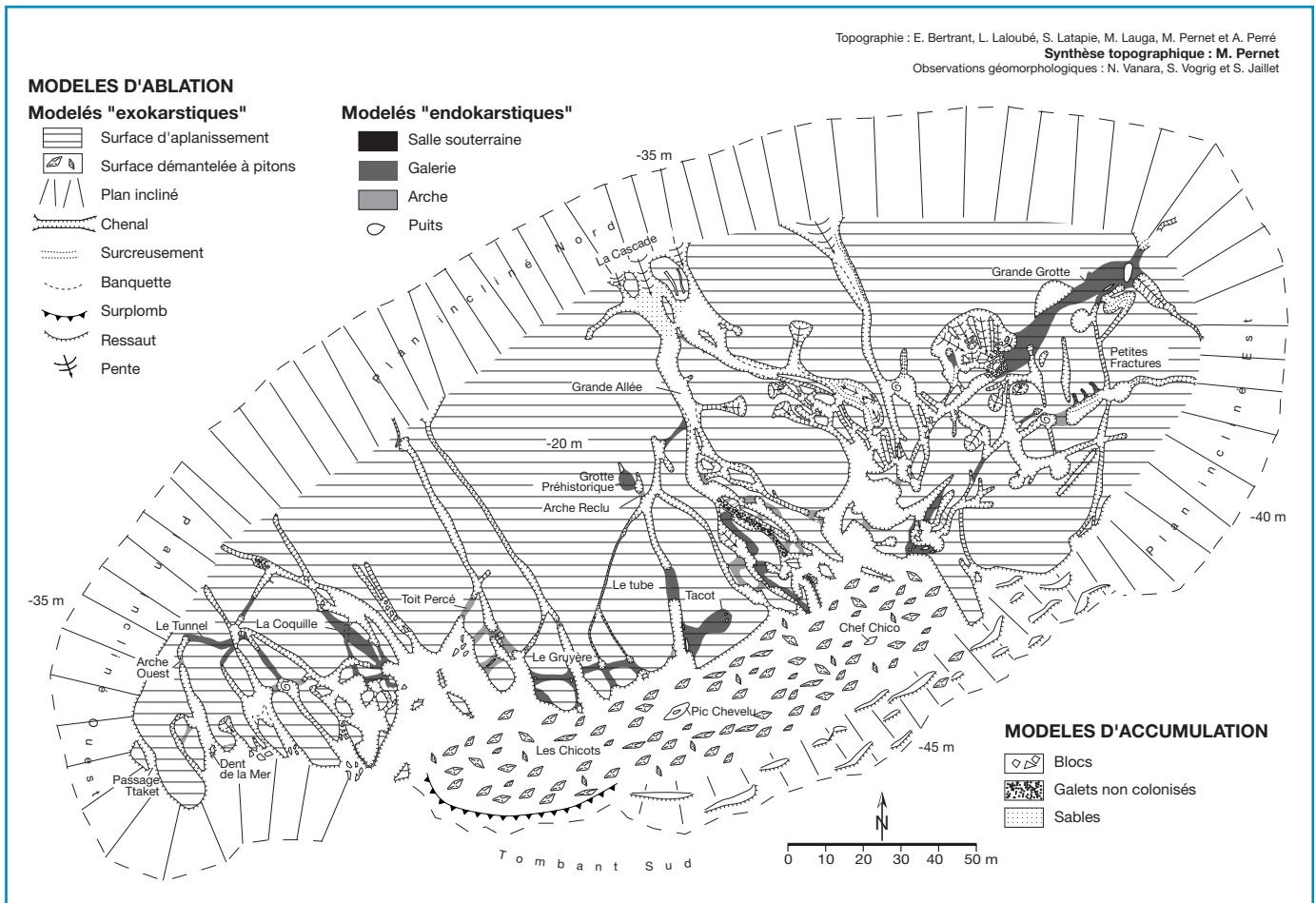


Figure 3 : Carte géomorphologique du massif d'Aroca. Geomorphologic map of the Aroca massif.

s'inscrivent deux baies (Fontarabie et Saint-Jean-de-Luz) et quelques criques (figure 1). Le plateau continental du Pays basque est marqué par un relief accidenté dominé par une série de hauts-fonds (brisants de Chicharvelles-Briquets, Belhara Perdun, Hour Handia, Placeta, Base des Esclaves et Chouroubiague) qui décrivent un arc dont les extrémités s'appuient sur la pointe Sainte-Anne (Hendaye) et la pointe Saint-Martin (Biarritz, figure 2). Ces reliefs constituent une barrière immergée qui sépare du large un bassin interne allongé de 12 km sur 4 avec des profondeurs de l'ordre de -30 à -40 m, accidenté de pointements isolés et de reliefs pouvant atteindre 10 à 20 m de hauteur au-dessus du fond marin. Les cartes bathymétriques, réalisées par sonar à balayage latéral [Froidefond, 1980] et sondeur multifaisceaux [Augris, 1999], font apparaître Aroca comme un pointement rocheux (figure 2). Or la topographie, effectuée par plongée, prouve que cet affleurement est, en réalité, un petit plateau de 150 m de long sur 100 m de large au maximum, au modelé karstique accusé (figure 3).

II. Le plateau d'Aroca, description des paysages sous-marins

A des profondeurs allant de -17 au nord à -45 m au sud, on a pu reconnaître cinq zones caractéristiques (figure 3). Le cœur du massif comprend des modèles « exokarstiques » (1/ surface sommitale à chenaux, 2/ surface démantelée à pitons) et « endokarstiques » (3/ grottes, galeries et arches). Les bordures sont constituées de 4/ trois plans inclinés (ouest, nord et est) et 5/ d'un tombant (sud).

A. Les modelés d'ablation

Le plateau. La surface sommitale, située à -20 m de profondeur, est une surface d'aplanissement recoupant les strates calcaires redressées (figure 4). Elle est particulièrement bien conservée dans sa partie nord; elle se distingue encore dans la zone des Petites Fractures, mais a été démantelée dans les zones du Gruyère et plus encore des Chicots (figure 3). Entièrement recouverte par une riche flore marine (photo 1), elle présente dans le détail de petites vasques et des rainures (figure 5).

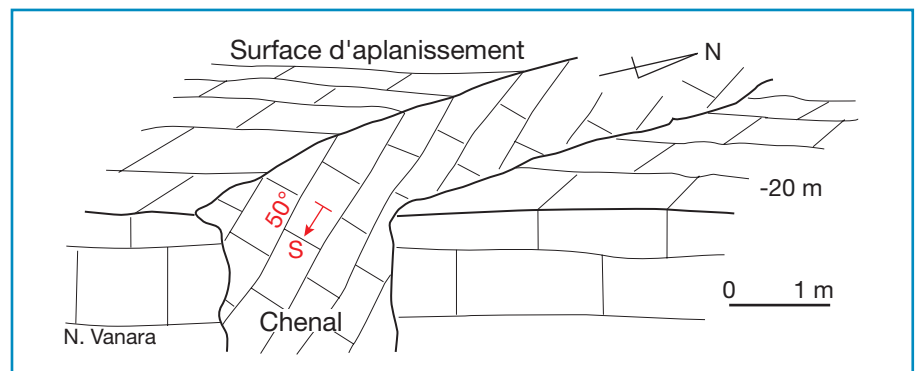


Figure 4 : Le plateau présente une surface sommitale plane qui recoupe les strates calcaires redressées. General appearance of the top surface of Aroca. A flat surface cuts the inclined calcareous layers.



