

Géosciences de surface (Géomorphologie)

Évolution récente et actuelle de la côte basque française (analyse et perspectives)

Antonin Genna^{a,*}, Jean-Pierre Capdeville^b, Jacques Dubreuilh^b, Cyril Mallet^b

^a BRGM, REM /MESY, 3, av. Claude-Guillemain, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

^b BRGM, parc technologique Europarc, 24, av. Léonard-de-Vinci, 33600 Pessac, France

Reçu le 10 décembre 2004 ; accepté après révision le 29 août 2005

Disponible sur Internet le 13 octobre 2005

Présenté par Zdenek Johan

Résumé

À la suite d'une étude pluridisciplinaire, nous présentons les modalités de l'érosion océanique sur les formations nord-pyrénéennes de la côte basque française. Nos travaux sont basés sur l'analyse de documents anciens, ainsi que sur l'étude géomorphologique et géologique de terrain. Au cours de cette étude, une altérite d'extension régionale a été mise en évidence. Cette observation, que nous tenons pour majeure, est utilisée pour discuter l'évolution récente et actuelle du littoral basque et les modalités de recul de la ligne de côte. La modélisation de ces phénomènes permet de proposer une perspective d'évolution du littoral. *Pour citer cet article* : A. Genna et al., *C. R. Geoscience 337 (2005)*.

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Recent and present evolution of the French Basque Coast (analysis and prediction). A recent multidisciplinary study, comprising existing data analysis and geomorphological and geological fieldwork, has helped clarify marine erosion processes of Pyrenean formations along the Basque Coast. An important discovery was made during our study of an *alterite* of regional extent, which calls into question recent and present evolution of the Basque Coast and the processes leading to coastline retreat. Modelling these factors has made it possible to propose a predictive scenario for future coastal evolution. *To cite this article*: A. Genna et al., *C. R. Geoscience 337 (2005)*.

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Pays basque français ; Altération ; Érosion ; Morphologie ; Géologie ; Quaternaire ; Trait de côte

Keywords: Basque Country; Weathering; Erosion; Morphology; Geology; Quaternary; Seashore line

Abridged English version

The French Basque Coast is remarkable for the geological outcrops clearly exposed along its cliffs. Grow-

ing awareness of natural risks and the need to minimise the degradation of cliffs in the Basque country has led us to conduct a geological study of the coast. This multidisciplinary study included fieldwork, a morphostructural study of aerial photos and a review of existing documents, postcards and geographical maps. The documents were produced over a broad span of time dating

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : a.genna@brgm.fr (A. Genna).

back as far as Roman times. The postcards and geographical maps provide a good indication of coastal evolution over more than the last two centuries.

The study area (Fig. 1) is located at the western extremity of the Pyrenees and immediately south of the Landes plain [6,8,9,11]. This region is influenced by the Pyrenees, the opening of the Bay of Biscay and the present-day position of the Atlantic coastline. The majority of the rocks exposed along the coast are of Cretaceous age, Eocene, Oligocene. These formations are overlain by recent sediments of Pliocene–Quaternary age. The deformation of the Basque Coast can be divided into three categories: Pyrenean tectonism, post-Pyrenean tectonism, and recent deformations.

A general reconstruction of the entire Atlantic coast was done by Derancourt [5] on the basis of data from the Roman epoch and principally the points mapped by Ptolemy [12]. The reconstruction shows an overall retreat of the coastline estimated at several hundred metres. The first usable geographic documentation dates from the 18th century with the ‘geometric’ map of France at a scale of 1:86 400 compiled by Cassini between 1760 and 1789 [2].

A regionally extensive alterite has been recognised throughout the Basque Coast. It can be identified on aerial photos by a low rounded landform and a drainage system that tends to become parallel to the Atlantic coast in the western part. This formation extends into the Basque country to the foot of the Pyrenees and causes instability where present. Its thickness is highly variable in boreholes; it reaches 50 m in outcrop at various points along the coast north of Saint-Jean-de-Luz. This alterite has been identified and described, especially in the calcareous formations of Cretaceous flysch (Fig. 2), where it comprises argillaceous marl and ochre clay in the more evolved facies. Weathering is manifested principally by oxidation and decalcification of the Cretaceous limestones (Fig. 3). The transition from fresh rock to weathered rock can be very abrupt (a few millimetres) in places, but elsewhere more gradual, occurring as a system of oxidised fractures that separate marly-clay blocks that are still bluish grey.

The two factors responsible for the present-day erosion of the Basque Coast are the continental erosion due to the drainage system and the marine erosion responsible for coastal evolution. Erosion is highly dependent on the lithology of the geological formations. The principal drainage system (Fig. 1) consists of streams primarily oriented SE–NW. However, a NE–SW-oriented palaeovalley occurs between Bidart and Saint-Jean-de-Luz, subparallel to the coast. Present-day evolution of the drainage system results in a landscape characterised

by subdued topography. This same landscape is also sharply truncated due to marine erosion, which is much more rapid (Fig. 4).

Marine erosion is expressed through processes of dissolution and mechanical abrasion of competent rocks. In unconsolidated formations, it is primarily marked by mudslides and gravity features such as solifluction lobes. It also results in planation of the foreshore.

The transformation of geological formations of the Basque country to alterites by the process of hydrolysis gives the rocks new properties, commonly different from their initial ones. The volume reduction that occurs during decalcification causes the formation of fracture systems, very dense in places, which modify fluid circulation and rock storage capacities.

Seven coastal types were selected (Fig. 5a). Type 1 shows horizontally or sub-horizontally stratified rocks with a cover of recent sediments and a thin alterite layer (Fig. 6.1). Type 2 shows deformed and unconsolidated sediments overlain by a recent cover and alterite (Fig. 6.2). Type 3 is defined as hard folded rock with a recent cover and alterite (Fig. 6.3). Type 4 is hard folded rock capped by alterite (Fig. 6.4). Type 5 is hard rock that has been tilted but not folded (Fig. 6.5). Type 6 is a low-relief alterite (Fig. 6.6). Type 7 is sands and dunes. Fig. 5b shows different sub-types related to continuous thickness variations of the geological formations. A ‘beach’ column was added to Fig. 5 (Fig. 5c). Fig. 7 summarises the degradation processes of the first five coastal types of Fig. 5.

