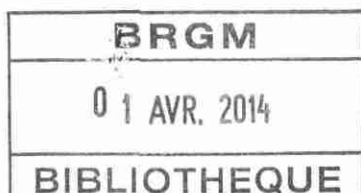






Accès différé

**Etude géologique  
et géotechnique  
des instabilités de terrain sur le  
littoral Basque.  
Cas d'étude : Ibarritz (Bidart) et Harotzen  
Costa (Guéthary)  
Rapport d'avancement**



**BRGM/RP-54728-FR**  
juin 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2005 05LITA03

**M. Borie-Peter**

<p><b>Vérificateur :</b></p> <p>Nom : S. Aubié</p> <p>Date :</p> <p>Signature :</p> <p>(Ou Original signé par)</p>
--

<p><b>Approbateur :</b></p> <p>Nom : J. Dubreuilh</p> <p>Date :</p> <p>Signature :</p> <p>(Ou Original signé par)</p>
---

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



**Mots clés** : Instabilités, Littoral, Côte Basque, Altération, Hydrogéologie, Géotechnique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**M. Peter (2006)** : Etude géologique et géotechnique des instabilités de terrain sur le littoral basque. Cas d'étude : Ilbarritz (Bidart) et Harotzen Costa (Guéthary). Rapport d'avancement, BRGM-RP-54728-FR, 65 fig., 25 tab., 120 p.

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Les travaux menés par le BRGM sur le littoral basque ont été initiés et financés par l'Etat, le Conseil Régional d'Aquitaine, le Conseil Général des Pyrénées-Atlantiques et le BRGM dans le cadre de l'avenant « intempéries » de la première phase du contrat de plan Etat-Région 2001-2004. Ces études se poursuivent jusqu'en 2007 et s'intègrent à la deuxième phase du contrat de plan.

Les objectifs principaux de ce projet sont d'étudier les processus d'évolution morphologique de la côte et de caractériser l'aléa lié aux mouvements de terrain et à l'érosion côtière. C'est dans ce contexte que le BRGM et le Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA) de l'Université Bordeaux 1 ont proposé un sujet de recherche destiné à améliorer la compréhension des processus liés aux instabilités.

La présente étude s'inscrit dans ce contexte et se focalise sur deux sites pilotes de nature géologique différente : Harotzen Costa sur la commune de Guéthary et le golf d'Ilbarritz sur la commune de Bidart.

Sur chacun des sites, une description géologique, structurale, géomorphologique, géotechnique et hydrogéologique a été réalisée. Ces descriptions s'appuient sur des données bibliographiques, des observations de terrain ainsi que des mesures sur des prélèvements de sols et d'eau.

Le site de Guéthary se caractérise par un glissement de terrain survenu en janvier 2004 sur la plage d'Harotzen Costa. Le volume de matériaux mobilisé est estimé à 15000 m<sup>3</sup> environ. Les matériaux intéressant ce glissement correspondent à des altérites argileuses issues de l'altération en place des flyschs à silex de Guéthary.

Les modalités de formation de l'altérite sont encore mal connues aujourd'hui. Or, celles-ci ont des conséquences importantes sur les propriétés du matériau et sur la structure du massif. L'étude des instabilités des falaises de Guéthary nécessite ainsi une meilleure connaissance des processus physico-chimiques ayant conduits à la formation de l'altérite. De plus, étant donné que l'état du sol est fortement lié à sa teneur en eau, divers instrumentations ou essais *in situ* permettraient d'apporter des informations complémentaires.

Le site d'Ilbarritz se caractérise par une falaise d'une trentaine de mètres de hauteur sur environ 400 m de longueur. Elle est constituée de matériaux marno-calcaires surmontés de sables gravelo-argileux. Ce site est le siège d'instabilités constantes mobilisant des volumes très variables.

Altérées, les marnes forment un matériau très actif, particulièrement instable. Afin de localiser les zones altérées sur les falaises d'Ibarritz des prélèvements sont prévus à équidistance le long d'un profil vertical ainsi que le long d'un profil horizontal sur lesquels des analyses de calcimétrie, mesure de porosité et de teneur en eau seront effectuées. Une corrélation entre teneur en carbonate et un paramètre de sensibilité à l'eau (indice de plasticité, activité, ...) est également recherchée. Le suivi hydrogéologique du secteur est poursuivi afin de déterminer les caractéristiques de la nappe des sables (au sein des matériaux alluvionnaires) sur au moins une saison complète. La quantification de l'érosion est également recherchée à partir de l'analyse de photographies.

Les observations effectuées sur ces sites pilotes ont permis de définir des axes de recherche orientés vers l'altération et les circulations hydrogéologiques en particulier.

# Sommaire

<b>1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>11</b>
<b>2. SITE DE GUETHARY .....</b>	<b>13</b>
2.1. INTRODUCTION .....	13
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE .....	14
2.2.1. <i>Le substratum rocheux</i> .....	14
2.2.2. <i>Les altérites</i> .....	23
2.2.3. <i>Propriétés des flyschs à silex de Guéthary et de leurs altérites</i> .....	31
2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE .....	54
2.3.1. <i>Acquisition des données</i> .....	54
2.3.2. <i>Les précipitations</i> .....	55
2.3.3. <i>Venues d'eau</i> .....	56
2.4. LES MOUVEMENTS DE TERRAINS .....	59
2.4.1. <i>Historique des instabilités</i> .....	59
2.4.2. <i>Observations de terrain</i> .....	63
2.4.3. <i>Conclusion</i> .....	68
<b>3. SITE D'ILBARRITZ.....</b>	<b>69</b>
3.1. INTRODUCTION .....	69
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE .....	71
3.2.1. <i>Le substratum rocheux</i> .....	71
3.2.2. <i>Le recouvrement alluvionnaire</i> .....	72
3.2.3. <i>Propriétés des matériaux</i> .....	73
3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE .....	83
3.3.1. <i>Présentation</i> .....	83
3.3.2. <i>Analyses physico-chimiques</i> .....	89
3.3.3. <i>Interprétation - discussion</i> .....	95
3.3.4. <i>Perspectives</i> .....	97
3.4. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN .....	98
3.4.1. <i>Principaux types</i> .....	98
3.4.2. <i>Facteurs d'érosion et d'altération</i> .....	100
3.4.3. <i>Evènements remarquables depuis le début de l'étude</i> .....	101
3.4.4. <i>Scénarios préliminaires de rupture</i> .....	106
3.4.5. <i>Perspectives d'étude</i> .....	110
<b>4. CONCLUSION ET PROSPECTIVES .....</b>	<b>111</b>
<b>5. VALORISATION SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>113</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>115</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Carte géologique (1/25000° ; Razin, 1989) et localisation du secteur de Guéthary .....	14
Figure 2 : Tectonogramme interprétatif de la Côte Basque (Bodou, 1972) .....	15
Figure 3 : Protocole de mesure de la fracturation .....	17
Figure 4 : Structure d'une charnière de pli couché (flysch à silex de Guéthary ; Razin, 1989).....	18
<i>Figure 5 : Schéma structural des flyschs sur la plage d'Harotzen Costa (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)</i> .....	19
Figure 6 : Courbes d'isodensité des pôles des discontinuités dans la zone monoclinale représentées sur le canevas de Schmidt (conservation des aires), projection sur l'hémisphère inférieur. Les zones A, B, C, D correspondent aux pôles des fractures des familles principales. ....	20
Figure 7 : Carte bathymétrique (IFREMER, 1999) - Paléo-vallées et hauts-fonds .....	21
Figure 8 : Extrait de la carte géologique Les hauts fonds « le plateau de Saint Jean-de-Luz », « Illarguita », « Placeta », « Campo Banco » sont formés par les formations Eocènes à Miocènes. Seul le haut fond en continuité de la Pointe-Sainte-Anne est formé par les terrains Paléocènes.....	21
Figure 9 : Carte bathymétrique au droit de Guéthary (IFREMER, 1999) – Hypothétiques paléo-vallées.....	22
Figure 10 : Lagunes observées sur les orthophotographies 2000 sur l'estran ; (a) sur l'ensemble des flyschs de Guéthary ; (b) à Guéthary (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000).....	23
Figure 11 : Log lithologique des altérites dans la niche d'arrachement du glissement de terrain de janvier 2004.....	25
Figure 12 : Altérite. Coupe dans la niche d'arrachement. (a) : Alternance de niveaux argileux bleutés et de niveaux argileux ocres-rouges. Les bancs blancs-gris sont des bancs de silex ; (b) : front d'oxydation dans les altérites.....	26
Figure 13 : Différents modelés de type karstique observés sur les flyschs du Pays Basque ; (a) : Chenaux (Guéthary) ; (b) : Dépôts de Tuf au pied de la cascade (Baie de Loya) ; (c) : Dolines repérées par les flèches noires (Baie de Loya) ; (d) : traces d'écoulements (Viviers-Basques) ; (e) : Modelé de type Lapiaz (Viviers-Basques) .....	27
Figure 14 : Roche fantôme au sein d'un conduit karstique à Guéthary .....	28
Figure 15 : Anneaux d'oxydation autour de discontinuités à Guéthary .....	28
Figure 16 : Calcite automorphe sur l'éponte d'une fracture à Guéthary.....	29
Figure 17 : Oxydation d'interbanc argileux du flysch près de l'interface banc compétent / interbanc argileux. Cette zone oxydée est un témoignage du développement de l'altération. ....	30