Photo 1 : La surface sommitale (surface d'aplanissement) du plateau d'Aroca est recouverte par une riche flore et une faune variée marines. On reconnaît dans sa logette creusée dans le calcaire *Pracentrotus lividus* (oursin comestible) parmi *Mesophyllum lichenoides* (algues rouges) accompagné d'*Hypselodoris sp. cantabricus* ou *tricolor* (nudibranche) et d'*Aglaophenia tubulifera* (plumulaire). Outre *Aglaophenia*, les Coéléntérés sont bien représentés sur le plateau avec les anémones *Urticina felina*, *Aiptasia mutabilis* et *Actinothoe sphyrodeta*. La tache jaune, en haut et à droite de la photographie, peut être attribuée à une éponge du genre *Cliona*, *Myxilla* ou *Halichondria* (déterminations O. Martine, cliché A. Perré). *The flattened top surface of Aroca is overgrown with rich marine flora and fauna. Can be seen: an eatable urchin incrustated in limestone, red algae, nudibranches, plumulaire, anemonae. The yellow spot top right of the photo can be attributed to a sponge of genus Cliona, Myxilla or Halichondria.*

Les chenaux de surcreusement. La surface du plateau est entaillée par des chenaux de surcreusement parallèles orientés NNW-SSE, dont les plus belles expressions sont visibles au centre du massif (Grande Allée). Les profils en long montrent que les encaissements maxima (-10 m) sont situés, longitudinalement, vers le milieu des chenaux. Les extrémités (la Cascade figure 3 ; figure 6) remontent vers la surface du plateau et viennent se raccorder au nord avec le plan incliné et se perdre au sud dans les dédales des zones du Gruyère ou des Petites Fractures. Les profils transversaux montrent deux types caractéristiques : soit une forme en « V » (figure 7A et photo 2), soit une forme en « U » compliquée par des banquettes basales (figure 7B) ou sommitales et plus rarement par des encoches basales (figure 7B').

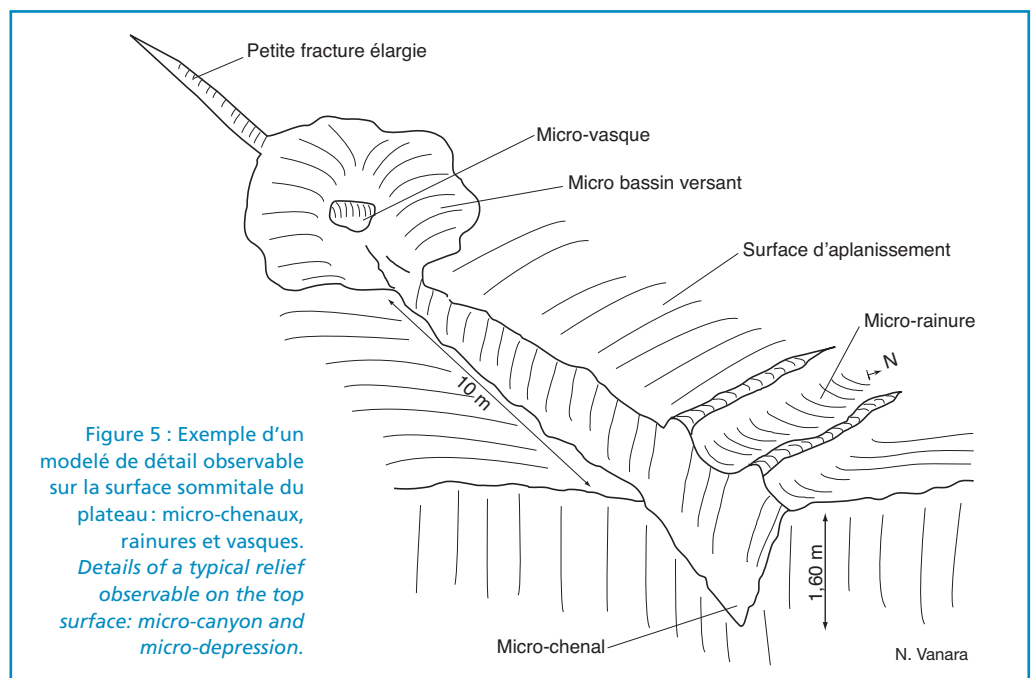


Figure 5 : Exemple d'un modelé de détail observable sur la surface sommitale du plateau: micro-chenaux, rainures et vasques. *Details of a typical relief observable on the top surface: micro-canyon and micro-depression.*

Les salles souterraines. Quatre salles ont été localisées. La Coquille et la Grande Grotte présentent un développement de 20 et 45 m. Les grottes « Préhistorique » et du Tacot sont constituées d'une unique salle (figure 3). Un effondrement de la voûte (photo 3) permet de pénétrer dans la salle principale de la Grande Grotte, haute de 7 mètres, dont la morphologie générale est conditionnée par le pendage de 45° orienté vers le sud (élargissement d'un joint de strate). La grotte du Tacot présente un plafond en voûte accidenté par un surcreusement développé sur faille N30°/90° (large de 0,5, haut de 1,5 et long de 3 m) et des pendants sur strates. Les parois et les galets « encroûtés » attestent que cette forme n'évolue plus que par biocorrosion (figure 8).

Les galeries. La galerie la plus importante est celle du Tunnel, de 12 m de développement (figure 3 à l'ouest). Cependant ce sont surtout dans les zones des Petites fractures et plus encore du Gruyère que les galeries se multiplient, formant un labyrinthe complexe (photo 4 et page IV de couverture). On estime que le volume global des vides rocheux doit avoisiner le tiers du volume total du secteur dit du Gruyère. De section généralement circulaire (type galerie forcée) ou oblongue, ces galeries présentent plus rarement une forme en trou de serrure (figure 9A). Par abaissement de la surface du plateau, il n'est pas rare que leur continuité soit interrompue par des effondrements de voûte (figure 9B). Il a parfois été possible de reconnaître un paléo-sens de circulation (§ III.B). On note, en plusieurs points, des

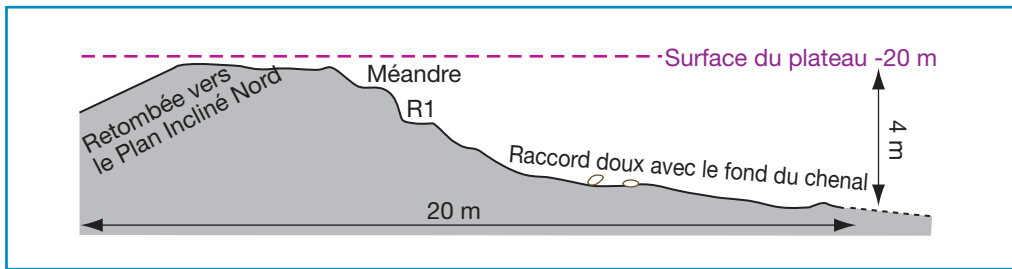


Figure 6 : Profil en long type de l'extrémité d'un chenal montrant le raccord de ce dernier avec la surface du plateau.
Typical longitudinal section of a canyon, showing its relationship with the surface of the plateau.

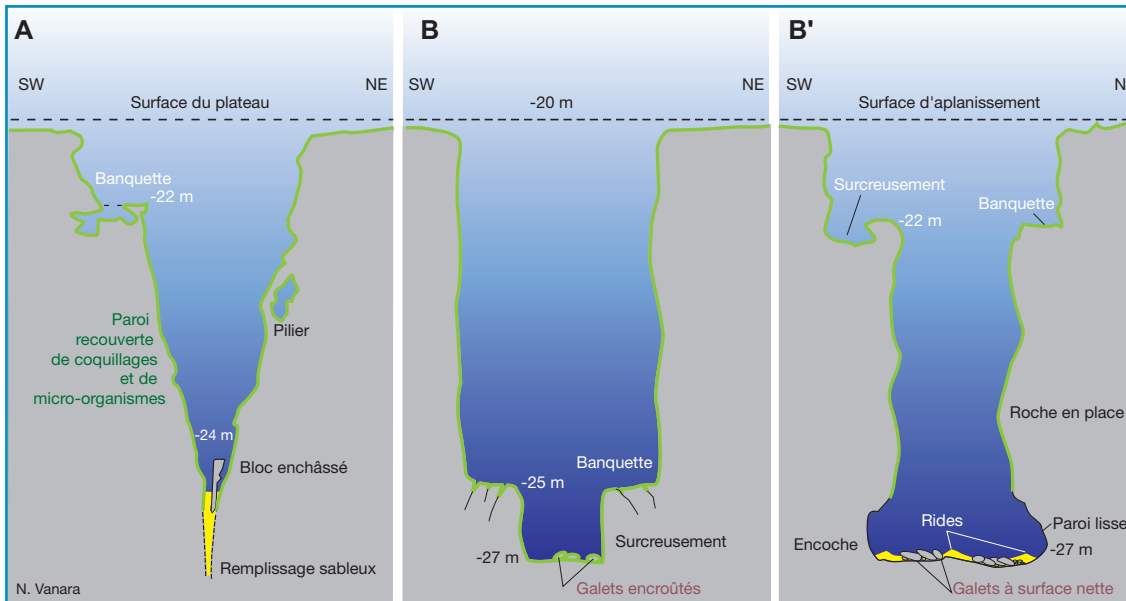


Figure 7 : Les profils transversaux des chenaux de surcreusement montrent deux types caractéristiques : 1/ forme en "V" (A), 2/ forme en "U" à banquettes basales ou sommitales (B) ou à encoches basales (B').
Cross-sections of the canyons have the following characteristics: 1/ section in "V", 2/ section in "U" with basal or top banks (B) or basal notches (B').

chenaux de voûte dont la largeur et la hauteur varient de 0,2 à 0,4 mètre et dont la longueur peut dépasser 1 à 2 mètres. Ces chenaux semblent se développer indépendamment des fractures. Ils serpentent sur quelques décimètres, puis se raccordent à des fractures, deviennent alors rectilignes et s'étirent vers le haut.