An understanding of the alterite formation discovered in the Basque Country is the key to numerous scientific and social issues of this region. The scientific issues are numerous and primarily involve clarification of the Pliocene–Quaternary evolution of the Basque Country and of the Landes. The sands of the Landes, which have excellent reservoir properties, have produced the acid water necessary for the decalcification of the flysch. Coastal-preservation measures have been taken to retard the retreat of the cliffs along the northeastern part of the coast where degradation has changed from a slow and progressive coastline retreat to that of discontinuous events involving large-scale slides. An example of this latter form of degradation is the collapse of the ‘Côte des Basques’, where the behaviours of the lower and upper parts of the cliff are identical.

If the dynamics of coastal erosion, as characterised from our preliminary results, are confirmed and continue, certain impacts can be anticipated in the future evolution of the coastline of the Basque country (Fig. 8). The erosion of coastal material by the ocean does not take place everywhere in the same way or at the same

rate. Limestones and hard rocks tend to develop sub-vertical cliffs. The corresponding alterite shows a more gentle equilibrium profile, with a slope of less than 45° . The retreat of the cliff is much more rapid in alterites than in hard rocks. This mechanism seems to be at the origin of the Bay of Saint-Jean de Luz and of various beaches along the rocky coast. To the north of Saint-Jean-de-Luz, according to our observations, only a thin bar of hard limestones remains along the coast. Behind this bar, the alterites seem to occur at the surface and down to about sea level. This pattern may extend to the foothills of the Pyrenees. The Bay of Saint-Jean-de-Luz constitutes the first passage of the ocean across this natural wall. To a lesser degree, a similar configuration can be observed for various beaches along the coast where it can be anticipated that bays identical to that of Saint-Jean-de-Luz will develop. The most striking example is that of Erromardie Beach (Saint-Jean-de-Luz). The development of a bay can be anticipated, if there is no human intervention.

1. Introduction

La côte basque française, entre Hendaye et Biarritz, est remarquable pour ses paysages rendus célèbres par l'impératrice Eugénie, mais aussi par sa géologie clairement exposée sur ses falaises. On note également l'affleurement de la limite Crétacé–Tertiaire en deux points du rivage à Bidart et à Hendaye [7], rendu visible par la qualité exceptionnelle de ses affleurements. Mais ces affleurements sont exceptionnels parce qu'ils sont en pleine évolution sous l'effet de l'érosion océanique continue. Ainsi, la sensibilisation croissante aux risques naturels et la nécessité de remédier aux effets destructeurs de la dégradation des falaises en Pays basque nous ont conduit à réaliser une étude géologique de la côte. Celle-ci permet de déterminer les paramètres naturels de dégradation des formations géologiques qui affleurent sur le littoral actuel et de discuter les effets actuels et futurs des aménagements et ouvrages de défense contre la progression de la mer. Cette analyse pluridisciplinaire a été réalisée à partir d'observations de terrain, de l'étude morphostructurale de photos aériennes et de la consultation de documents anciens, cartes postales et cartes géographiques. Ces documents ont été établis à des dates très diverses qui débutent à l'époque romaine. Les photographies et les cartes géographiques nous donnent une bonne vision de l'évolution de la côte sur plus de deux siècles.

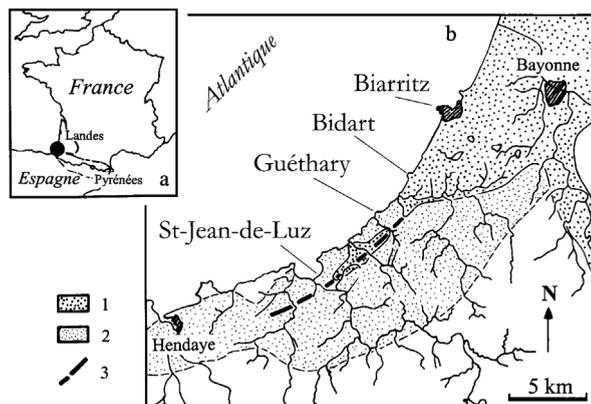


Fig. 1. Carte simplifiée du Pays basque : (a) localisation générale, (b) carte de l'extension générale de l'alterite basque. 1 : Formations plio-quaternaires, 2 : alterite, 3 : paléovallée de Saint-Jean-de-Luz.

Fig. 1. Simplified map of the Basque Country: (a) General location map, (b) Overall extent of the Basque alterite. 1: Pliocene–Quaternary formations, 2: Alterite, 3: Saint-Jean-de-Luz palaeovalley.

2. Contexte géologique

La région étudiée (Fig. 1) se situe à l'extrémité ouest de la zone nord-pyrénéenne et au sud immédiat de la plaine des Landes. La côte basque présente une diversité géologique importante. Stratigraphiquement [6–9, 11], les séries affleurantes vont des évaporites triasiques du Keuper aux plages et dunes récentes de l'Atlantique. Les terrains sont très déformés dans la partie sud de la zone par la formation de la chaîne pyrénéenne et sont peu fracturés dans la partie nord.

2.1. Stratigraphie

La côte basque présente une complexité géologique importante [4,6–9,11]. Cette région est sous l'influence de la Chaîne pyrénéenne, l'ouverture du golfe de Gascogne et l'avancée actuelle de l'océan Atlantique. Les terrains les plus anciens sont d'âge Triasique, avec les argiles rouges ou bariolées du Keuper. Cette formation ne constitue que quelques dizaines de mètres de côte, qui sont particulièrement instables. Elle contient des masses de gypse très déformées, qui constituent un important niveau de décollement pyrénéen.

La majeure partie des terrains exposés sur la côte est d'âge Crétacé. À la base, le flysch sénonien [10] représente la plus grande partie des affleurements. Il est composé d'alternances de calcaires, de conglomérats, de grès et de marnes, puis de successions marno-argileuses, avec des intercalations conglomératiques [11]. La série crétacée est couronnée par les calcaires blancs et roses du Danien, à la base duquel se situe le célèbre niveau à iridium de la limite K/T. Dans la partie nord-est de la

côte, la série tertiaire est représentée par des formations, également marines, éocènes et oligocènes.