Figure 18 : Localisation des études géotechniques recensées sur les communes de Bidart et Guéthary concernant les flyschs à silex ou les altérites de cette formation. (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000) .....	34
Figure 19 : Courbe granulométrique de l'échantillon prélevé dans le bourrelet du glissement de janvier 2004 à Guéthary. ....	44
Figure 20 : Classification des sols selon Casagrande à partir des limites d'Atterberg – Applications aux échantillons prélevés à Guéthary et à Parlementia .....	47
Figure 21 : Droite de calibration du Potassium .....	54
Figure 22 : Exemple d'un diagramme de la conductivité en fonction du temps .....	55
Figure 23 : Arrivée d'eau au sein des altérites en place. A droite : localisation de la venue d'eau (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE 2000) ; à gauche : venue d'eau.....	56
Figure 24 : Diagramme de Schoeller des prélèvements du 16/11/04, 08/12//04, 13/01/2005 et 02/02/2005 (Balances ioniques respectivement de -2,5%, 2,0%, -2,1% et 2,6%). .....	57
Figure 25 : Venue d'eau au sein du glissement.....	58
Figure 26 : Glissements de terrains répertoriés sur le secteur de Guéthary (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000) .....	61
Figure 27 : Evolution des infrastructures dans le secteur de Guéthary. Les maisons signalées disparues M1, M2 et M3 sont visibles sur les photographies de 1954 et disparaissent dès 1968. (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000) .....	62
Figure 28 : Informations sur la géomorphologie obtenues par l'étude des photographies aériennes de la campagne de 2000 (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000) .....	62
Figure 29 : Photographie de l'arête située la plus à l'ouest ; on remarquera l'importance de l'épaisseur de flysch sain ; un carnet de terrain vert donne l'échelle (photos M.Borie, janvier 2005) .....	63
Figure 30 : Schéma et description du glissement de janvier 2004 .....	64
Figure 31 : Glissement de janvier 2004 sur les falaises de Guéthary .....	66
Figure 32 : Fentes de tension et schéma interprétatif .....	67
Figure 33 : Apparition de gradins d'arrachements à l'ouest des glissements précédents (12 janvier 2005) .....	68
Figure 34 : Déformation des arbres par les mouvements de solifluxion du sol (janvier 2005) .....	68
Figure 35 : Site d'Ilbarritz (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000) .....	69
Figure 36 : Danger au pied de la falaise d'Ilbarritz : promeneurs adossés à la falaise (personnages floutés entourés de rouge) .....	70
Figure 37 : Panorama des falaises d'Ilbarritz (longueur : 400 m ; hauteur 30 à 40 m ; décembre 2004). Légendes A à E détaillées dans le texte. ....	71
Figure 38 : Fracturation dans les marno-calcaires lutétiens. (a) : fractures subparallèles à la pente topographique (environ N36°E 50°NW) ; (b) Fractures et failles perpendiculaires au trait de côte (environ N°130°E 55°SW et N130°E 53°NE) .....	72

Figure 39 : Sables plio-quadernaires. Les stratifications obliques sont soulignées par des traits noirs .....	73
Figure 40: Courbe granulométrique de l'échantillon I_acbm251104-1 .....	80
Figure 41 : Matériau du bourrelet du glissement E environ 4 mois après l'évènement (mars 2005) .....	81
Figure 42 : Diagramme de Casagrande et applications aux formations géologiques d'Illbarritz .....	82
Figure 43 : Bloc diagramme représentant le système de la source de débordement Is1 à Illbarritz .....	84
Figure 44 : Venue d'eau d'Illbarritz. Comparatif des photos de mars et novembre 2004 : un éboulement s'est produit dans cette période .....	85
Figure 45 : Localisation des sources Is1 et Is2-3 et leur bassin versant topographique. Il est important de noter que le bassin versant topographique peut être très différent du bassin versant hydrogéologique (fond cartographique : © SCAN25 IGN BD CARTHAGE).....	86
Figure 46 : Venue d'eau émergent de la nappe des sables plio-quadernaires (novembre 2004).....	87
Figure 47 : Points d'eau émergeant du plio-quadernaire à proximité des sources étudiées appartenant au bassin versant de l'Adour. Dans l'ordre sont donnés l'identité du point d'eau, le type d'arrivée d'eau, et l'altitude (attention, dans le cas des forages, c'est l'altitude du terrain qui est donné et non le niveau de la nappe ; fond cartographique : ©SCAN25 IGN ; Données BSS, extraction de mars 2004 ; géologie du substratum (Razin, 1989) .....	88
Figure 48 : Evolution des caractéristiques physico-chimiques de la source Is2-3 .....	90
Figure 49 : Evolution de la température moyenne annuelle à Biarritz de 1956 à 2004 (données météo-france 2005) .....	91
Figure 50 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff pour les sources Is1, Is2-3 et le forage F2 de Mouriscot. Ces sources ont un faciès bicarbonaté à chloruré alcalino-terreux.....	93
Figure 51 : Indices de saturation de l'eau des sources Is1 (en haut), Is2-3 (au milieu) et Mouriscot (lac et forages ; en bas) .....	94
Figure 52 : Diagramme de Schoeller - Comparatif des concentrations en ions majeurs en eau et en bas de la falaise le 03 mars 2005.....	95
Figure 53 : Coupe géologique de l'aquifère alluvial de l'Adour à Bidart (SIGES, 2005) .....	96
Figure 54 : Eboulements à Illbarritz (novembre 2004, photo J. Riss) .....	98
Figure 55 : Glissement-coulée (08/12/04) .....	99
Figure 56 : Submersion du pied du glissement situé au sud du panneau 3 (glissement visible sur la Figure 55 ; 12 janvier 2005, coefficient de marée : 100 ; hauteur : 4,27 m [données SHOM 2005]) .....	99
Figure 57 : Glissement D (c.f. Figure 37) .....	102
Figure 58 : Précipitations, températures maximales moyennes et minimales à Biarritz du 16 au 26 novembre 2004 (données météo-france 2004) .....	103
Figure 59 : (a) Sigmoides ou fentes de tensions sur le corps de la coulée active (photo J.Riss, novembre 2004) ; (b) : Schéma de principe .....	104

Figure 60 : Venue d'eau observée au pied du glissement ( décembre 2004) .....	104
Figure 61 : Vues du glissement-coulée le 26 novembre, le 08 et le 22 décembre 2004.....	106
Figure 62 : Schématisation de l'altération du matériau par l'eau de la nappe plio- quaternaire agressive dans une coupe théorique E-W de la falaise .....	107
Figure 63 : Schématisation d'un glissement de "grande" ampleur sur les falaises d'Ibarritz d'après la théorie d'altération du massif marneux par les eaux de la nappe plio-quaternaire. ....	108
Figure 64 : Glissement de "grande ampleur" (glissement D, Figure 37) à Ibarritz (novembre 2004).....	109
Figure 65 : Coulée de boue sur le flanc d'un glissement (janvier 2004).....	109

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des différentes formations géologiques rencontrées sur le site d'Itsasoan (d'après SOLS et EAUX, 2001) .....	36
Tableau 2 : Caractéristiques pressiométriques des formations géologiques rencontrées sur le site de Parlementia.....	37
Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques mécaniques obtenues par les essais d'identification des formations géologiques du site de Parlementia .....	38
Tableau 4 : Résultat de l'essai triaxial réalisé sur les formations altérées de Parlementia.....	39
Tableau 5 : Paramètres statistiques des limites d'Atterberg et teneur en eau pondérale calculés sur huit échantillons remaniés. ....	47
Tableau 6 : Etat du sol. En noir – police normale : valeurs mesurées à la coupelle de Casagrande ; en italique bleu : valeur calculée à partir de la moyenne des valeurs mesurées (essai non réalisé).....	48
Tableau 7 : Classification des sols selon l'indice de Skempton.....	49
Tableau 8 : Surface spécifique des argiles les plus courantes.....	50
Tableau 9 : Classification globale GTR (Guide de Terrassements Routiers).....	51
Tableau 10 : Classification détaillée de la classe A de la classification GTR (Guide de Terrassements Routiers).....	52
Tableau 11 : Propriétés physico-chimiques moyennes de G1 .....	57
Tableau 12 : Caractéristiques de rupture (d'après Laugier, 2002, modifié) .....	65
Tableau 13 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des marnes (d'après Falchi, 1981, modifié) .....	76
Tableau 14 : Caractéristiques des marnes saines et altérées en zone B (Riondy et al., 1991) .....	77
Tableau 15 : Caractéristiques des marnes saines et altérées en zone C (Riondy et Denis, 1992) .....	77
Tableau 16 : Caractéristiques des alluvions (Falchi, 1981) .....	78
Tableau 17 : Caractéristiques mécaniques des alluvions en zone B de la Côte des Basques (Riondy et al., 1991).....	78