Les arches. Les arches, nombreuses et de tailles diverses (figure 3), résultent de l'effondrement du toit d'une galerie (arches Ouest, du Toit Percé, Reclu) ou de l'effondrement d'une voûte de grotte (arche de la Grande Grotte, photo 5).

Les pitons résiduels. La zone des Chicots présente une surface chaotique (figure 3). Le Chef Chicot et le pic Chevelu – reliefs résiduels isolés majeurs de 7 à 10 m de haut (photo 6) – s'opposent à d'autres zones où les pointements rocheux (2 à 3 m de haut) rapprochés se multiplient (photo 7). Ce relief ruiniforme résulte du démantèlement des strates très redressées de la bordure sud du massif.

B. Les modelés d'accumulation

Les chaos de blocs. Ils attestent de l'efficacité de l'érosion marine actuelle (photo 8). Ils proviennent 1/ de l'effondrement des voûtes

des grottes et des galeries par l'abaissement progressif de la surface du plateau qui vient recouper les vides sous-jacents; 2/ du démantèlement des pointements rocheux, des plans inclinés et du tombant par recul des parois. Les accumulations les plus nombreuses sont observables au pied des bordures du plateau (figure 10) et dans les zones des Chicots et des Petites Fractures.

Les accumulations de galets. On distingue deux grands types de dépôts. Des galets « en vrac » sont visibles au fond de certains chenaux et au pied du plan incliné nord. Plus intéressants sont les galets

Photo 2 : Chenal à forme caractéristique en "V" (cliché A. Perré). Les Coéléntérés rencontrés sur le plateau sont concurrencés, sur les parois des chenaux, par les gorgones et des espèces sciaphiles telles que les anémones *Corynactis viridis*, *Leptosammia pruvoti*, *Cayophyllia* et *Parazoanthus*. On trouve aussi *Alcyonium glomeratum*, un corail mou fréquent à Aroca, bien que peu répandu en Atlantique.



A channel in form of a "V". On channel walls, the coelenterata of the top surface compete with gorgonaceae and sciaphytes as anemones. A flacid coral, quite rare in the Atlantic, is often seen on Aroca.



Photo 3 : L'entrée de la Grande Grotte (cliché A. Perré).
The entrance of the Grande Grotte.

triés (Grande Allée) ou même formant des pavements (chenal du Tube). L'échantillon n° 656, prélevé dans la Grande Allée (figure 3), révèle des éléments de 2 à 6 cm de grand axe comprenant une majorité d'éléments allochtones très bien roulés (essentiellement granite, quelques grès et basalte) et de rares galets autochtones aux angles parfois

encore visibles (calcaire). Dans la grotte « Préhistorique », le pavement s'organise en spirale : les galets sur chant, colonisés, solidement imbriqués « s'enroulent » vers le centre de la cavité (photo 9). Plusieurs hypothèses sont envisageables : cryoturbation ? Mécanique des fluides, conditionnée par la forme arrondie de la salle, ayant pu favoriser des phénomènes tourbillonnaires ?

La plaine sableuse. Des sables recouvrent la plaine qui borde le massif au sud, à l'est et à l'ouest. Ces placages présentent des rides symétriques parallèles de longueur d'onde 0,5 m et d'orientation N° 35, en concordance avec la direction ONO/ESE de la houle dominante (figure 10).

III. Les facteurs explicatifs

A. Un massif calcaire d'âge éocène

Détermination de la nature et de l'âge des roches. La géologie du massif est actuellement basée sur les schémas géologiques interprétatifs établis par extrapolation des cartes géologiques du continent [Augris,

Figure 8 : Vue en coupe de la grotte du Tacot, constituée d'une salle circulaire unique. Noter le chenal de voûte sur faille et les formes de plafond (pendeloques). The Tacot cave is made of a single round room.

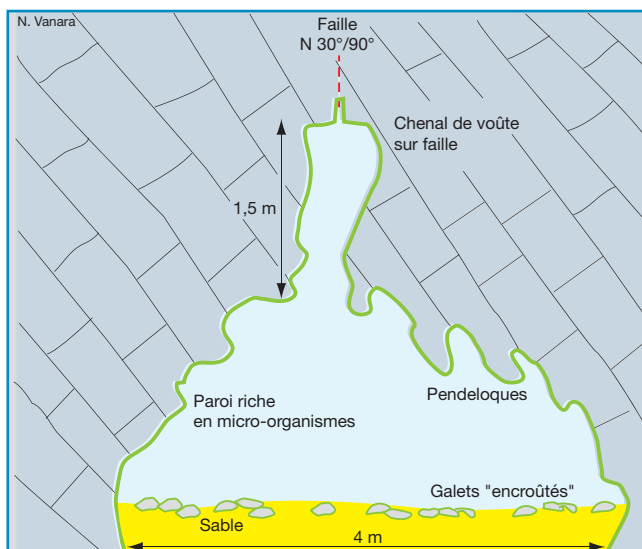


Photo 4 : La multiplication des galeries transforme la zone du Gruyère en un véritable labyrinthe (cliché A. Perré). The many passages transform the Gruyère zone into a complicated labyrinth.

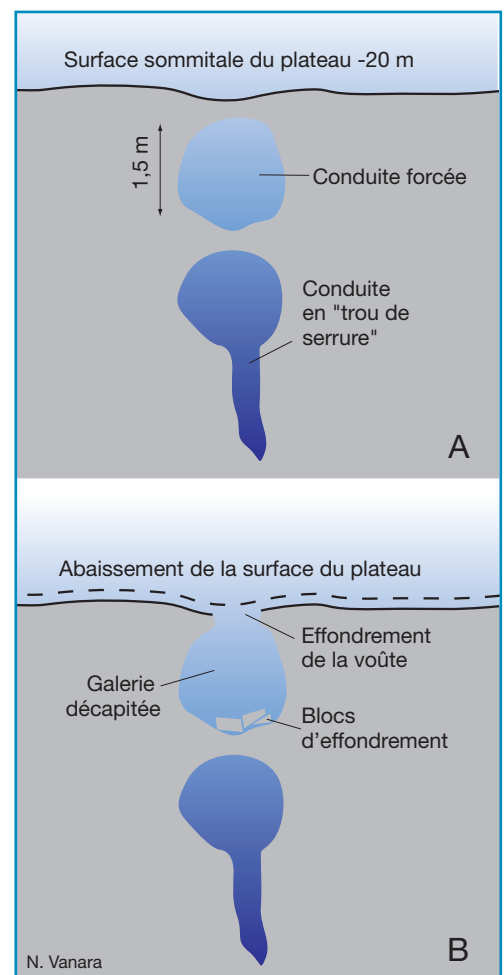


Figure 9 : Profil type et évolution des galeries par érosion de la surface du plateau. Typical cross-sections showing the evolution of the passages following the top surface erosion.



Photo 5 : L'arche de la Grande Grotte résulte de l'effondrement de la voûte de la salle. *The arc of the Grande Grotte results from collapse of the ceiling.*



Photo 6 : Pointement rocheux majeur (> 5 m de haut) de la zone des Chicots (cliché A. Perré). *A tooth, more than 5 m high, in the area of chicots.*

1999]. Afin de préciser l'âge des couches, cinq échantillons (n° 778 à 782, calcaires massifs) ont été prélevés du sud au nord dans la Grande Allée et un échantillon complémentaire (n° 783, marnes, -36 m) a été remonté du tombant sud (figure 3). Les microfossiles des cinq premiers échantillons (Nummulites, Discocyclines, Amphistegines, Corallinacées et rares Globigérines observées en lames minces) indiquent un âge éocène, confirmé par la présence d'un foraminifère benthique (échantillon n° 782) : *Gyroidinella magna* (connu à partir de l'Yprésien terminal et dans le Lutétien). L'assemblage de nannofossiles de l'échantillon n° 783 est caractéristique de la biozone NP16 (Lutétien supérieur à Bartonien, déterminations P. Masse et F. Ricciardi, CST Total, Pau). Les âges reconnus et le plongement des couches vers le sud indiquent donc une série normale, non inversée.