L'Éocène est constitué par le flysch yprésé-lutétien du Pavillon royal, les marno-calcaires de la base du Lutétien supérieur, marnes et marno-calcaires du sommet du Lutétien et du passage au Bartonien, les marno-calcaires gris de l'Éocène supérieur de la plage des basques (Biarritz). L'Oligocène, peu déformé, est constitué par les grès calcaires et calcaires gréseux à nummulites (Sannoisien supérieur) du rocher de la Vierge à Biarritz, l'affleurement de calcaires gréseux et marnes noirâtres à nummulites (Sannoisien supérieur) de l'hôtel du Palais et des marnes et marno-calcaires gréseux du phare Saint-Martin de Biarritz et de la chambre d'Amour à Anglet.

Au-dessus de ces formations anciennes, des sédiments récents, d'âge Plio-Quaternaire, se sont déposés [1]. Ils représentent probablement l'équivalent latéral des formations sableuses landaises. Elles sont constituées par deux termes principaux avec, à la base, des conglomérats et sables conglomératiques et des sables dunaires au sommet. Des niveaux de tufs et lignites s'intercalent dans les sables dunaires de la plage du Pavillon royal.

2.2. Structuration

La structuration de la côte basque est complexe, à l'image de son histoire géologique. Les déformations peuvent être classées en trois catégories. Les plus anciennes sont liées à la mise en place de la Chaîne pyrénéenne et affectent les formations géologiques d'âge Éocène ou plus ancien. Au-dessus de l'Éocène, les formations oligocènes sont peu déformées. Il existe une évolution récente, d'âge Plio-Quaternaire, qui induit des plis à grand rayon de courbure combinés aux phénomènes d'érosion et d'altération.

2.2.1. Tectonique pyrénéenne

La tectonique pyrénéenne [3,4,11] s'exprime principalement par des plis qui constituent des affleurements exceptionnels, notamment au nord de Saint-Jean-de-Luz. Ces plis ont généralement des plans axiaux sub-horizontaux et des charnières très pincées. Ils constituent ainsi des trains de plis en chevrons. Les axes de ces plis sont d'orientation nord-sud à NE-SW et sont souvent parallèles à la côte. Peu de failles affectent les falaises de la côte basque, à l'exception des grandes failles pyrénéennes développées dans le gypse au nord de Bidart et dans la baie de Loia, près d'Hendaye. Des failles parallèles à la stratification ou obliques sont visibles en divers points de la côte et constituent généralement les termes les plus avancés de l'évolution des plis.

2.2.2. Tectonique post-pyrénéenne

Les formations oligocènes sont peu déformées. Elles sont uniquement affectées par le plissement à grand rayon de courbure du synclinal de Biarritz. Cette structure d'extension régionale se développe largement vers l'ouest, en mer. Un important faisceau de failles normales passe par la ville de Biarritz. Ces accidents sont d'orientation est-ouest à NE-SW et généralement à pendage nord. Ils affectent à Biarritz, sur la pointe du rocher de la Vierge et sur le port. Ils limitent ainsi, dans sa bordure sud, le grand synclinal qui affecte le Pliocène.

2.2.3. Évolution récente

Les formations récentes (conglomérats et formations dunaires du Pavillon royal) sont affectées par de faibles mouvements déterminant des ondulations à grand rayon de courbure et par des effondrements, principalement causés par la dissolution du gypse triasique sous-jacent.

Les déformations à grand rayon de courbure sont à relier à l'évolution récente des Pyrénées. Les modalités de cette évolution sont toutefois encore mal connues. Elles résultent probablement d'une surrection sub-actuelle, mise en évidence par l'observation du nivellement et des cours d'eau actuels et anciens.

Ces mouvements récents peuvent également être décrits à partir de la déformation du toit et du niveau de base d'une altérite qui s'est développée à la base de la formation des conglomérats et sables de Landes qui recouvraient probablement la région côtière du Pays basque français.

3. Consultation de documents anciens

Une reconstitution générale de l'ensemble de la côte atlantique a été réalisée par Derancourt [5] à partir des données de l'époque romaine et principalement des points relevés par Ptolémée [12]. Si ces travaux sont argumentés pour la partie bretonne, où plusieurs kilomètres de recul sont envisagés par cet auteur, jusqu'à la côte landaise, ils donnent peu d'informations sur la côte basque. Ils montrent toutefois un recul global de la ligne de côte, qui peut être estimée à plusieurs centaines de mètres.

Il faut attendre le XVIII^e siècle pour retrouver une documentation géographique utilisable, avec la carte «géométrique de la France» établie par Cassini entre 1760 et 1789 à l'échelle de 1:86 400 [2]. Bien que pas toujours très précise sur les informations fournies, elle met en évidence l'absence quasi totale de plages dans la partie rocheuse de la côte. Il semble qu'il ait existé beaucoup plus d'îlots rocheux au XVIII^e siècle qu'à l'heure actuelle. On note également la présence de nombreuses

pointes rocheuses qui n'existent plus de nos jours. Au niveau de l'hôtel du Palais à Biarritz, par exemple, il existait une pointe rocheuse à l'arrière de laquelle a été construit le palais, qui est totalement érodée à l'heure actuelle. La baie de Saint-Jean-de-Luz s'est approfondie vers l'intérieur des terres de 200 m environ et s'est élargie de 500 m parallèlement à la côte, selon ce document. On note également que le fort de Socoa était positionné sur une pointe de terre. Il se trouve aujourd'hui sur un îlot qui est simplement relié à la terre par une digue séparant le port de Socoa de l'estran océanique.

Les cartes postales et tableaux (disponibles sur Internet) mettent en évidence la dégradation de la côte sur les lieux touristiques et à l'échelle de divers rochers caractéristiques. On note, dans l'ensemble, la réduction de la taille des plages et la création de quelques nouvelles falaises. L'érosion des rochers est visible. On observe par exemple la disparition presque totale en un siècle du rocher dit « la pile d'assiettes », au nord de Saint-Jean-de-Luz.