Tableau 18 : Caractéristiques mécaniques des alluvions en zone C de la Côte des Basques (Riondy et Denis, 1992) .....	78
Tableau 19 : Limites d'Atterberg des échantillons prélevés dans le glissement E d'Illbarritz .....	81
Tableau 20 : Paramètres physico-chimiques moyens de l'eau de la venue d'eau Is1. Sur la première ligne sont présentés les paramètres statistiques calculés à partir de tous les échantillons; sur la seconde ligne, entre parenthèse sont présentés ceux calculés à part.....	89
Tableau 21 : Propriétés physico-chimiques de l'eau de la venue d'eau Is1 à deux endroits de prélèvement différents (bas et haut de la cascade) le même jour (03/03/2005) à 30 minutes d'intervalle. ....	89
Tableau 22 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la source Is2-3 .....	90
Tableau 23 : Concentrations moyennes en ions majeurs de la source Is1 .....	93
Tableau 24 : Concentrations moyennes en ions majeurs de la source Is2-3 .....	93
Tableau 25 : Coefficients des marées et hauteur d'eau correspondante à Saint-Jean-de-Luz du 16 au 26 novembre 2004 (données SHOM, 2005) .....	103



## 1. Contexte de l'étude

Dans le cadre de la deuxième phase du Contrat de Plan Etat-Région signé le 29 décembre 2005, l'Etat et la Région Aquitaine ont confié au BRGM la poursuite des études sur le littoral de la Côte Basque dans le cadre des travaux de l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

Les objectifs de ce projet sont d'étudier les processus d'évolution morphologique de la côte, de caractériser l'aléa lié aux mouvements de terrain et à l'érosion côtière, de proposer des parades en termes d'aménagement et d'apporter des expertises permanentes liées aux événements (instabilités ou besoin d'aménagements).

C'est dans ce contexte que le BRGM et le Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA) de l'Université Bordeaux 1 ont proposé un sujet de recherche destiné à améliorer la compréhension des processus liés aux instabilités. Il s'agit notamment d'acquérir des données quantifiées et des mesures *in situ* (mesures hydrologiques, hydrogéologiques, géomécaniques, tectoniques et structurales par le biais d'auscultations géophysiques et géotechniques) à un pas de temps très serré permettant d'avoir des informations sur la dynamique des mouvements (pré et post-rupture).

La présente étude s'inscrit dans ce contexte et se focalise sur deux sites pilotes de nature géologique différente : Harotzen Costa sur la commune de Guéthary et le golf d'Ilbarritz sur la commune de Bidart. Ces sites ont été retenus parmi les sites expérimentaux proposés par L. Deshayes (2003) pour mettre en œuvre une instrumentation dans le but de comprendre les processus d'érosion.

Par ailleurs, le site des Viviers-Basques sur la commune d'Urrugne a fait l'objet d'un rapport de stage de DEA de M. Borie en 2004.

Ce rapport technique est destiné à une diffusion interne au BRGM et au CDGA et à notamment pour objectif de définir les protocoles de suivi et les orientations du projet de recherche mis en œuvre en 2006.



## 2. Site de Guéthary

### 2.1. INTRODUCTION

Les instabilités des versants bordant la plage d'Harotzen Costa sur la commune de Guéthary se produisent dans les altérites, formations issues de l'altération *in situ* des flyschs à silex. Des mouvements de solifluxion<sup>1</sup> qui évoluent parfois en glissements plus rapides sont observés sur le site.

Ce travail s'attache tout d'abord à décrire et comprendre les instabilités de terrain. Mais celles-ci sont indéniablement liées à la nature et à la structure de la roche dans laquelle elles se produisent. C'est pourquoi la connaissance de la pétrographie, de la structure et des propriétés mécaniques des altérites est nécessaire.

De plus, dans l'optique de comprendre la localisation des mouvements de terrain actuels ou passés ainsi que les zones potentiellement instables à plus ou moins long terme, nous essaierons d'appréhender de façon succincte la genèse des altérites puis d'évaluer les possibles évolutions de ce matériau.

---

<sup>1</sup> « La solifluxion désigne tous les mouvements du sol en relation directe avec le franchissement des limites de liquidité ou de plasticité ou en relation indirecte avec le franchissement de ces limites par leur action sur la cohésion. » Avenard J.M. 1990 : sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion). Cahier ORSTOM

## 2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

### 2.2.1. Le substratum rocheux

#### a) Lithologie



Figure 1 : Carte géologique (1/25000° ; Razin, 1989) et localisation du secteur de Guéthary

Les marno-calcaires de faciès flysch à silex du Coniacien inférieur affleurant entre Guéthary et Erromardie (Figure 1) sont formés de couches turbiditiques qui atteignent une épaisseur métrique ; les intervalles pélitiques sont rarement supérieurs à 15 cm (flyschs proximaux ; Razin, 1989). Ils sont caractérisés par des lits de silex noirs parallèles à la stratification ; cette roche précipite généralement dès le début de la diagenèse, dans le sédiment carbonaté encore meuble (Foucault et Raoul, 2000), à la faveur des circulations de fluides qui se faisaient parallèlement à la stratification. Le massif rocheux de Guéthary est ainsi plus compétent que celui, par exemple, des Viviers-Basques à Urrugne où le faciès correspond à des flyschs distaux. De plus, les lits à silex forment une armature résistante dans le massif rocheux.

#### b) Etude structurale

##### • Les flyschs du Pays-Basque

La structure du massif flysch, héritée des mouvements tectoniques pyrénéens, est très complexe. Plusieurs unités tectoniques ont été dissociées par Razin (1989). Les flyschs de Guéthary appartiennent à l'unité septentrionale caractérisée par un ensemble de

déformations résultant du déplacement de cette unité vers le NW ou le NNW selon un continuum tectonique.

Dans la série turbiditique inférieure, les couches sont d'abord étirées, et diverses familles de fractures apparaissent :

- les fractures transversales « T » résultent de cette extension ; elles peuvent évoluer en failles normales si l'extension est suffisante,
- les fractures conjuguées « D » issues du cisaillement sur le plan de stratification,
- les fractures longitudinales « L », postérieures aux précédentes, légèrement ouvertes et subparallèles à l'axe des futurs plis.

Des blocages dans le cisaillement ont par la suite engendré la création de plis de demi-longueur d'onde métrique à décamétrique (plis de second ordre), notamment dans la région frontale Nord, puis de plis plurikilométriques (premier ordre ; mégastructure antiforme d'Ablaintz et synclinal de Saint Jean-de-Luz) déversés à couchés vers le nord-ouest. Les plis de seconds ordres synchronématiques s'organisent sur les flancs des mégastructures, avec un paroxysme de déformation observé sur les flancs verticaux et inverses (trait de côte en bleu, structure en rouge Figure 2).

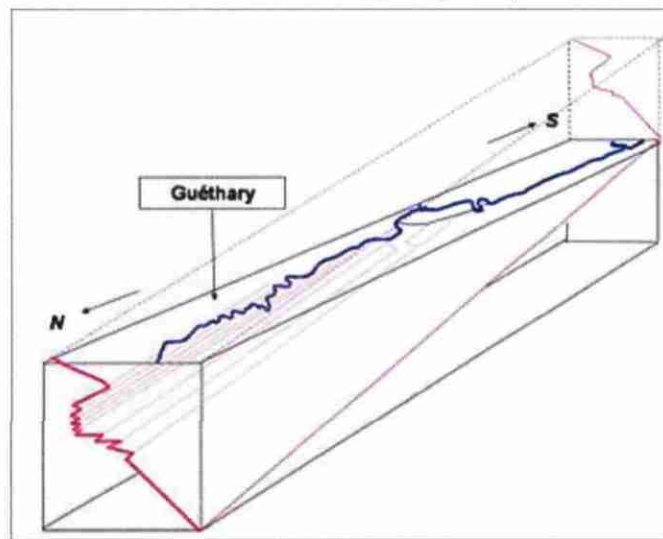


Figure 2 : Tectonogramme interprétatif de la Côte Basque (Bodou, 1972)

La compétence des flyschs influe sur le développement et la géométrie des plis. En particulier, les bandes de pliage ont une géométrie moins cylindrique et le système de relais est mieux développé dans les formations de faible compétence (exemple : Flysch des Motels Basques, où se situe le pli « en dos de baleine » par rapport au flysch de Guéthary).

## • Structure des flyschs à Guéthary

### Acquisition des données

Les données structurales concernant les flyschs de Guéthary ont été principalement acquises lors de la campagne de terrain du 12 janvier 2005 au cours de laquelle une centaine de mesures a été effectuée à la boussole et localisée sur des panoramas et plans du site exécutés préalablement.

En particulier, six plis ont été étudiés en détail au niveau de la plage située entre la jetée des Alcyons et l'escalier remontant vers le chemin des falaises (mesure de la stratification du flanc inverse et du flanc normal ; détermination de l'axe par visée puis par construction géométrique sur canevas de Wulff ; mesure de la ligne charnière et du plan axial). L'aspect de la charnière a été décrit (fentes d'extrados, stylolites, etc...). Les résultats obtenus ont été comparés et couplés avec les données structurales de Razin (1989).