Les études des affleurements continentaux montrent que les dépôts profonds du Paléocène supérieur à l'Yprésien, voire du Lutétien inférieur, constituent la dernière mégaséquence de comblement du bassin



Photo 7 : La zone des Chicots présente une surface très chaotique en raison de la multiplication des pointements rocheux de 1 à 4 mètres de haut (cliché A. Perré). *The area of chicots shows a chaotic surface due to the many rocky teeth which have a height between 1 and 4 m.*



Photo 9 : La grotte « Préhistorique » tient son nom du pavage caractéristique qui tapisse son fond : galets sur chant s'enroulant vers le centre de la cavité. Ce phénomène suggéra aux nombreux plongeurs qui visitaient le site qu'il ne pouvait s'agir que d'un travail réalisé autrefois par la main de l'homme, lorsque la cavité était émergée (cliché A. Perré). Pourtant, des observations réalisées sur la retombée nord du massif, dans les épandages de galets, ont mis en évidence l'existence de couloirs de galets sur chant. La multiplication de ce type d'agencement plaide donc en faveur d'un phénomène naturel, dont l'explication reste à préciser (cliché A. Perré). *The "Grotte préhistorique" was named because of its strange pavement of cobbles, here well ordered in a spiral. One thought of hand made work either by the numerous divers visiting the site or by prehistoric man at a time when the site was above water. But numerous other pebble organizations observable on the site let us think of a natural (though still unexplained) phenomenon.*



Photo 8 : Ce chaos de blocs provient de l'effondrement d'une partie de la paroi de la Grande Allée (cliché A. Perré). *This block chaos is due to a breakdown of a wall part of the Grande Allée.*

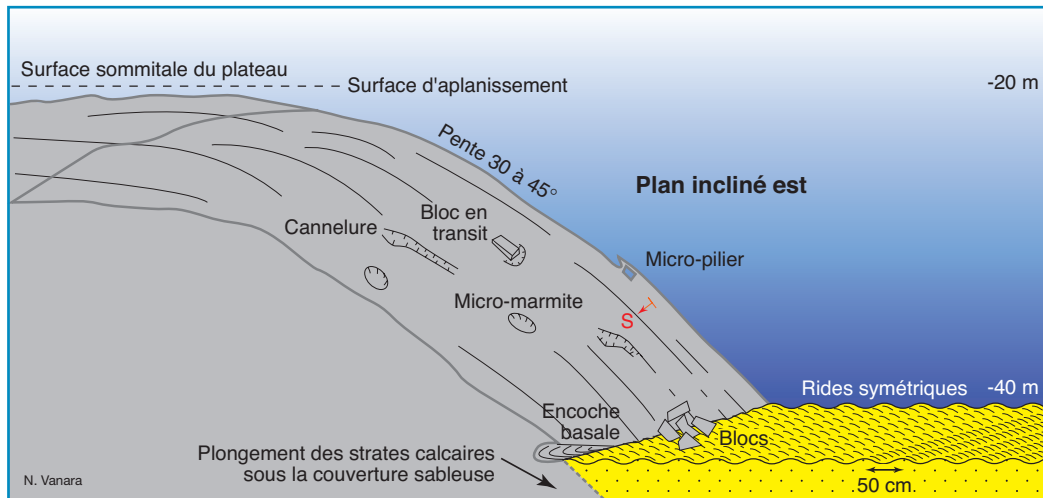


Figure 10 : Les plans inclinés s'abaissent progressivement à l'est (pente de 30 à 45°) sous la couverture sableuse.
The eastern inclined plane (inclination between 30 and 45°) disappears gradually under the bottom sandy cover.

nord-pyrénéen occidental, avant son charriage vers le nord, à partir du Lutétien supérieur, sur le bassin d'avant-pays prépyrénéen toujours profond et ouvert sur le golfe de Gascogne [Razin, 1989]. Ce bassin sera progressivement comblé par les formations marines oligo-miocènes progradantes vers l'ouest [Kieken, 1973].

Reliefs et modelés en accord avec la structure. Certains modelés sont en accord avec la structure géologique. Les bordures du massif sont dissymétriques: les pentes relativement douces des plans inclinés s'opposent à la paroi verticale, parfois même surplombante du tombant sud (40 m). Ce dernier tombant correspond aux strates localement verticalisées de la bordure méridionale. A l'est, le plan incliné, d'une hauteur de 20 m, présente une longue pente de 30° dans sa partie haute et de 45° dans sa partie basse (abaissement des strates calcaires sous la couverture sableuse). Les parois sont accidentées par des microformes (excavations, marmites, piliers) influencées par le pendage sud. Le contact avec la plaine se fait avec ou sans encoche basale, mais toujours

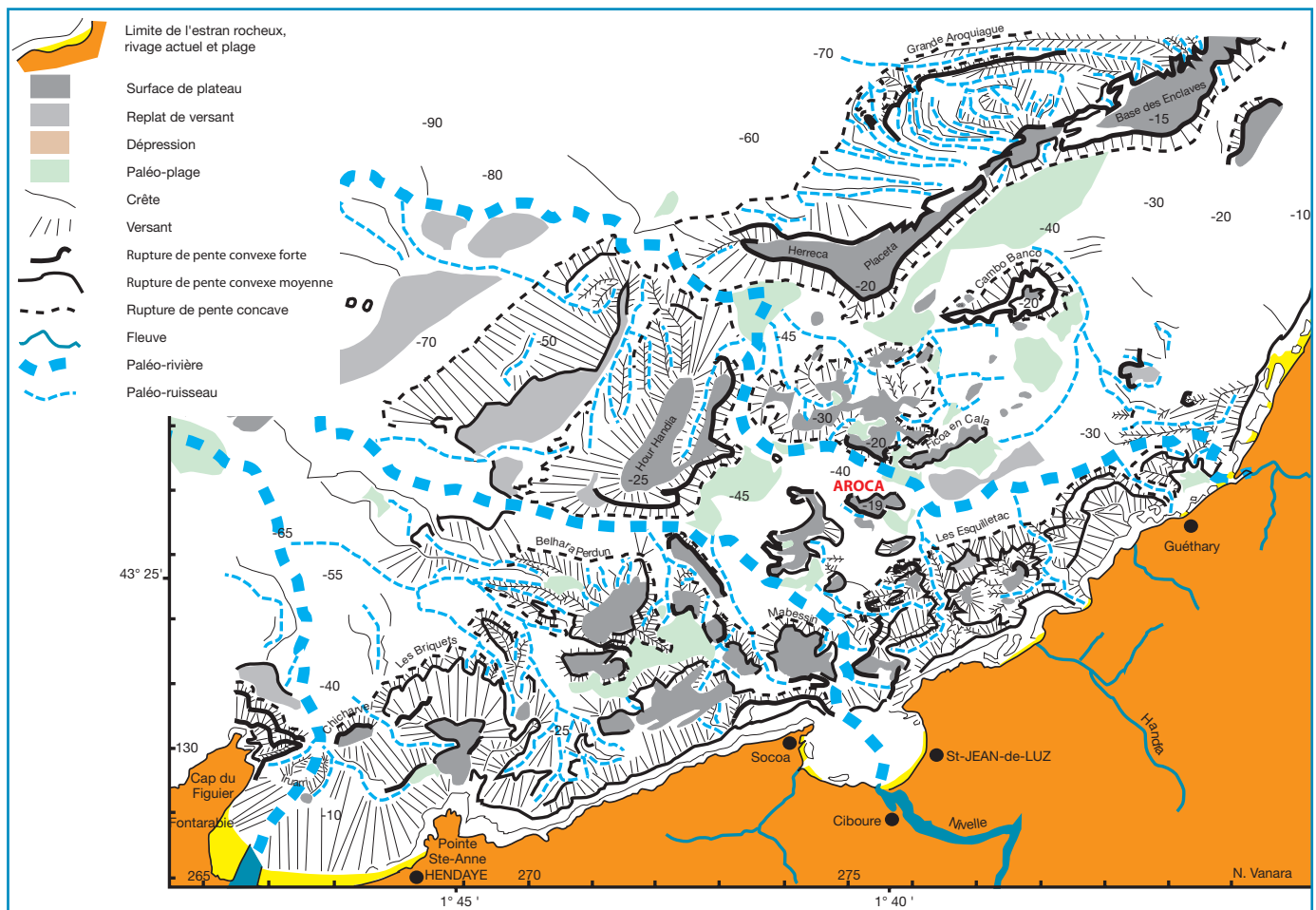


Figure 11 : Carte géomorphologique du bassin interne de Saint-Jean-de-Luz lors du bas niveau marin de la dernière période froide (glaciation wurmienne). Le niveau de base, 120 m plus bas que l'actuel, entraîne l'émergence des plateaux, l'encastement du réseau hydrographique et par voie de conséquence la mise en place d'un karst fonctionnel. Le plateau d'Aroca n'est donc que l'un des nombreux pointements rocheux qui ont été émergés durant cette période. *Geomorphological map of Saint-Jean-de-Luz basin. Reconstitution for the last cold period (Wurmian) when the sea level was 120 m lower than at present. At that time, the subaerial exposure allowed active karstification.*