4. Les phénomènes d'altération et d'érosion

4.1. L'altération

Les phénomènes d'altération s'observent à différentes échelles sur l'ensemble de la région étudiée. Hormis ces phénomènes actuels et omniprésents, une altérite d'extension régionale a été mise en évidence sur l'ensemble de la côte basque française. Elle est repérable en photo aérienne par un modelé de reliefs bas et arrondis et un réseau hydrographique qui tend à se paralléliser à la côte atlantique dans la partie ouest. Cette formation se prolonge à l'intérieur du Pays basque jusqu'au pied des premiers reliefs pyrénéens et induit des instabilités sur l'ensemble de la zone qu'elle affecte. Son épaisseur, reconnue en sondage, est très variable. Elle atteint 50 m à l'affleurement, en divers points de la côte située au nord de Saint-Jean-de-Luz.

Dans la partie nord de l'étude, elle est identifiée jusqu'aux affleurements de marnes éocènes de la côte des Basques de Biarritz, où elle décolore les marnes sous-jacentes et les rend meubles et sujettes à une érosion particulièrement rapide. Cette altérite a plus particulièrement été identifiée et décrite dans les formations calcaires du flysch crétacé (Fig. 2). Dans cet horizon, elle se présente sous forme d'une marne plus ou moins argileuse ou sous forme d'argiles ocre dans ses faciès les plus évolués. Selon son degré d'évolution, on reconnaît encore les plis pyrénéens, plus ou moins entraînés dans les mouvements internes et récents de l'altérite. Dans ses stades plus évolués, elle est constituée par une ma-

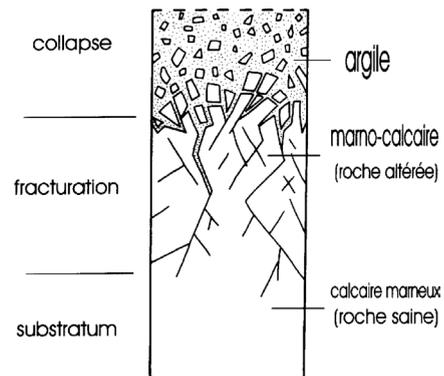


Fig. 2. Coupe type de l'altérite (argiles, zone à blocs, zone fracturée, zone saine).

Fig. 2. Type section of the alterite (clays, blocky zone, fractured zone, fresh rock).

trice argileuse déstructurée, dans laquelle flottent des fragments parallélépipédiques de flysch altéré.

Le phénomène d'altération se manifeste principalement par une oxydation et une décarbonatation des calcaires du Crétacé. Dans le flysch de Guéthary, les rognons ou niveaux siliceux qui arment les calcaires sont les seuls éléments durs conservés dans la matrice argileuse de l'altérite (Fig. 3). Les niveaux siliceux marquent la trace de la stratification dans la formation altérée. Ils marquent également la cinématique des mouvements qui accompagnent l'altération et les phénomènes de glissements gravitaires actuels. Le passage entre roche saine et roche altérée est tantôt très étroit (quelques millimètres), tantôt très large, représenté par un réseau de fractures oxydées qui séparent des blocs argilo marneux encore gris bleuté.

4.2. L'érosion

Les deux facteurs de l'érosion actuelle de la côte basque sont l'érosion continentale, due au réseau hydrographique, et l'érosion océanique, qui assure l'évolution du littoral. Cette érosion est fortement dépendante de la lithologie des formations géologiques. Le réseau hydrographique principal (Fig. 1) est constitué par des cours d'eau globalement orientés vers le nord-ouest. Toutefois, une paléovallée orientée NE–SW est sub-parallèle à la côte, entre Bidart et Saint-Jean-de-Luz. Un modelé en reliefs estompés résulte de l'évolution actuelle par le réseau hydrographique. Ce modelé est recoupé à l'emporte-pièce par l'érosion océanique, qui est beaucoup plus rapide (Fig. 4).

L'érosion océanique s'exprime de différentes manières, qu'il s'agisse de formations compétentes ou de formations meubles. Dans les formations compétentes, les phénomènes de dissolution et d'abrasion mécanique

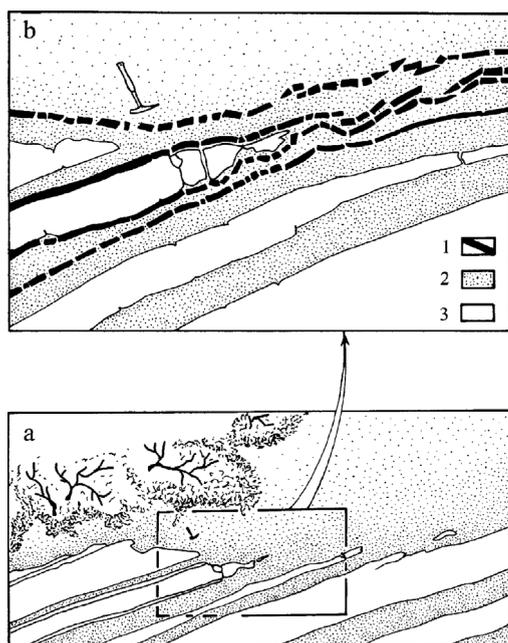


Fig. 3. Exemple de front d'altération (plage de Bidart) : (a) dessin d'ensemble de l'affleurement, (b) mise en évidence de l'effet de compaction du phénomène d'altération sur le flysch crétacé. 1 : Niveau siliceux, 2 : argiles, 3 : calcaires.

Fig. 3. Detail of the weathering front (Bidart beach): (a) sketch of the outcrop, (b) example of weathering-related compaction on Cretaceous flysch. 1: Siliceous interval, 2: clay, 3: limestone.