La zone en aval du glissement de terrain a fait l'objet d'une étude plus détaillée. Cette zone monoclinale a donné lieu à des mesures de stratification et de fracturation : pour chaque surface lithologique mesurée et caractérisée (terme de Bouma, épaisseur du banc), deux lignes de mesure orientées et perpendiculaires entre elles sont matérialisées à l'aide d'un mètre ; chaque fracture croisant ces lignes est caractérisée (direction, pendage, caractéristiques telles que l'ouverture, le remplissage, la géométrie) et sa distance au 0 du mètre est précisée. Ainsi, on obtient dans deux directions de l'espace perpendiculaires la répartition des différentes fractures. Les deux lignes de mesures doivent être de même longueur afin d'éviter tout biais, en particulier lorsqu'une famille de fracture est parallèle à l'une des lignes de mesure ; la géométrie de l'affleurement étant souvent rectangulaire, les lignes parallèles au petit côté du rectangle ont été multipliées afin d'obtenir la même longueur de mesure dans chaque direction (Figure 3).

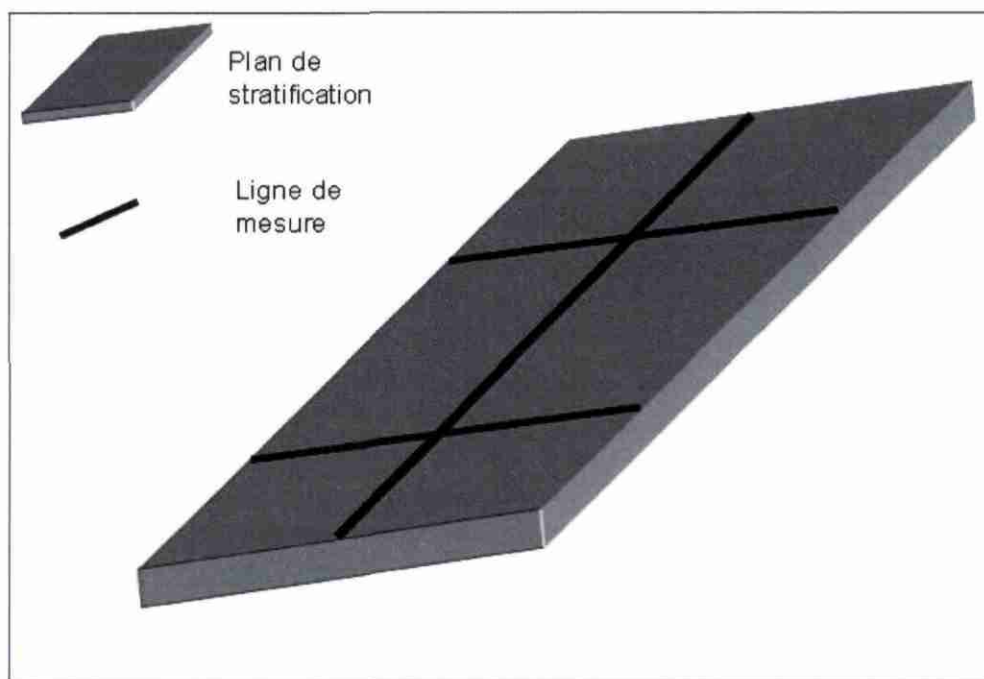


Figure 3 : Protocole de mesure de la fracturation

La polarité des séries a été déterminée lorsque cela était possible grâce aux figures de base de banc (*flut cast*, terriers, figures de charges, etc...) typique des turbidites ainsi qu'à l'ordre des termes de la séquence de Bouma.

Les mesures acquises de direction et pendage sont ensuite traitées à l'aide du logiciel Stereonett®.

### Résultats

L'ensemble plissé situé de Guéthary à Saint Jean-de-Luz appartient au flanc inverse de la mégastructure antiforme d'Ablaintz et au synclinal de Saint Jean-de-Luz. Cette disposition est à l'origine de plis de flexion, en chevron, d'amplitude et demi-longueur d'onde métrique à décamétrique. Ces plis sont déjetés et déversés, voire couchés vers le nord-ouest, et présentent un fort aplatissement ; leur orientation préférentielle est de N55°E 15°NE (on notera quelques valeurs dispersées entre N-S et N100°E), et leur plan axial peu incliné mais dont le pendage peut varier entre 45°SE et 30°NW (tête plongeante). Les bancs compétents forment des plis isopaques, concentriques alors que les interbancs incompétents sont à l'origine de bourrages au niveau des charnières (Figure 4 ; Razin, 1989).

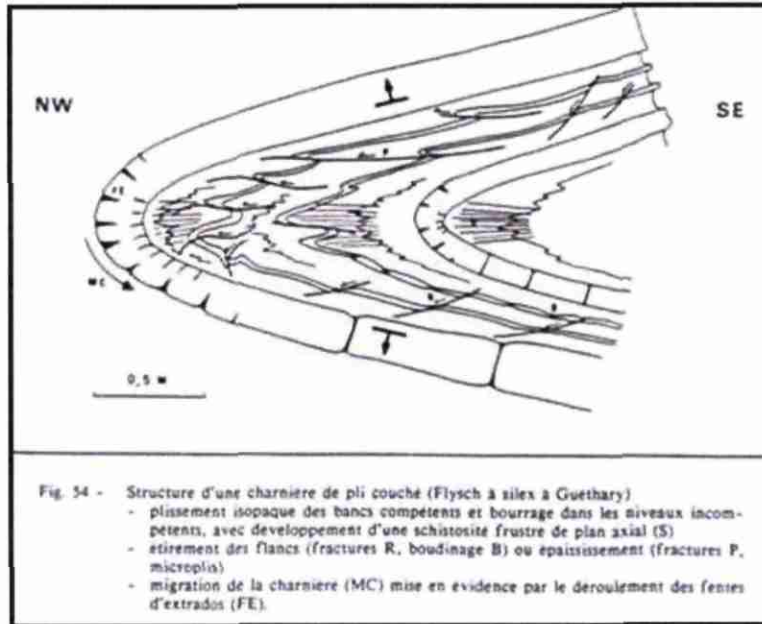


Figure 4 : Structure d'une charnière de pli couché (flysch à silex de Guéthary ; Razin, 1989)

Mais l'ensemble des flyschs affleurants sur la plage d'Harotzen Costa n'est pas plissé. Il existe en effet des zones monoclinales comme l'atteste l'analyse structurale (Figure 5) et en particulier un secteur long d'environ 200 m en série inverse, de direction et pendage moyen N165°E 18°NE.

Cette zone monoclinale est fracturée et on relève quatre familles de fractures de pendage perpendiculaire au plan de stratification (A : N89°E 88°N, direction perpendiculaire à celle de la stratification ↔ fractures T ; B : N124°E 82°SW ↔ fractures D); C : N174°E 75°SW, de direction parallèle à celle de la stratification ↔ fractures L ; D : N25°E 82°NW ↔ fractures D; Figure 6). On retrouve les quatre directions de fractures tectoniques typiques des flyschs basques : L, T et les fractures conjuguées D<sub>1</sub> et 2.