avec de la roche colonisée par des coquillages (figure 10). La zone démantelée des Chicots correspond à l'enrichissement progressif en marnes des strates lutétio-bartoniennes, d'où une moins bonne résistance à l'érosion. Les fractures conditionnent le développement des chenaux de surcreusement. Les joints de strates sont à l'origine de formes majeures (Grande Grotte) et de micro-modelés (pendants, cavitations...).

B. L'évolution continentale passée : la karstogénèse

Lors du maximum glaciaire (glaciation weichsélienne) daté de 18 000 ans BP, le niveau marin se situait à -120 m par rapport au niveau actuel (figure 11). La remontée du niveau marin s'amorce vers 16 000 ans BP et, vers 15 000 ans BP, la cote -100 est atteinte [Bard, 1992 et 2005 ; King, 1974 ; Augris et Clabaut, 2001]. Le plateau calcaire émergé subissait alors les effets de l'érosion météorique comme certaines formes caractéristiques en témoignent.

Le Tunnel forme, à l'extrême ouest d'Aroca, un chenal remarquable au plafond partiellement décapité (figures 12). Sa longueur est d'une cinquantaine de mètres dont une petite quinzaine de mètres de galeries : le Tunnel (tube de section oblongue d'environ 2 m de large et de 1,5 m de haut) et l'arche Ouest (moins de deux mètres). L'orientation du chenal est nord-sud, avec un paléo-écoulement net vers le sud conforme au pendage. Au sud de l'arche Ouest, on observe un magnifique surcreusement de moins d'1 mètre de large et de 2,5 mètres de profondeur. Des traces d'érosion pariétale sont observables. Des galets (échantillon n° 657), garnissent le fond de la galerie. L'analyse de cet échantillonnage révèle une majorité de galets allochtones (72 % : granite, quartz rare) et une proportion plus faible de galets autochtones (28 % : calcaire). Vers l'aval (au sud), le chenal est décapité au niveau d'une surface plane sans relation avec la structure (figure 12, profil 4). Le méandre est de plus en plus surcreusé et présente des banquettes pariétales caractéristiques d'un écoulement à surface libre avec dynamique d'érosion régressive. Une telle morphologie n'a pu se mettre en place que dans un contexte d'écoulement à sens unique (ici vers le sud) et ne peut s'expliquer par une érosion mécanique d'origine marine, ni même par une dynamique d'érosion mécanique de platier, certes à surface libre, mais dont l'écoulement serait tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Vers l'aval, la forme générale du méandre s'évase et se raccorde avec la plaine sableuse.

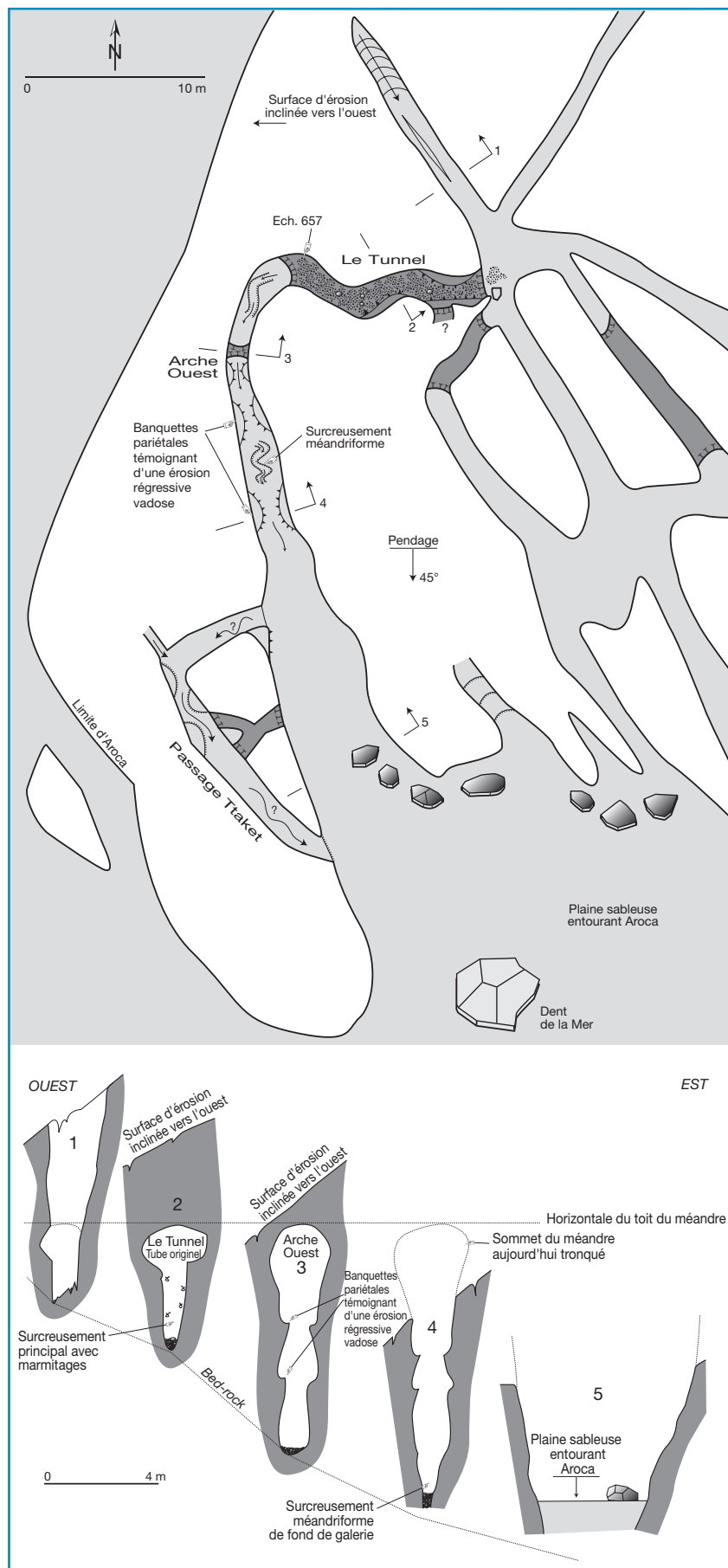
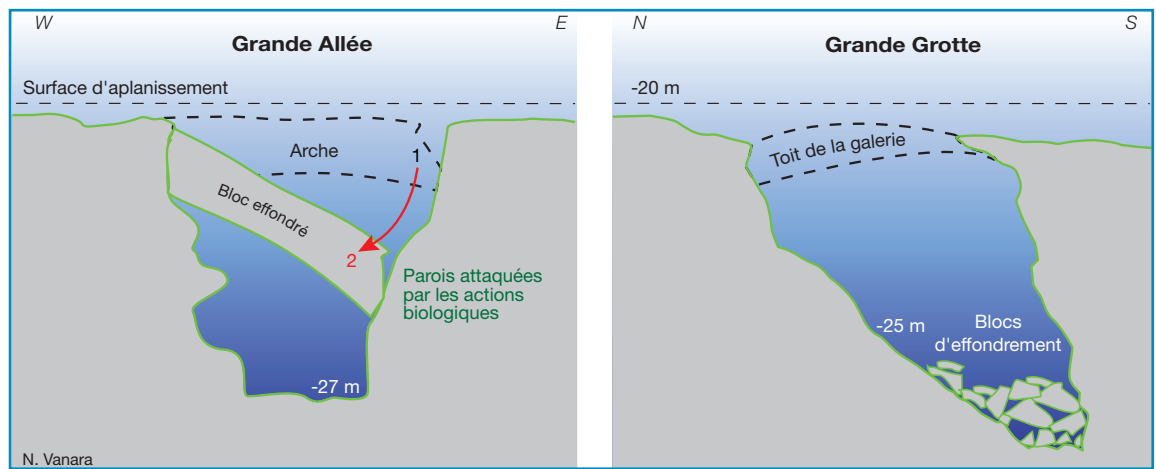


Figure 12 : Carton géomorphologique et sections de l'extrême ouest du secteur étudié. Le tunnel possède les caractéristiques d'un creusement à surface libre (massif exondé lors des périodes de bas niveau marin). Detailed geomorphologic survey and typical cross-sections of the far west. The Tunnel shows the features of a karst that was active under vadose conditions when the massif was above sea level.