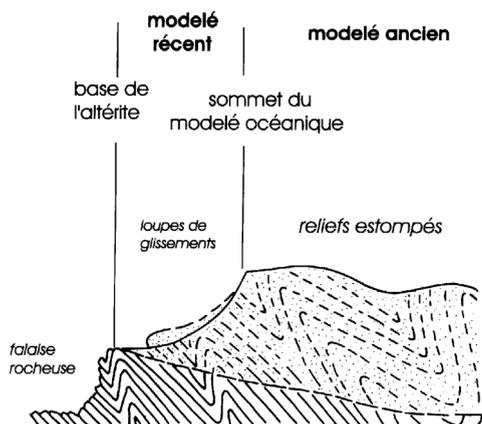


Fig. 4. Coupe théorique, mise en évidence de la surimposition de l'érosion océanique sur le modelé continental.

Fig. 4. Theoretical section showing marine erosion superimposed on the continental landform.

produisent des sous-cavages et des effondrements de falaise. Dans les formations meubles, il s'agit principalement de coulées boueuses et de phénomènes gravitaires sous forme de loupes de glissement. Les matériaux ainsi déstabilisés sont rapidement balayés par la mer. Il s'effectue également un rabotage de l'estran.

5. Discussion et classifications

La transformation des formations géologiques du Pays basque par hydrolyse en altérites confère aux roches des propriétés nouvelles souvent très différentes de leurs propriétés initiales. Par la réduction de volume qu'elles occasionnent au cours de la décarbonatation, elles induisent la formation de réseaux de fractures parfois très denses qui modifient les capacités de circulation des fluides et de stockage des roches.

À l'inverse, les altérites anciennes peuvent augmenter en volume sous l'effet d'une réhydratation par les eaux superficielles, météoriques ou par les fuites des réseaux urbains. Les possibilités d'hydrolyse sous couverture sont importantes dans cette problématique, de par la présence de sables et de niveaux riches en matière organique. Il en découle une capacité différentielle d'altération des terrains.

Ainsi, nous constatons que, dans la partie nord de la zone étudiée, jusqu'à la plage du Pavillon royal à Bidart, cette altérite se situe sous une formation conglomératique et sableuse, d'épaisseur réduite, constituée de formations grossières ou de dunes. Comme suggéré par Carez [1], ces sables peuvent correspondre à des témoins basques de la formation des sables des Landes. Divers arguments tirés de l'observation du réseau hydrographique et de la géométrie du mur de l'altérite plaident en la faveur de cette hypothèse.

Le réseau hydrographique secondaire actuel sur la frange côtière du littoral basque tourne le dos à la côte. Le réseau principal est globalement orienté NW–SE, mais la principale paléovallée est parallèle à la ligne de côte. Cette configuration évoque l'évolution des fleuves côtiers des Landes sous l'effet de l'évolution du cordon dunaire landais [12].

Le long de la côte basque française, le mur de l'altérite, particulièrement bien exposé, plonge vers le sud-est, c'est-à-dire vers l'intérieur des terres, et non vers l'océan. Au-delà du fait que cette observation confirme le caractère ancien de cette formation, elle démontre également la concordance géométrique de la base de l'altérite avec le réseau hydrographique. Cette constatation révèle le parallélisme possible entre phénomène d'altération, réseau hydrographique et évolution d'un possible cordon dunaire sur cette partie de la côte.

5.1. Différents types de côte

La côte basque peut être subdivisée en différentes zones, en fonction du comportement mécanique de ses roches et de leur mode de dégradation. Sept types de zones ont ainsi été sélectionnés. Ils sont illustrés par la Fig. 5a.

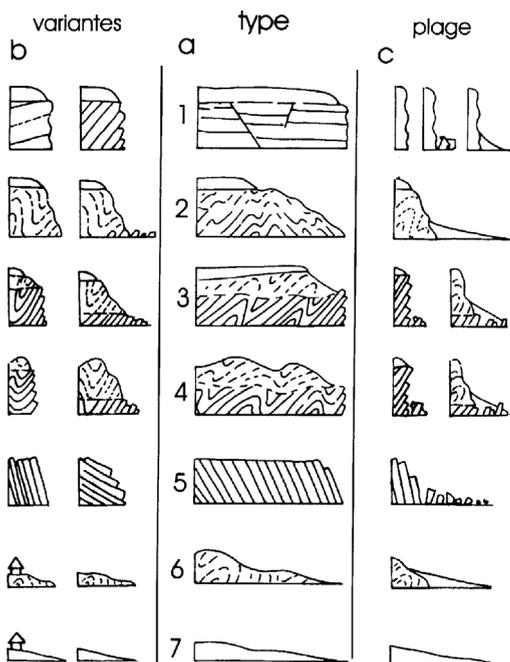


Fig. 5. Différents types de côte déterminés sur la côte basque.

Fig. 5. The different coastal types identified along the Basque Coast.

Type 1 : stratification horizontale ou sub-horizontale avec couverture de sédiments récents et altérite de faible épaisseur (Fig. 6.1). Ce type caractérise principalement les formations oligocènes du synclinal de Biarritz (calcaires et marnes gréseuses), ainsi que divers secteurs de la pointe Sainte-Anne.

Type 2 : stratification déformée et meuble, avec couverture récente et altérite (Fig. 6.2). Ce type caractérise principalement les marnes et marno-calcaires (Éocène) de la côte des Basques, au sud de Biarritz.

Type 3 : roche dure et plissée, avec couverture récente et altérite (Fig. 6.3). Ce type caractérise principalement la partie nord du flysch crétaé, au sud de Bidart.

Type 4 : roche dure et plissée, avec altérite au sommet (Fig. 6.4). Ce type caractérise principalement le flysch crétaé, de Parmentia à Saint-Jean-de-Luz, ainsi qu'une zone au sud d'Haizabia.

Type 5 : roche dure basculée et non plissée (Fig. 6.5). Ce type caractérise principalement le flysch crétaé de la Grande Corniche (entre Hendaye et Saint-Jean-de-Luz).

Type 6 : altérite en reliefs bas (Fig. 6.6). Ce type caractérise diverses zones qui se situent entre Guéthary et Bidart et des zones intermédiaires sur les côtés de certaines baies.

Type 7 : sables et dunes. Ce type caractérise le fond de certaines baies qui ont quelquefois été bâties.