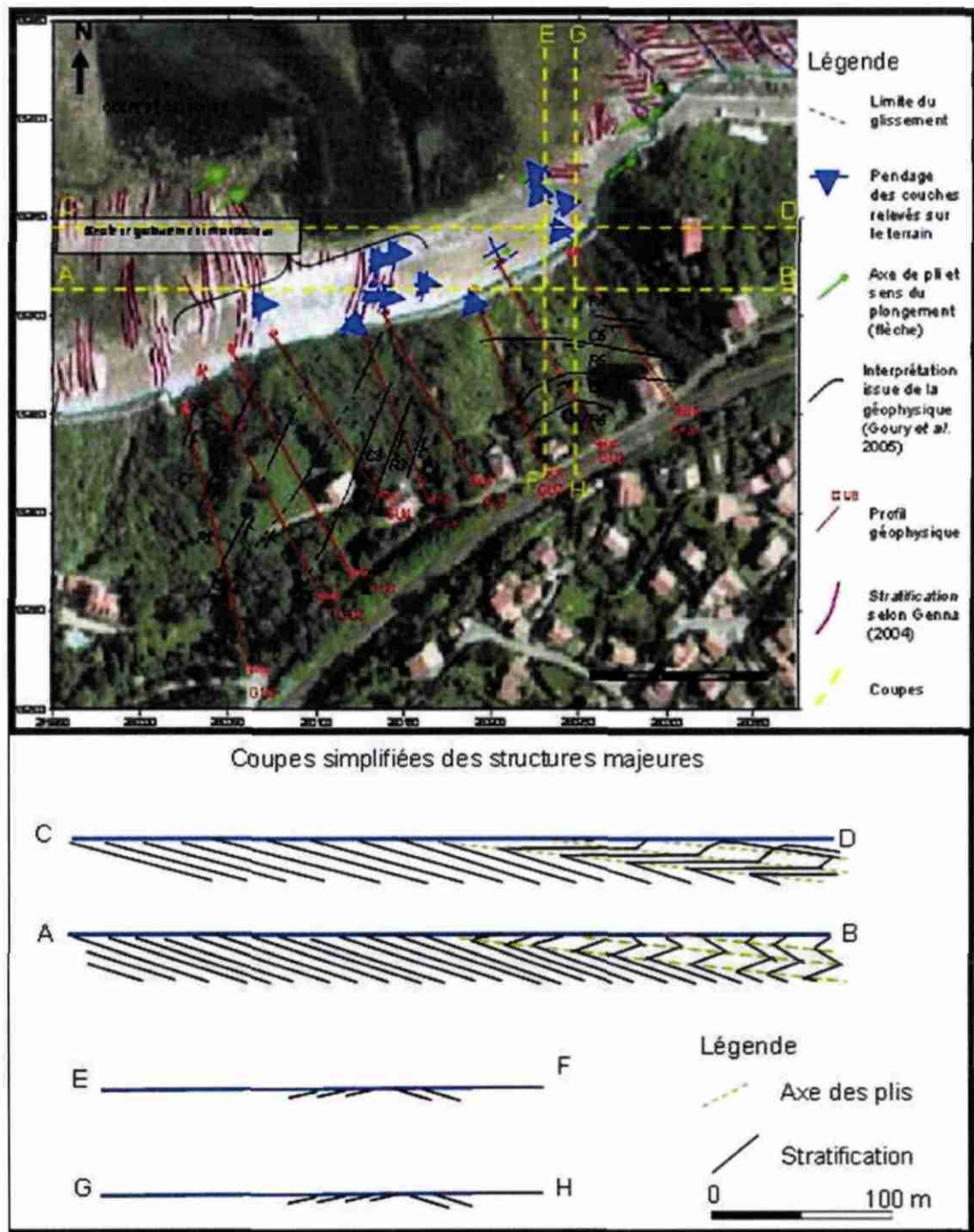


Figure 5 : Schéma structural des flyschs sur la plage d'Harotzen Costa (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)

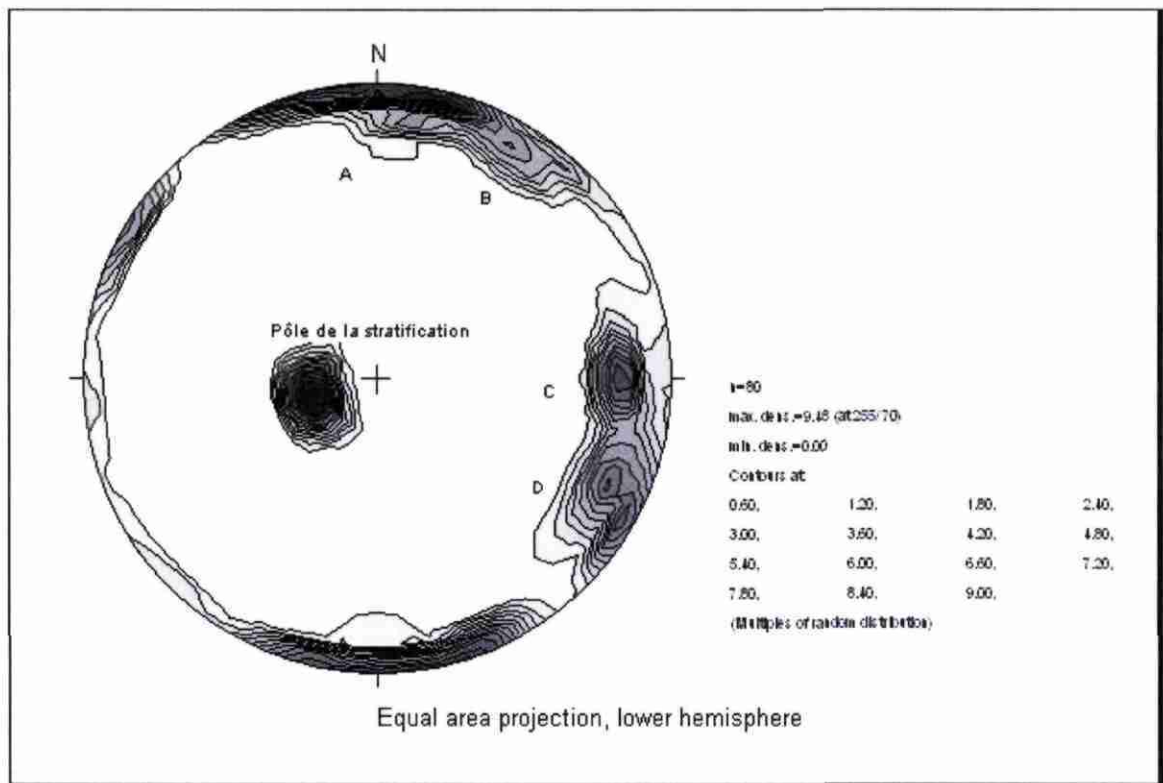


Figure 6 : Courbes d'isodensité des pôles des discontinuités dans la zone monoclinale représentées sur le canevas de Schmidt (conservation des aires), projection sur l'hémisphère inférieur. Les zones A, B, C, D correspondent aux pôles des fractures des familles principales.

• Géomorphologie marine

La topographie marine du Pays Basque se particularise par un haut fond en demi-cercle qui forme une barrière à l'apport de sédiments allochtones (Pardineille, 2000). En superposant la carte bathymétrique (Figure 7) à la carte géologique (Figure 8), on constate que cette barrière est formée globalement de terrains miocènes à quaternaires, marno-calcaires et conglomératiques, alors que la dépression semble correspondre aux niveaux marneux paléocène ; les flyschs crétacés forment le relief côtier.

Dans les flyschs se dessinent des canyons sous-marins qui correspondraient à des paléo-vallées (Figure 7 ; Genna, communication orale) qui sont en continuité avec la plupart des vallées actuelles. Le développement de l'altérite serait lié pour partie à ces paléo-vallées (Genna et al., 2004b). Les axes de circulations principaux correspondent en amont à des criques (du sud au nord : Baie de Loya, Baie de Saint Jean-de-Luz, l'Anse d'Erromardie, l'Anse de Lafiténia) et/ou des cours d'eau (La Nive et la Nivelle qui se jettent dans la baie de Saint Jean-de-Luz, l'Handia dans l'Anse d'Erromardie, l'Ouhabia à Bidart). Cependant, bien que le paléochenal de Harotzen Costa forme une canalisation importante, il ne correspond à aucune dépression marquée dans la topographie continentale ou encore cours d'eau actuel (Figure 9). La présence de ce

paléochenal permet de supposer l'existence à Guéthary d'une paléovallée au niveau de Harotzen Costa qui serait actuellement masquée par une forte épaisseur d'altérites. Mais en l'état actuel des connaissances, aucune preuve ne permet d'étayer cette hypothèse.