Figure 13 : Deux exemples de dynamique gravitaire : glissement d'une arche observable dans la Grande Allée et effondrement d'une partie de la voûte de la Grande Grotte. Two examples of erosion by gravity. Sliding of an arc (Grande Allée), and collapse of a roof (Grande Grotte).



C. L'évolution marine actuelle, le démantèlement des formes karstiques

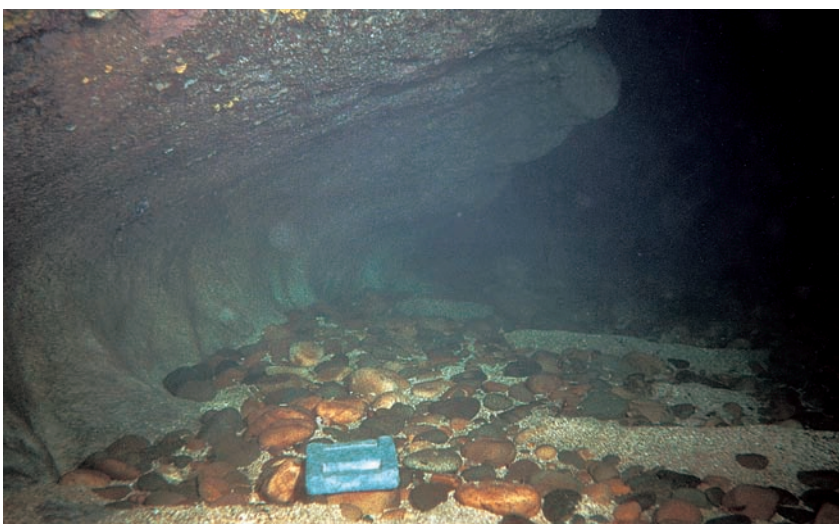
Les observations effectuées *in situ* permettent d'attribuer à chaque agent d'érosion une efficacité inégalement répartie au sein du massif calcaire.

Les tempêtes et la houle. Le domaine maritime basque appartient à la catégorie des plates-formes dominées par une très forte énergie hydrodynamique engendrée par les flux dépressionnaires d'ouest. La côte basque subit parfois l'assaut de très fortes tempêtes : l'amplitude cinquantennale de la houle observée dépasse 11 m, avec des périodes longues atteignant 20 s [Delorme, 1978]. On peut attribuer à ces événements exceptionnels les encoches basales observables au pied des plans inclinés actuellement colonisés en l'absence de tempête récente. Les courants de retour occasionnés par les grandes tempêtes – mal connus – doivent avoir peu d'impact sur l'évolution du massif. C. Cirac *et al.* [2000] et C. Augris [1999] pensent qu'ils sont responsables de l'élongation des placages sableux de la plaine entourant le massif.

La situation particulière du plateau continental basque, au fond du golfe de Gascogne, l'expose directement aux fortes houles de l'Atlantique, formées très au large et arrivant sur le littoral sans obstacle. Leur période moyenne est de 10 s et leur hauteur significative moyenne est de 2 m [Augris, 1999]. Les houles sont les agents essentiels des mouvements sédimentaires. Pour les plongeurs, la conséquence la plus immédiate est le brassage des limons fins et des argiles. Ces troubles migrent avec facilité, mais se déposent difficilement. Les périodes d'eau claire restent l'exception, ce qui rend difficile la réalisation de photographies correctes. En l'absence, en profondeur, d'une vitesse de courants généraux suffisants (de l'ordre de 0,1 m/s) [Bellessort et Migniot, 1987], seule la houle peut engendrer et entretenir les mégarides (longueur d'onde comprise entre 1 et 2 m) et les rides (longueur d'onde 0,5 m) symétriques (absence de déplacement des particules sableuses) observables jusqu'à une profondeur de 45 m, sur les placages sableux d'une épaisseur suffisante (1-2 m). Leurs crêtes, d'orientation constante N° 35, indépendante de celle des placages sableux considérés, sont en concordance avec la direction ouest-nord-ouest de la houle dominante [Augris, 1999].

La houle est aussi responsable de l'approfondissement actuel des chenaux (figure 7). Dans la Grande Allée, on observe, dans les endroits les plus larges, une encoche haute de 50 cm et profonde de 70 cm à la surface parfaitement polie. L'absence de colonisation par la flore et la faune marine atteste de l'efficacité actuelle du polissage (photo 10). Sur le fond du chenal, des rides symétriques (va-et-vient des sédiments lors des moyennes et fortes houles, observations *in situ*) montrent des crêtes composées de sables moyens et fins et des creux piégeant des cailloutis émoussés et des sables grossiers (photo 11). Les houles qui proviennent essentiellement du secteur

Photo 10 : Encoche basale observable dans la Grande Allée. Les parois polies et non colonisées attestent de la fraîcheur de cette forme attribuable au travail de la houle (cliché A. Perré). Basal notch in the Grande Allée. The polished wall without flora and fauna shows a recent formation that we attribute to heavy tide.



ouest à nord-ouest, renforcées par les éventuels effets de convergence sur le haut-fond d'Aroca, exploitent les diaclases et fractures proches de ces directions (chenaux d'orientation NNW). Le phénomène, qui a pu s'enclencher lors d'un bas niveau marin (contexte de platier), perdue aujourd'hui par phénomène de rétroaction positive : les zones les plus encaissées montrent les encoches les mieux marquées car elles bénéficient au mieux d'un effet Venturi.

La dissolution et les actions biochimiques. L'équilibre du calcaire en milieu marin est complexe et mal connu [Faure, 1991]. Mais il est évident que les transferts de calcaire – dans lesquels les êtres vivants jouent un rôle prépondérant – sont très importants du point de vue géomorphologique. Les actions chimiques *stricto sensu* sont impossibles à séparer des actions biologiques ; ces dernières sont particulièrement efficaces sur un substrat essentiellement composé de calcaires tendres.

L'étude en section polie d'un échantillon de roche éocène (échantillon n° 781) montre une répartition des attaques de la faune et de la flore. La photo 12 montre de gauche à droite :

- 1/ à plus de 3 cm de profondeur dans le calcaire, la roche saine ;
- 2/ en dessous de 3 cm de profondeur, la roche perforée (60 % de la surface) par les mollusques lithophages (*Gastrochaena dubia*, détermination O. Martine), ce qui réduit considérablement sa cohésion ;
- 3/ en surface (au contact avec la masse liquide), la roche qui ne possède plus aucune cohésion (roche pourrie) est colonisée par les algues vertes, brunes ou rouges dont les crampons achèvent de morceler la roche.

Les formes d'ablation proviennent aussi bien de l'attaque mécanique des perforateurs de toutes sortes que de la corrosion par les produits sécrétés par les êtres vivants, tels les acides de certaines algues. Ils accroissent la corrosion (perte de cohésion de la roche) et les surfaces de contact (« digestion de la roche » par recouvrement des différents alvéoles), provoquant ainsi la destruction progressive d'une couche de calcaire de près de 3-5 cm.

La gravité. La roche ainsi fragilisée peut être reprise par une dynamique gravitaire : détachement de blocs le long des parois, chute de blocs volumineux (effondrement d'arche, de toit de galerie ou de grotte, recouvrement de chenaux ou recouvrement de galeries et de chenaux), basculement de pointements rocheux (figure 13).