Les différents types de côte définis ci-dessus peuvent être subdivisés en sous-types, notamment en fonction des variations continues d'épaisseur que subissent les formations géologiques. La Fig. 5b présente différents cas de figure de ces variantes.

La typologie de la côte concerne les formations géologiques du substratum. Dans le but d'établir des relations entre configuration géologique et présence d'une plage, une colonne «plage» a été rajoutée à la Fig. 5 (Fig. 5c).

5.2. Classification comportementale

La Fig. 7 résume les modes de dégradation correspondant aux cinq premiers types de côte de la Fig. 5.

Le type 1 subit deux modes de dégradation distincts, en pied de falaise et au sommet. La partie constituée par une stratification horizontale compétente subit des phénomènes de décompression et le développement de fentes subverticales, qui assurent le prédécoupage du bâti avant son effondrement. Des phénomènes de sous-cavage par l'érosion marine favorisent ce phénomène. Les effondrements s'effectuent généralement en haut de plage. Le rabotage de l'estran se poursuit plus au large, après le passage de la plage. La partie supérieure de la falaise, constituée de terrains meubles, altérites ou formations sableuses récentes, s'érode sous l'action des eaux météoriques et des glissements gravitaires.

Le type 2 subit un mode de dégradation homogène, de la base au sommet de la pente. Sous l'effet des eaux météoriques et de la réhydratation des argiles, des glissements gravitaires se développent sur l'ensemble du profil. Les sables de la partie supérieure du profil se démantèlent ou constituent des coulées de petite dimension.

Le type 3 se rapproche du type 1 dans les processus de dégradation. Il présente également deux modes distincts pour la partie inférieure et pour la partie supérieure du profil. Toutefois, les strates sont ici plus fines et plus entrecoupées par la tectonique. Les effondrements sont plus étroitement liés aux configurations locales et généralement de plus petite dimension.

Le type 4 présente le même comportement mécanique que le précédent. L'absence, au sommet du profil, de formations récentes modifie toutefois le modelé de la partie interne de la falaise, qui est moins tabulaire que les formations sableuses.

Le type 5 constitué de couches redressées et non plissées se dégrade par ablation des interbanes argileux et écroulement des assises calcaires rigides. Ce mode d'érosion induit parfois un sous-cavage de la falaise, qui est sujette à des phénomènes d'implosion.

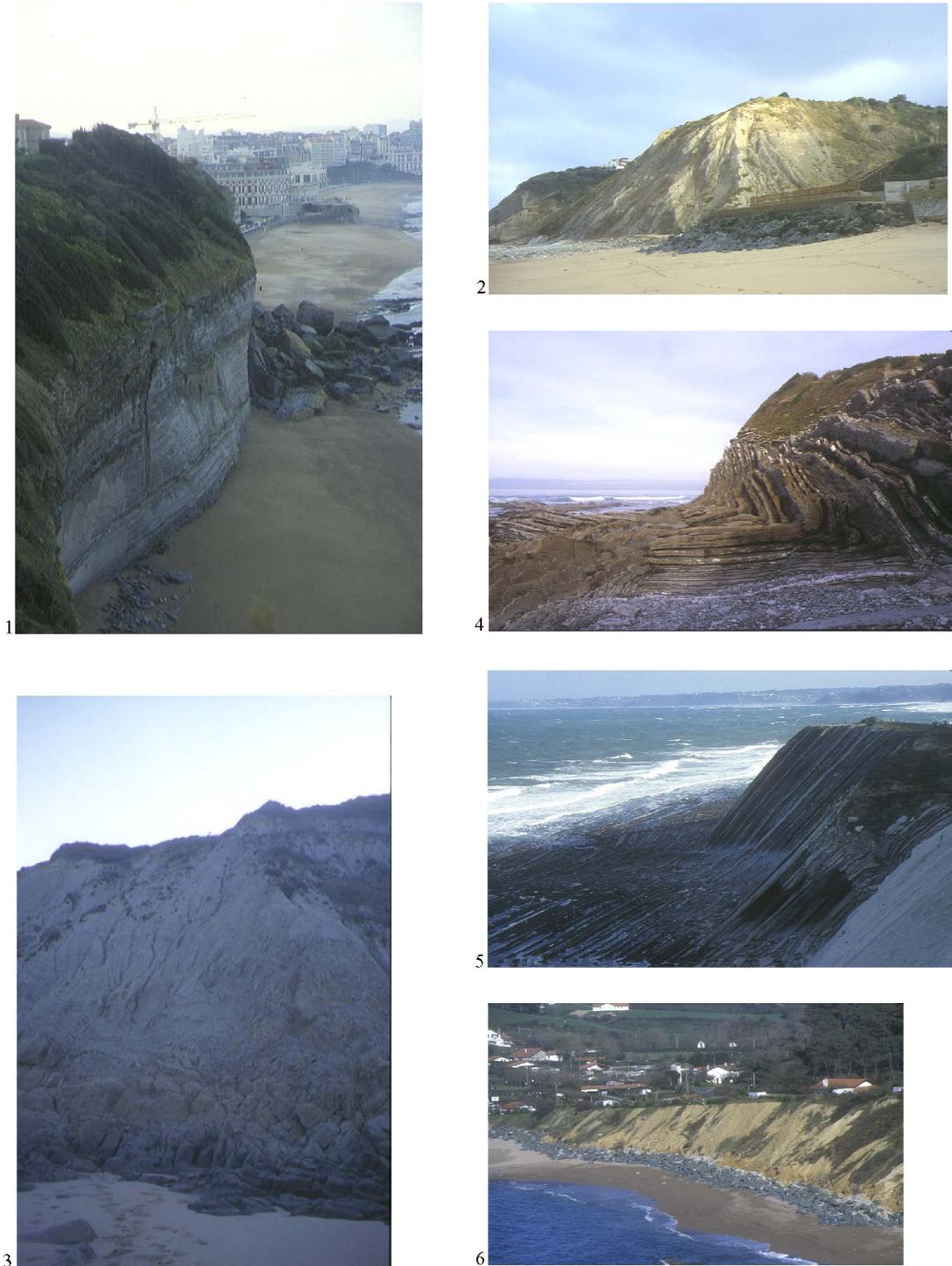


Fig. 6. Illustration des différents types de côte. **1** : Type 1, falaise à Biarritz ; **2** : type 2, marnes maastrichtiennes de Bidart ; **3** : type 3, marno-calcaire à Ilbarritz ; **4** : type 4, flysch crétacé à Saint-Jean-de-Luz ; **5** : type 5, flysch crétacé de la Grande Corniche ; **6** : type 6, flysch crétacé à Erromardie.
 Fig. 6. The different coastal types. **1**: Type 1, Biarritz cliff ; **2**: Type 2, Bidart Maastrichtian marl ; **3**: Type 3, Ilbarritz calcareous marl ; **4**: Type 4, Saint-Jean-de-Luz Cretaceous flysch ; **5**: Type 5 'Grande Corniche' Cretaceous flysch ; **6**: Type 6, Erromardie Cretaceous flysch.