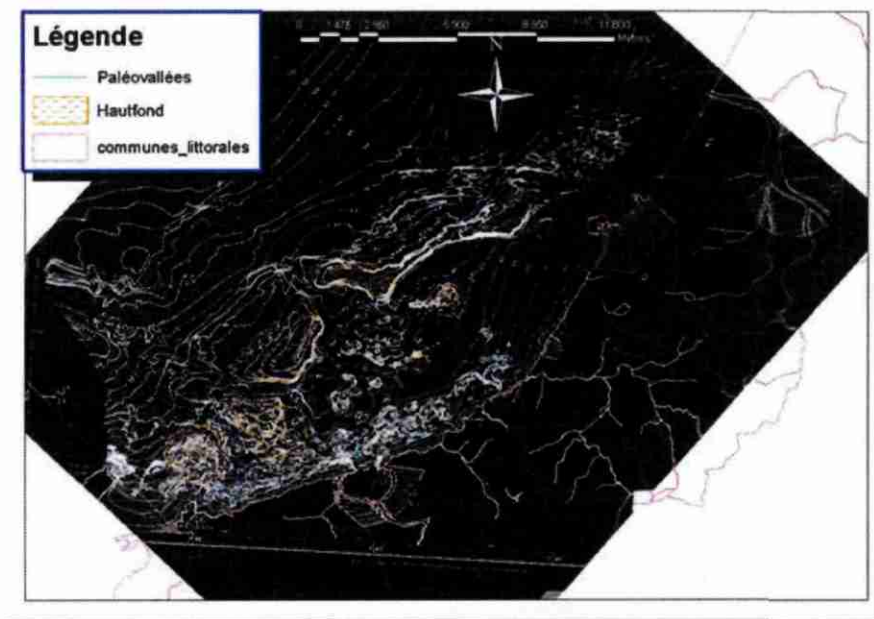


Figure 7 : Carte bathymétrique (IFREMER, 1999) - Paléo-vallées et hauts-fonds

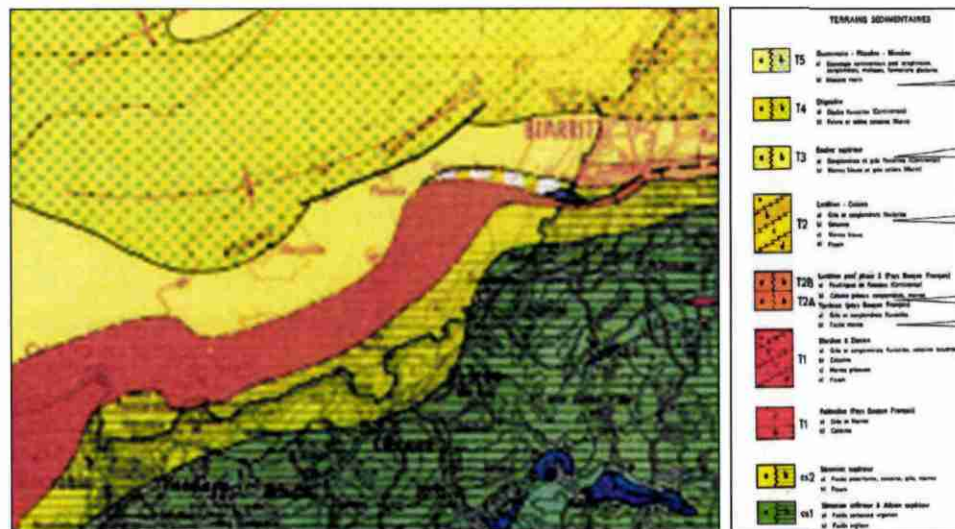


Figure 8 : Extrait de la carte géologique Les hauts fonds « le plateau de Saint Jean-de-Luz », « Illarguita », « Placeta », « Campo Banco » sont formés par les formations Eocènes à Miocènes. Seul le haut fond en continuité de la Pointe-Sainte-Anne est formé par les terrains Paléocènes.

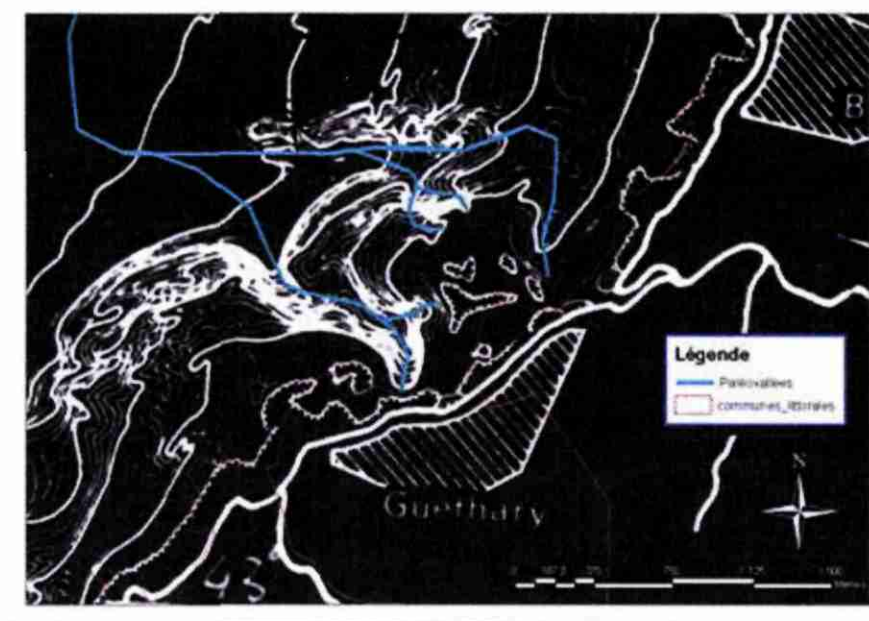


Figure 9 : Carte bathymétrique au droit de Guéthary (IFREMER, 1999) – Hypothétiques paléo-vallées

Les paléocirculations peuvent avoir des conséquences directes sur la répartition actuelle des altérites et sur la sensibilité de certaines zones géographiques aux mouvements de terrain. En effet, il est fortement probable que l'altérite s'est développée préférentiellement dans ces zones du fait de la présence d'eau. C'est dans cette optique que l'étude des mouvements de terrain affectant les falaises basques sera complétée par l'étude des paléo-vallées agissant indirectement comme facteur de préparation et de prédisposition.

L'observation des photographies aériennes révèle l'existence de lagunes dont les limites semblent suivre des directions structurales (Figure 10) et notamment la stratification. Au niveau de ces lagunes, la structure de la roche mère n'est pas visible, que ce soit sur le terrain ou par photo-interprétation, seul apparaît un amalgame de blocs de flyschs recouvert par la faune et la flore marine.

Certaines théories les associent à des ports romains ou à d'anciens sites de salaison, et leur attribut ainsi une origine anthropique (C.Mallet, communication orale), mais aucun document archéologique ne permet à ce jour de confirmer cette hypothèse. Par ailleurs, ces dépressions sont fermées, aucun accès à marée basse n'est possible, ce qui semble écarter la thèse des ports.

On remarquera de plus que les deux lagunes majeures situées à Harotzen Costa sont en continuité avec une zone continentale topographique en dépression et instable. La même remarque peut être effectuée pour la lagune de l'Anse de Cénitz ; elle est en effet

située en contrebas d'une zone qui a été mobilisée à plusieurs reprises par des mouvements de terrain.

Ces dépressions pourraient ainsi être reliées à des zones où l'épaisseur d'altérites était plus forte qu'aux alentours et ainsi à des zones plus exposées aux mouvements de terrains. Quel que soit le mode de formation de ces lagunes (paléo-bassins et/ou paléo-vallées liés à aux circulations hydrogéologiques et/ou zone de faiblesse structurale, etc...) elles auraient pu être le siège de mouvements de terrain sur les paléo-côtes précédant la fin de la transgression Flandrienne, alors que le niveau de l'océan était plus bas. Elles seraient ainsi « les cicatrices » de zones particulièrement instables.



Figure 10 : Lagunes observées sur les orthophotographies 2000 sur l'estran ; (a) sur l'ensemble des flyschs de Guéthary ; (b) à Guéthary (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)

## 2.2.2. Les altérites

### a) Lithologie

Sur le site d'Harotzen Costa, le flysch sain est recouvert par une forte épaisseur d'altérite, roche résiduelle provenant de l'altération du flysch (Lebret *et al.*, 1993). Le log lithologique des altérites dans la niche d'arrachement du glissement de janvier 2004 a été relevé (Figure 11). Les altérites sont composées d'argiles généralement litées dans

lesquelles apparaissent des bancs de silex très fracturés en clastes anguleux, centimétriques pour la plupart, mais avec quelques éléments décimétriques.

Les niveaux argileux sont bleutés ou ocres (Figure 12), certains passages d'un niveau ocre à un niveau bleuté rappellent les fronts d'oxydation qu'on peut observer dans les flyschs sains (Figure 12 (b)). Les silex, noirs dans les flyschs sains, sont blancs-gris dans l'altérite. Ce changement de couleur semble être lié à un phénomène d'altération de la silice par exemple par changement du système de cristallisation de la silice : la couleur sombre est habituellement attribuée à l'opale (amorphe) ou à la présence de matière organique (charbonneuse comme pour la lydienne par exemple), et la couleur claire liée à la diffusion de la lumière dans le cortex microporeux de la calcédoine (Foucault et Raoult, 2000). Etudier des lames minces dans le silex sain et altéré permettrait d'expliquer cette variation de teinte et de caractériser en partie le mode d'altération de la silice.

On remarque également que les bancs siliceux sont beaucoup plus fracturés dans l'altérite, du moins dans les zones d'affleurement, et ne génèrent ainsi pas l'effet d'armature qu'ils engendrent dans les flyschs sains.

Le test simple à l'acide chlorhydrique sur les matériaux formant l'altérite montre qu'il ne subsiste pas de calcite en général ; néanmoins, certains niveaux du mur de l'altérite, à proximité immédiate du flysch sain, réagissent encore faiblement au contact de l'acide, entraînant un faible dégagement de CO<sub>2</sub>.

Les analyses au diffractomètre de rayons X, en cours, donneront la minéralogie détaillée des niveaux argileux des altérites. Une première série d'analyses, réalisées sur poudre totale d'échantillons prélevés dans le glissement de terrain et dans la niche d'arrachement (niveau ocre) ont d'ores et déjà montré que le matériau est composé d'une grande part de silice et aucune forme de CaCO<sub>3</sub> n'a été détectée. Une seconde série de mesure est en cours sur des échantillons préparés dans l'optique de l'analyse de la fraction argileuse uniquement (fraction inférieure à 2µm). Après avoir subi un traitement afin d'éliminer la matière organique à l'origine de pics de diffractions larges (traitement de l'échantillon dans une atmosphère à oxygène électroniquement excité à la température de 100°C), les argiles sont préparées en un agrégat de minéraux argileux orientés par la méthode de la lame orientée (Moore et Reynolds, 1997). Cette méthode, facile à mettre en œuvre, est largement employée dans les analyses traditionnelles. Les prélèvements ont été effectués dans les niveaux bleutés et ocres de la niche d'arrachement ainsi que dans un niveau argileux brun-ocre de la base des altérites.

La nature des argiles renseignera non seulement sur l'avancement de l'altération du matériau, mais aussi sur la sensibilité des altérites à l'eau dans une optique géotechnique qui sera détaillée dans le paragraphe 2.2.3. En effet, certaines argiles sont plus aptes à absorber de l'eau et ainsi à gonfler et à favoriser des mouvements de terrain.