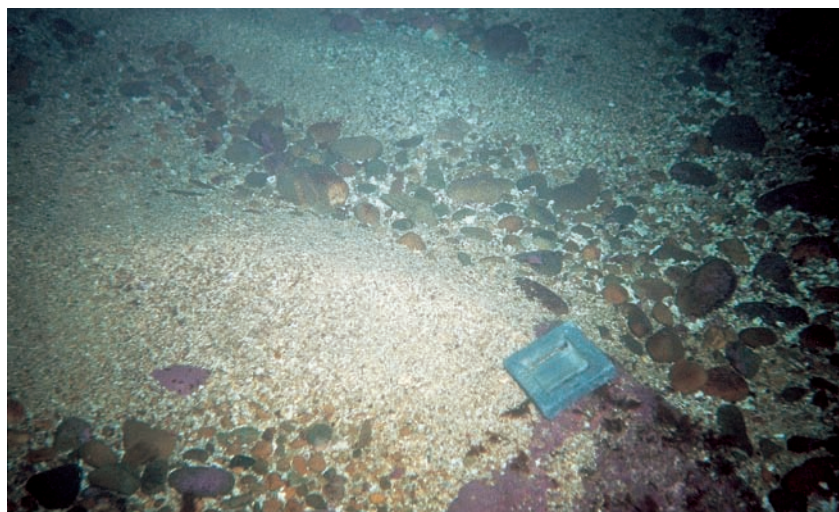


Photo 11 : Rides symétriques sableuses observables dans le fond de la Grande Allée attribuable aux actions actuelles de la houle (cliché A. Perré). *Symmetric sand ripples at the bottom of the Grande Allée attributed to tide.*

IV. Reconstitution paléo-géographique

Les descriptions et les interprétations précédemment énoncées permettent de proposer la reconstitution paléo-géographique suivante.

Un plateau calcaire. Après la sédimentation marneuse de l'Oligocène, la mer se retire progressivement au Miocène sans qu'une chronologie précise puisse être proposée en raison de la rareté des dépôts corrélatifs [BRGM, 1977]. La plate-forme exondée est alors soumise aux processus météoriques. Le site d'Aroca exondé, mais proche du niveau de base, évolue sous couverture marneuse au Pliocène : l'évolution se fait vraisemblablement par altération chimique quasi isovolumique du calcaire en place (fantôme de roche) [Vergari, 1998]. On peut rattacher à cet épisode les galeries plus ou moins cylindriques développées sur des joints de strates ou diaclases directrices (figure 14).



Photo 12 : Cette section polie de roche éocène (échantillon 781) montre l'action perforatrice des lithophages sur les trois premiers centimètres : "digestion de la roche" par recouvrement des différentes alvéoles. Les mollusques responsables sont *Gastrochaena dubia* qui enduissent les parois des cavités où ils se logent, d'une sécrétion calcaire (détermination O. Martine, cliché N. Vanara). *This polished section of an Eocene rock shows a perforation by lithophagus (3 cm) and a sponge structure with numerous alveoles due to *Gastrochaena dubia*, a mollusc which coats its cavity with a calcareous secretion.*

	Périodes et âges	Phases tectoniques	Episodes eustatiques	Morphogenèse et karstogenèse	Illustrations en plan	Illustrations en coupe	
Q u a t e r a i r e	Holocène	Actuel	Haut niveau marin	<ul style="list-style-type: none"> Erosion marine Action bio-chimique Ecroulement 			
		Boréal 9000	Niveau marin -23 m Transgression flandrienne	<ul style="list-style-type: none"> Platier Surface d'aplanissement 			
	Pléistocène supérieur	Würm -18000	Régression marine -120 m	<ul style="list-style-type: none"> Encaissement des vallées bordières Dépôt de terrasses alluviales Activation du karst (circulation vadose) 			
	Pléistocène inf. et moyen	1,8 ma	Surrection régionale liée à la tectonique pyrénéenne	Episodes glacio-eustatiques	<ul style="list-style-type: none"> Succession d'émersions et de submersions Décapage de la couverture marneuse 		
	Pliocène	6 ma	—	Emersion	Altération chimique isovolumique probable (galeries sur diaclases et joints de strate)		
T e r t i 	Miocène	25 ma	—	Retrait progressif de la mer	Emersion		
	Oligocène	37 ma	Phase tectonique majeure pyrénéenne	<ul style="list-style-type: none"> Mer profonde Sédimentation marneuse 	Induration des argiles → marnes		
	Éocène	55 ma	—	<ul style="list-style-type: none"> Mer peu profonde Sédimentation calcaire 	Induration des dépôts carbonatés → roches calcaires		

Figure 14 : Tableau synthétique de l'évolution d'Aroca depuis le Miocène (H: Hendaye, S-J: Saint-Jean-de-Luz, G: Guéthary, A: Aroca). Synthetic table showing the evolution of Aroca from Miocene to present.

Au Pléistocène supérieur avec le fort abaissement du niveau de base, notamment au Würm où la régression a été maximale vers -18 000 B.P., les cours d'eau s'étirent vers une côte plus basse de 120 m et plus occidentale que le rivage actuel par des vallées encaissées d'orientation SSE-NNW. Au sud de Biarritz, la côte est formée de falaises interrompues par des vallées qui débouchent dans la mer par l'intermédiaire de baies plus ou moins vastes. Ces formes se prolongent en mer par des vallées sous-marines creusées dans le substratum. Trois paléo-vallées sont très nettement localisables : deux vallées sous-marines encadrent les roches Hour Handia (paléo-Handia et paléo-Nivelle). Une dernière vallée, au nord, est bordée à l'est par des affleurements rocheux orientés WNW/ESE (saillant situé dans le prolongement de Belhara Perdun) : la paléo-Bidassoa (figure 11).

A cet épisode, on peut rattacher les graviers émoussés et les galets piégés dans le « bassin interne » qui n'ont pas

de relation avec les hydrodynamismes actuels [Augris, 1999]. Ils représentent les reliques de terrasses alluviales anciennes mises en place en période de bas niveau marin et remaniées lors de la dernière transgression à l'Holocène. Les galets proviennent soit de la chaîne pyrénéenne via les paléo-rivières (environ 70 % des dépôts) soit des massifs rocheux proches (environ 20 % des dépôts). L'approfondissement des vallées bordières et donc du niveau de base local a pour conséquence une augmentation du potentiel hydrodynamique, essentiel pour la réactivation du karst sous réserve de l'existence de fissures en extension [Havron, Quinif et Vandycke, 2004]. Les surcreusements en trou de serrure et les galeries étagées témoignent vraisemblablement de cet épisode d'écoulement libre des eaux en zone vadose (figures 9 et 12).

Un platier (phase d'aplanissement). La remontée générale du niveau marin qui débute à partir de 15 000 ans

B.P. ne s'effectue pas avec régularité [Bard, 1992 et 2005; King, 1974], mais par paliers dans le temps. Une phase de stabilisation d'âge boréal (9 000 BP) permet l'établissement d'un paléo-rivage à la côte -20/-30 m [Duplantier, 1976; Carbonal *et al.*, 1977] avec un niveau marin établi à la cote -23 m [Froidefond, 1985]. Durant cet épisode, la houle venait se briser sur l'arc d'affleurement rocheux Chicharvel-Esclaves. Le bassin intérieur fut progressivement envahi par la mer qui pénétra dans cette dépression par les deux « chenaux » qui encadrent les brisants d'Hour Handia se transformant en baie protégée par des écueils. Le plateau d'Aroca se trouve alors dans la zone de déferlement des vagues particulièrement efficaces pour l'établissement d'une plate-forme d'érosion littorale qui recoupe l'ensemble des strates éocènes redressées (surface tabulaire sommitale du plateau, figure 4).

Un haut-fond. D'après J.-M. Froidefond [1985], l'élévation du niveau

marin à partir de 7500 B.P. a été rapide de -23 à -8 m, puis plus lente entre -8 et le niveau actuel. Aujourd'hui la mer a bloqué la karstification sur le plateau d'Aroca dans l'état où il se trouvait au moment de l'ennoiement par les eaux océaniques.

Ainsi, paraît démontré un façonnement subaérien initial précédant les conditions de plate-forme littorale puis de haut-fond, la préparation du matériel (karstification) constituant un préalable essentiel aux remaniements marins actuels et aux modelés qui en résultent.