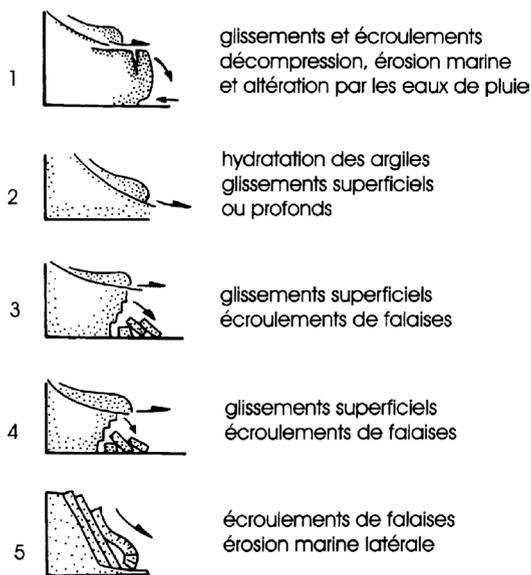


Fig. 7. Modes de dégradation associés aux types de côte (types 1 à 5 de la Fig. 5).

Fig. 7. Degradation processes associated with each coastal type (types 1 to 5 in Fig. 5).

Le type 6 est affecté par une réhydratation des argiles de l'altérite et des glissements gravitaires de petite ampleur, à cause de la faible hauteur des reliefs.

Le type 7 constitue une partie du type 6, où seule la plage persiste après construction de bâtiments sur la partie supérieure du profil ou sur la plage elle-même. L'évolution du profil restant correspond probablement à un abaissement au cours du temps du niveau de la plage.

6. Conclusions et perspectives

L'étude géologique de la côte basque française, de Biarritz à Hendaye, met en évidence une complexité importante dans la répartition et le comportement mécanique des terrains. Des zones sont définies à partir de sept types de côte, qui représentent chacun une configuration géologique particulière, représentative d'un segment de côte théorique et homogène. Ces types principaux présentent des variantes, en fonction des variations d'épaisseur des formations géologiques, du pendage de la stratification et de la présence de bâtiments.

On constate que, dans l'ensemble, la présence d'une altérite en sommet de profil correspond à une plage de sable en pied de falaise. Ce phénomène est dû à la rapidité de l'érosion, l'alimentation locale ou un tout autre phénomène mal connu pour l'instant. On note également que la partie rocheuse et non altérée de la côte n'a pas de plages. Ce phénomène peut correspondre à un effet de creux et de pointes. Les diverses pointes ne

développent pas de cordons littoraux. La présence des plages actuelles peut ainsi dépendre de la présence des sables anciens en sommet de falaise.

La compréhension de la formation de l'altérite mise en évidence au Pays basque est à la clef de nombreuses problématiques scientifiques et sociales de cette région. Les problématiques scientifiques résident principalement dans l'éclaircissement de l'évolution plio-quaternaire du Pays basque et des Landes. Les sables des Landes, excellents réservoirs, ont pu fournir l'eau acide nécessaire à la décarbonatation du flysch.

À plus longue échéance, la compréhension de l'évolution latérale de l'altérite permettra de contrôler l'évolution de la ligne de côte qui va, dans un avenir plus ou moins lointain, développer des baies, à l'arrière de la barre rocheuse résistante qui ralentit provisoirement l'érosion sur la majeure partie de la côte actuelle.

Des aménagements ont été réalisés pour retarder le recul des falaises dans la partie nord-est du littoral. Dans cette zone, on constate que la dégradation des falaises est passée d'un recul lent et progressif de la ligne de côte vers un recul discontinu qui s'effectue par des glissements de grande envergure, comme l'effondrement spectaculaire de la côte des Basques où le comportement des parties inférieure et supérieure de la falaise est identique.

Si la dynamique d'érosion côtière, telle qu'on peut la reconstituer à partir de nos résultats préliminaires, se confirme et se poursuit, on peut envisager certaines incidences particulières sur l'évolution future du trait de côte du Pays basque (Fig. 8). En effet, le déblaiement par l'océan des matériaux de la côte ne s'effectue pas partout de la même manière, ni à la même vitesse. Les calcaires et roches dures ont tendance à développer des falaises subverticales. L'altérite produit un profil d'équilibre beaucoup plus plat, inférieur à 45°. Le recul de la falaise est beaucoup plus rapide dans les altérites que dans les roches dures. Ce mécanisme semble être à l'origine de la baie de Saint-Jean-de-Luz et de diverses plages de la côte dite rocheuse.