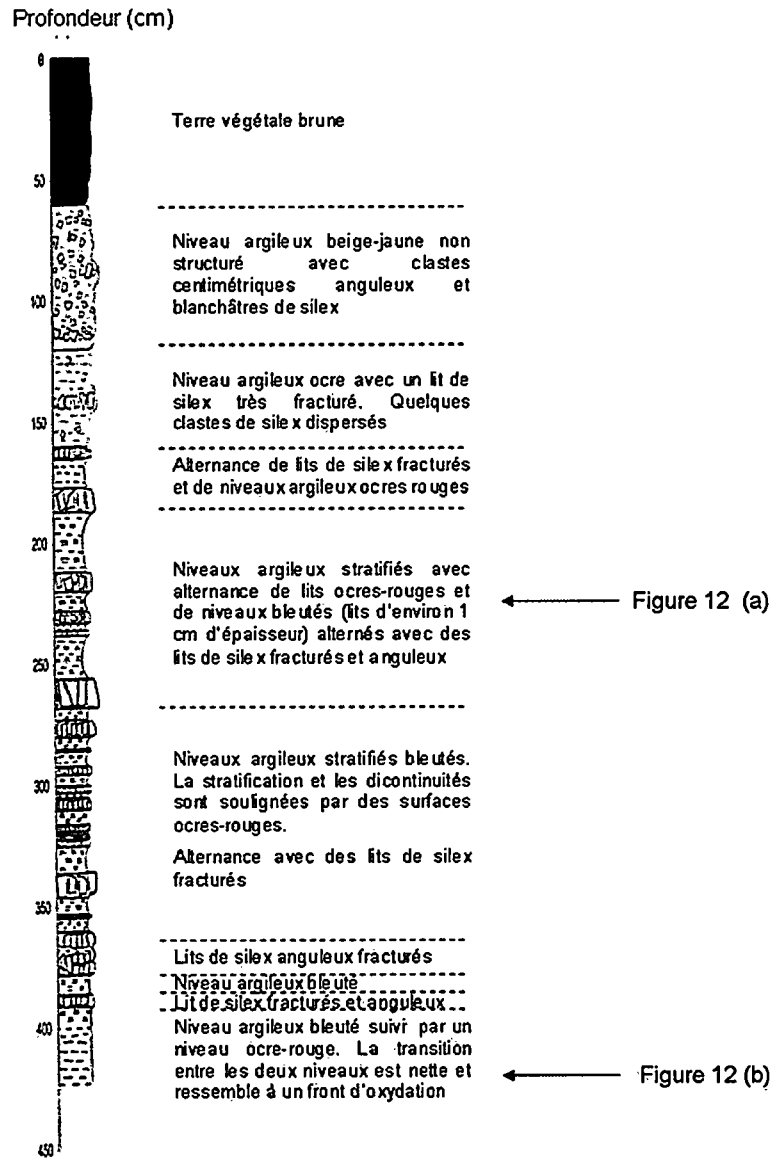


Figure 11 : Log lithologique des altérites dans la niche d'arrachement du glissement de terrain de janvier 2004

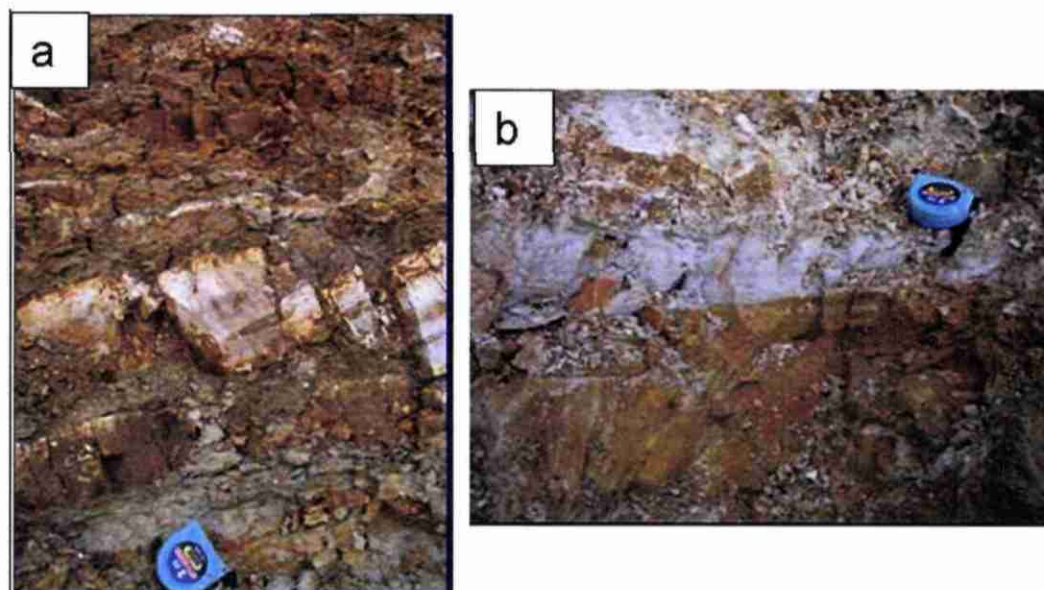


Figure 12 : Altérite. Coupe dans la niche d'arrachement. (a) : Alternance de niveaux argileux bleutés et de niveaux argileux ocres-rouges. Les bancs blancs-gris sont des bancs de silice ; (b) : front d'oxydation dans les altérites.

### **b) Formation**

L'altérite observée à Guéthary semble avoir subi des transformations structurales et en particulier une perte de volume de plus de 50% (Genna *et al.*, 2004b) liée probablement à un tassement du matériau suite à sa décalcification par dissolution, à la dégradation de la matière organique et à des perturbations liées à la néotectonique. Il s'agit donc d'allotérites par opposition aux isaltérites qui ont conservé l'aspect des structures de la roche mère (grains, texture, fissuration ; Lebret *et al.*, 1993).

L'altération peut s'être développée depuis le toit des flyschs par altération météorique mais aussi à partir de circulations de fluides dans un réseau karstique sous couverture des sables plio-quadernaires. La présence de réseaux de types karstiques dans les flyschs (les flyschs du Pays Basque en général, affleurants de Hendaye à Bidart sur la côte) est révélée par de nombreux indices (Figure 13) :

- données physico-chimiques des eaux (Borie, 2004),
- conduits formés par la circulation de fluides (Viviers-Basques, Guéthary),
- tufs (Baie de Loya),

- dépressions circulaires similaires à des dolines (Baie de Loya, Viviers-Basques), caractérisées par un fond humide et un alignement sur des venues d'eau sur la falaise (peu de confusion possible avec des trous d'engins explosifs : ces derniers sont caractérisés par une remonté des bords de la dépression et sont indifférents secs ou humides, ils sont visibles en particulier à l'extrémité Ouest de la baie),
- modelé du toit des flyschs semblable à un lapiaz (Viviers-Basques).

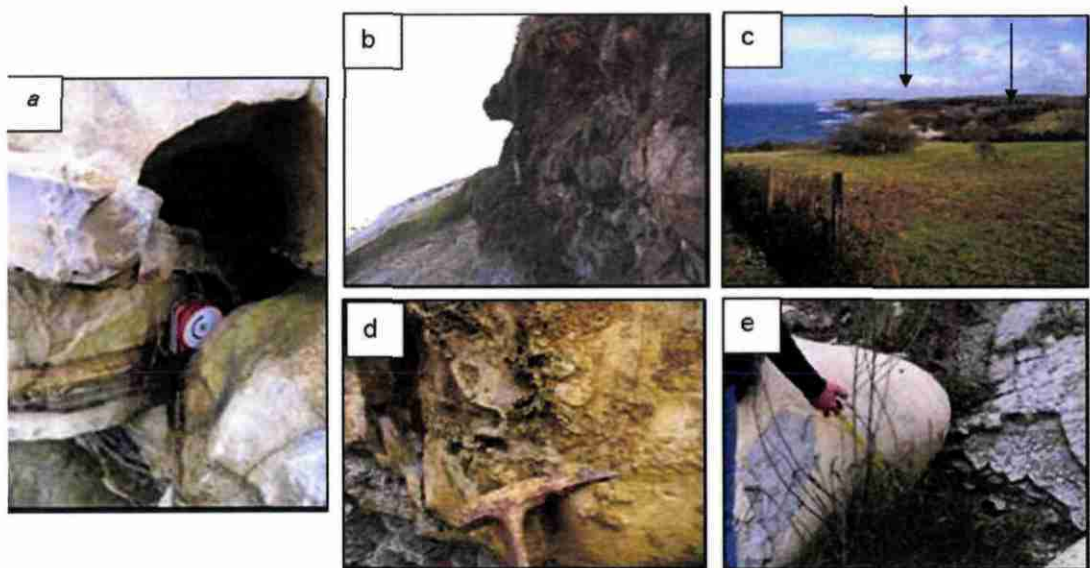


Figure 13 : Différents modelés de type karstique observés sur les flyschs du Pays Basque ; (a) : Chenaux (Guéthary) ; (b) : Dépôts de Tuf au pied de la cascade (Baie de Loya) ; (c) : Dolines repérées par les flèches noires (Baie de Loya) ; (d) : traces d'écoulements (Viviers-Basques) ; (e) : Modelé de type Lapiaz (Viviers-Basques)

Les boyaux observés sont évidés à l'affleurement aux Viviers-Basques d'où émergent les sources V\_EM1 et V\_EM2 (Borie, 2004). Les conduits karstiques apparaissant à l'affleurement à Guéthary sont remplis d'argile ; cette formation semble en place étant donné que des bancs de silex subsistent au sein du chenal (Figure 14) et résulterait ainsi de la transformation *in situ* de la roche saine. Cette observation rejoint celles des fantômes de roche, résidus d'altération restés sur place déjà constatés, par exemple dans des calcaires carbonifères en Belgique (Kaufman *et al.*, 1999). Selon le même auteur, à la suite d'un examen au MEB et à la microsonde d'échantillons évoluant du calcaire sain jusqu'à l'altérite associée, « le degré d'altération est croissant depuis les parois saines jusqu'au centre de la forme. Ceci se traduit, d'un point de vue macroscopique, par une modification de la teinte, une diminution de la densité et de la cohésion des matériaux résiduels ». Ces caractéristiques macroscopiques sont similaires à celles observées sur les matériaux de Guéthary.