Conclusion

L'étude d'Aroca montre tout l'intérêt que peuvent présenter des observations précises effectuées dans le domaine côtier. Il serait donc souhaitable que ce genre d'investigation puisse se multiplier dans les années à venir car elles apportent un complément indéniable aux descriptions réalisées à plus grande profondeur [Vanney, 1979; Dubois, Sorriaux et Soudet, 1993]. Cependant la tâche des chercheurs est compliquée par le fait que les cartes marines ne sont

pas assez précises à l'échelle requise. Une première phase indispensable, mais longue à réaliser, consiste en l'établissement d'une cartographie-topographie du lieu d'étude afin de pouvoir ensuite situer de façon précise les formes et phénomènes observés. L'autre difficulté réside dans l'impossibilité de réaliser les sorties par mer agitée et évidemment encore moins lors des périodes de tempête, ce qui donne forcément une image tronquée des agents d'érosion marins actuels. Pourtant l'observation des encoches et des fonds de chenaux aux roches parfaitement polis laisse deviner l'efficacité érosive de la houle armée par le sable et les galets. Notre recherche a été limitée à un secteur restreint. D'autres affleurements rocheux mériteraient une étude, notamment et à titre de comparaison les hauts-fonds isolés de Ficoa en Cala (-20/-30 m) et Cambo Banco (-20 m), taillés également, *a priori*, dans les calcaires éocènes (figures 2 et 11). L'étroite bande des calcaires paléocènes pourrait aussi être étudiée sur les hauteurs dominant les Briquets. L'ensemble Chicharvel-Base

des Enclaves-Chouroubiague constitue un vaste secteur de recherche accessible aux plongeurs (-15, -25 m), mais où l'éloignement à la côte pose des difficultés techniques supplémentaires (8 km pour Placeta depuis le port de Guéthary). Leur position, face au large, lors de la phase de stabilisation du niveau marin permettrait d'en savoir plus sur le paléorivage au Boréal. Enfin suivre les anciennes vallées quaternaires, aujourd'hui ennoyées, serait certainement riche d'enseignements, mais ces domaines requièrent des plongeurs aguerris puisque les profondeurs sont nettement supérieures (-40, -50 m). Nul doute qu'un champ de recherche prometteur s'offre aux plongeurs-karstologues.

Remerciements

- P. Masse et F. Ricciardi (CST Total, Pau) pour la détermination des fossiles;
- Comités départementaux de spéléologie 64 et 65 pour les subventions accordées;
- les clubs de plongée Pau-Océan et Pottorua Sokoa pour le soutien logistique;
- M. Faget, P. Lacombe-Cazal et A. Lebrun de la Commission biologie du Club sous-marin Pau Océan pour leur aide à la détermination de la faune et de la flore.

Bibliographie

- AUGRIS C. coord., 1999** - *Le domaine marin côtier du pays Basque (Pyrénées-Atlantiques). Carte morpho-bathymétrique et carte des formations superficielles*. I.F.R.E.M.E.R., Plouzané, 32 p.
- AUGRIS C. et CLABAUT P., 2001** - *Cartographie géologique des fonds marins côtiers. Exemples le long du littoral français*. Coll. Bilans et perspectives, I.F.R.E.M.E.R., 75 p.
- BATTISTINI R., 1964** - *Etude géomorphologique de l'extrême sud du Madagascar. Le littoral*. Thèse de Doctorat, Université de Madagascar, Laboratoire de Géographie, t. 2, coll. Etude Malgache, Cujas, 636 p.
- BARD E. and BROECKER W., 1992** *edit.* - *The last deglaciation absolute and radiocarbon chronologies: proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*. Erice, Sicily (Italy), December 9-13, 1990, Springer-Verlag, Berlin, 344 p.
- BARD E., 2005** - *L'homme et le climat, une liaison dangereuse*. Coll. Découvertes Sciences et Techniques, Gallimard, Paris, 127 p.
- BELLESSERT B. et MIGNIOT C., 1987** - Partie C: *de l'estuaire de la Gironde à la frontière espagnole*. In *Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côte de la Manche et de l'Atlantique, de la baie du Mont-St-Michel à la frontière espagnole*. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France n° 65, Eyrolles, Paris, p. 369-552.
- BRGM, 1977** - *Bayonne. Carte géologique de la France au 1/50 000e et sa notice explicative*. Ministère de l'Industrie de la Poste et des Télécommunications, BRGM, Service Géologique National, n° XII-44, 1 carte, 7 p.
- CARBONEL P., DUPLANTIER F. et TURON J.-L., 1977** - Mise en évidence d'un paléorivage sur -30 m sur le plateau continental de la région de Capbreton (golfe de Gascogne). *Bull. Inst. Géol. Bas. Aquit., Bordeaux* n° 13, p. 127-143.
- CIRAC P., MANAU F. et BELLEC V., 2000** - Les formes sédimentaires du plateau interne aquitain reconnues par les méthodes acoustiques, in Elbee J. et Pouzet P. coord. - *Océanographie du golfe de Gascogne*. VIIe colloque international, Biarritz 4-6 avril 2000 n° 31, Ifremer - Laphy, p. 19-25.
- COLLINA-GIRARD J., 1996** - Préhistoire et karst littoral: la grotte Cosquer et les calanques marseillaises (Bouches du Rhône, France). *Karstologia* n° 27, p. 27-40.
- COURREGES M., 1997** - Le crypto-karst de la Péninsule du Médoc. Crypto-altération, dissolution, karst sous-marin et évolution quaternaire. *Quaternaire*, 8, (2-3), p. 289-304.
- DELANNOY J.-J., 1997** - *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst*. Thèse de doctorat d'état, Université de Grenoble 1, 678 p.
- DELORME J.-L., 1978** - Le port de Bayonne. *Bulletin Société des Sciences, Lettres et Arts de Bayonne*, congrès du Quatrième centenaire du détournement de l'Adour, Bayonne, 28-29 octobre n° 134, p. 477-505.
- DUBOIS P., SORRIAUX P. et SOUDET H.-J., 1993** - Rospo Mare (Adriatique), un paléokarst pétrolier du domaine méditerranéen. *Karstologia* n°21, p. 31-42.
- DUPLANTIER F., 1976** - *Etude sédimentologique de la zone côtière et du proche plateau continental de la région de Capbreton. Paléogéographie et évolution actuelle*. Thèse de 3^e cycle, Université de Bordeaux 3, Sciences de la Terre n° 1329, 131 p.
- FAURE G., 1991** - *Principles and applications of inorganic geochemistry: a comprehensive textbook for geology students*. Macmillan, New York, 626 p.
- FROIDEFOND J.-M., 1980** - Présentation d'une carte bathymétrique du proche plateau continental situé dans le sud du golfe de Gascogne entre Hendaye et Vieux-Boucau. *Bulletin Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine, Bordeaux* n° 28, p. 71-79.
- FROIDEFOND J.-M., 1985** - *Méthode de géomorphologie côtière. Application à l'étude de l'évolution du littoral aquitain*. Mémoires de l'Institut de Géologie du bassin d'Aquitaine n° 18, Université de Bordeaux 1, Talence, 273 p.
- HAVRON C., QUINIF Y. et VANDYCKE S., 2004** - Tectonique et karstification. Le cas de la région de Han-sur-Lesse (Belgique). *Karstologia* n° 43, p. 19-26.
- JAILLET S., 2005** - *Le Barrois et son karst couvert. Structure, fonctionnement, évolution*. *Karstologia Mémoires* n° 12, 320 p.
- KIEKEN M., 1973** - Evolution de l'Aquitaine au cours du Tertiaire. *Bulletin de la Société Géologique de France*, t. 16, 7, n° 1, p. 40-50.
- KING C., 1974** - *Introduction to marine geology and geomorphology*. Edward Arnold, London, 309 p.
- MAIRE R., 1990** - *La haute montagne calcaire*. *Karstologia-Mémoires* n° 3, 732 p.
- RAZIN P., 1989** - *Evolution tectosédimentaire alpine des Pyrénées basques à l'ouest de la transformante de Pamplona (province du Labour)*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 3, 464 p.
- SALOMON J.-N. et PULINA M., 2005** - *Les karsts des régions climatiques extrêmes*. *Karstologia Mémoires* n° 14, Presses Universitaires de Bordeaux, Pessac, 220 p.
- VANARA N., 2000** - *Le karst des Arbailles*. *Karstologia Mémoire* n° 8, 320 p.
- VANNEY J.-R., BELLAICHE G., COUMES F. et IRR F., 1979** - Type de modelés observés par submersible dans les canyons méditerranéens au cours de la campagne Cyaligure. *Compte rendu de l'Académie des Sciences, Paris*, t. 288, série D, p. 735-738.
- VERGARI A., 1998** - Nouveau regard sur la spéléogenèse: le "pseudo-endokarst" du Tournaisien (Hainaut, Belgique). *Karstologia* n° 31, p. 12-18.