Au nord de Saint-Jean-de-Luz, il ne reste plus, selon nos observations, qu'une mince barre de calcaires durs, le long de la côte. À l'arrière de cette barre, les altérites semblent se développer en surface et jusqu'à une altitude voisine du niveau de la mer. Cette organisation peut s'étendre jusqu'au pied des premiers reliefs pyrénéens. La baie de Saint-Jean-de-Luz constitue une première trouée de l'océan à travers cette muraille naturelle. Il en est de même, dans une moindre mesure, sur diverses plages de la côte, où il est prévisible de voir se développer d'autres baies identiques à celle de Saint-Jean-de-Luz. L'exemple le plus important est celui de la

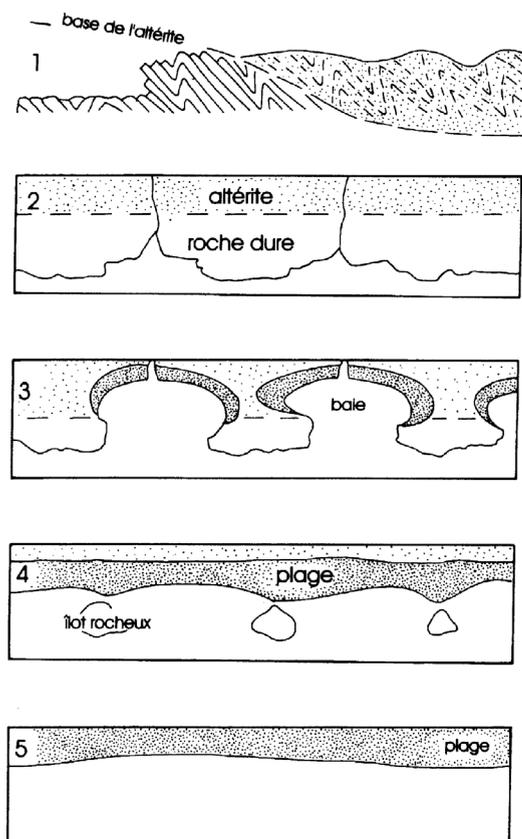


Fig. 8. Modèle théorique et global de l'évolution de la côte basque : (1) coupe théorique du littoral rocheux avec roche saine et altérite ; (2) représentation cartographique de l'état initial ; (3) formation des baies à travers la barre de roche dure ; (4) érosion progressive de la barre de roche saine ; (5) disparition totale des îlots de roche dure et régularisation du littoral.

Fig. 8. Theoretical global evolution model for the Basque Coast: (1) Theoretical section of the rocky coast showing fresh rock and alterite; (2) map representation of the initial situation; (3) bay formation through the hard-rock bar; (4) progressive erosion of the fresh-rock bar; (5) total disappearing of hard-rock islands and smoothing out of the coastline.

plage d'Erromardie (Saint-Jean-de-Luz), qui n'est plus protégée par la barre rocheuse. L'érosion s'effectue actuellement exclusivement dans les altérites et l'on peut prévoir à cet endroit le creusement d'une baie, s'il n'y a pas d'intervention humaine. La rapidité du phénomène peut d'ailleurs être chiffrée en fonction de la vitesse de l'érosion actuelle.

Par ailleurs, l'évolution complexe de la côte basque est, à une autre échelle, tributaire des mouvements de l'écorce terrestre à grand rayon de courbure et des variations eustatiques de l'océan. Ainsi, l'altérite constitue un bon marqueur de la dynamique récente de la côte aquitaine et peut argumenter par des données autres que lithologiques ou stratigraphiques les observations

néotectoniques (mécanismes au foyer) et les anomalies du nivellement. Les paléosurfaces sont à comparer à la géométrie de surface de l'altérite et contribueront aussi à l'analyse des mouvements à grand rayon de courbure.

Remerciement

Cette étude a été réalisée dans le cadre des travaux de l'Observatoire de la côte aquitaine (contrat de plan État-région 2001–2006) ; à ce titre, elle est cofinancée par l'État, la région Aquitaine et le conseil général des Pyrénées-Atlantiques. Les auteurs souhaitent remercier tous les organismes ayant contribué à la collecte des données d'archives, ainsi que Mlle A. Alexandre, pour leur collaboration. (Contribution BRGM n° 03942.)

Références

- [1] L. Carez, Coupe des falaises de Biarritz et Bidart, Bull. Soc. géol. France (3) XXIV (1896) 392.
- [2] C.F. Cassini, Carte géométrique de la France (1:86 400), 1815.
- [3] P. Choukroune, Structure et évolution tectonique de la zone nord-pyrénéenne. Analyse de la déformation dans une portion de chaîne à schistosité verticale. Mém. Soc. géol. France n° 127, thèse, Montpellier, 1976.
- [4] A. Debourle, R. Deloffre, Guide géologique régional : Pyrénées occidentales, Béarn, Pays basque, Masson, 1976.
- [5] E. Derancourt, Les côtes de France à l'époque gallo-romaine (II^e siècle), Bull. Soc. océanogr. France 84 (1935) 1460–1467.
- [6] M.-J. Fondécave-Wallez, B. Peybernès, P. Eichène, Mise en évidence micropaléontologique d'un flysch yprésé-lutétien, ex-néocrétacé, à matériel triasique resédimenté, dans la coupe de Bidart (Pyrénées atlantiques, Sud-Ouest de la France), Géol. France 3 (1995) 47–56.
- [7] A. Lacazedieu, B. Peybernès, C. Seyve, La limite Crétacé–Paléocène : phénomènes biologiques, évènements géologiques d'après les sites de la côte basque, Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, 1996, 93 p.
- [8] P. Lamare, J. Goguel, Carte géologique de la France, feuille Bayonne (1:50 000), Bureau de recherches géologiques et minières, 1963.
- [9] P. Lamare, J.-P. Destombes, Carte géologique de la France, feuille Espelette (1/50 000). Bureau de recherches géologiques et minières, 1964.
- [10] B. Peybernès, M.-J. Fondécave-Wallez, Y. Gourinard, P. Eichène, Stratigraphie séquentielle comparée et « grande datation » par les foraminifères planctoniques du Campano-Maastrichtien et du Paléocène de quelques sites d'Europe sud-occidentale et d'Afrique du Nord, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila 324 (10) (1997) 839–846.
- [11] P. Razin, Évolution tecto-sédimentaire alpine des Pyrénées basques à l'ouest de la transformante de Pamplona (province du Labour), thèse, université Bordeaux-3, 1989, 464 p.
- [12] Société des sciences, Lettres et arts de Bayonne, IV^e centenaire du détournement de l'Adour, 1578–1978, Actes du congrès de Bayonne, 28–29 octobre 1978, Bull. Soc. Sci. Lett. Arts Bayonne, 1978, 688 p.