*Figure 14 : Roche fantôme au sein d'un conduit karstique à Guéthary*

Dans le cas de Guéthary et des Viviers-Basques, la zone altérée s'est développée de part et d'autre de discontinuités du massif rocheux comme semblent le montrer les anneaux d'oxydation qui bordent certaines fractures de la roche saine (Figure 15) à proximité de la zone altérée. Ces fractures sont ou pas remplies de calcite, bien que la majorité semble être vide de tout remplissage. La calcite présente dans les fractures auréolées d'oxyde apparaît parfois automorphe (Figure 16) : cela indique que le minéral avait la place de cristalliser et donc qu'un vide existait alors entre les épontes de la discontinuité permettant aux fluides de circuler. Cependant, nous n'avons à présent aucun indice quant à l'âge de formation de cette calcite automorphe qui peut s'être formée pendant l'orogénèse pyrénéenne ou encore lors de circulation de fluides au quaternaire remplissant des discontinuités néoformées.



*Figure 15 : Anneaux d'oxydation autour de discontinuités à Guéthary*



Figure 16 : Calcite automorphe sur l'éponte d'une fracture à Guéthary

L'altérite serait ainsi le produit final d'une altération d'un massif rocheux par ce biais (Figure 16). D'après Genna (communication orale), les plus grandes épaisseurs d'altérites se situeraient au droit de *paléo-vallées*, et donc sur le chemin de circulations importantes de fluides (*c.f.* paragraphe 2.2.1 b) à l'origine de la dissolution des éléments carbonatés.

La dissolution de calcite nécessite une importante concentration de  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau. Ce gaz, présent naturellement dans l'atmosphère pour près de 0,03%, est engendré également par l'activité biologique en subsurface et par la décomposition de la matière organique présente dans la formation rocheuse. La teneur en matière organique des formations traversées par les fluides conditionnera ainsi pour partie le potentiel agressif de l'eau. La mesure de teneur en matière organique des flyschs et des altérites est une des perspectives de ce travail. De plus, au point de vue géotechnique, la matière organique est un facteur néfaste à la stabilité d'un versant argileux car elle augmente sa sensibilité à l'eau d'une part et, d'autre part, la dégradation de matière organique engendre des variations de volumes.

La circulation des fluides se fait préférentiellement à travers les discontinuités ouvertes (porosité de fracture). La présence des anneaux d'oxydations démontre cependant que l'eau a pénétré dans la roche par le biais de la porosité de pores. Mais dans l'hypothèse selon laquelle ces anneaux d'oxydation n'apparaîtraient que dans les zones de transition entre la roche saine et l'altérite, on peut se demander pourquoi les fluides n'ont pas pénétré dans la matrice rocheuse plus profondément (en altitude). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- on a atteint un niveau imperméable, mur de la nappe, qui empêchait les circulations plus en profondeur.

- le flysch à silex du Coniacien affleurant à Guéthary était recouvert des séries flyschs du Santonien, du Campanien, etc... avant de subir l'orogénèse Pyrénéenne.

L'apparition de cette série à l'affleurement a eu pour conséquence la décompaction du matériau notamment dans sa partie supérieure. On peut alors supposer l'ouverture de discontinuités (fracturation et joints stratigraphiques comme l'illustre l'oxydation observée le long de certaines de ces discontinuités ; Figure 17) et de pores. La décompaction et l'ouverture d'une nouvelle porosité en surface aurait permis aux fluides de pénétrer au sein de la roche.



Figure 17 : Oxydation d'interbanc argileux du flysch près de l'interface banc compétent / interbanc argileux. Cette zone oxydée est un témoignage du développement de l'altération.

- existe-t'il un lien avec le réajustement isostatique ? En effet, le Pays Basque est le siège d'une remontée de l'écorce terrestre (bien que certains secteurs s'affaissent (st Jean-de-Luz : + 0,75 mm/an en 1987 ; Anglet : + 1,5mm/an) Pardineille, 2000)

Genna (2004, communication orale) distingue la fracturation d'origine tectonique de la fracturation liée à la formation de l'altérite. Cette dernière est caractérisée par des anneaux d'oxydation (Figure 15) alors que les fractures tectoniques sont remplies de calcite, mais son origine reste indéterminée. Plusieurs hypothèses sont possibles :

- ces fractures auréolées d'oxydes sont-elles des fractures tectoniques qui auraient constitué des conduits privilégiés pour la circulation des fluides et donc à l'altération ? → fractures héritées de la tectonique

- se sont-elles formées par effet de contraintes liées à des phénomènes climatiques (gel – dégel en ère glaciaire par exemple) ou à la décompaction du matériau suite à son érosion ? → fractures héritées de l'altération physique de la roche ?

Les modalités de formation de l'altérite sont encore mal connues aujourd'hui. Or, celles-ci ont des conséquences importantes sur les propriétés du matériau et sur la structure du massif. **L'étude des instabilités des falaises de Guéthary nécessite ainsi une meilleure connaissance des processus physico-chimiques ayant conduits à la formation de l'altérite.**

### 2.2.3. Propriétés des flyschs à silex de Guéthary et de leurs altérites

#### a) Généralités sur le comportement des sols fins

##### • Effet sur les mouvements de terrain

De nombreux facteurs sensibilisent ou au contraire stabilisent un sol fin face aux mouvements de terrains. En voici une liste non exhaustive :

- La perméabilité du matériau : la présence d'un fort pourcentage de particules fines, inférieures à 50 microns, diminue généralement la perméabilité. La nature du sol influe de plus sur ce paramètre : un sol sableux, a priori perméable, peut voir sa perméabilité diminuer suite à l'action d'argiles gonflantes ; par ailleurs, l'hétérométrie d'un sol fait diminuer sa perméabilité, les fines comblant les pores entre les grains plus grossiers. D'autre part, une densité sèche élevée est particulièrement défavorable à la circulation de fluides. De plus, l'infiltration de l'eau de surface (ruissellement ou précipitations) est fortement liée à la capacité d'infiltration de la surface du sol et aux états structuraux de surface.
- La nature des argiles : certaines argiles emmagasinent une grande quantité d'eau avant de devenir liquides (illites, vermiculites, montmorillonites), ayant ainsi une possibilité de gonflement, elles deviennent très favorables aux mouvements en masse par franchissement de la limite de plasticité. D'autres au contraire, comme la kaolinite, pauvre en silice, varient très peu de volume en présence d'eau : les déformations plastiques seront rares, mais le rapide franchissement de la limite de liquidité sera à l'origine de glissements avec déchirures.
- La teneur en matière organique humifiée : elle augmente avec l'augmentation des limites d'Atterberg qui s'élèvent également.
- La teneur en carbonate de calcium, en magnésium et en gypse : ces minéraux auraient une influence contraire aux précédentes par leur effet défloculant ; l'augmentation en ces éléments induit souvent une diminution des valeurs des limites d'Atterberg.
- La teneur en oxydes de fer : l'augmentation de la quantité d'oxydes de fer contribue à l'élévation des valeurs des limites d'Atterberg.

Les paramètres biotiques : selon le type de végétation, d'enracinement, et la présence d'animaux fouisseurs, le matériau de surface sera plus ou moins stable.

Par conséquent, avec l'intention d'identifier les particules de sols, divers essais sont réalisés.

### **Essais d'identification**

La connaissance d'un matériau naturel s'effectue par sa description par des essais d'identifications qui permettent de le qualifier en le situant dans les classifications habituellement utilisées en mécanique des sols (les plus courantes sont la classification USCS/LCPC (*Unified Soil Classification System*/Laboratoire des Ponts et Chaussées) et classification des sols du Guide de Terrassements Routiers routière (GTR) qui présente l'avantage d'être plus précise pour les argiles et de tenir compte de l'altérabilité des matériaux).

Dans un premier temps, le matériau est étudié par description pétrographique, à l'œil nu et au microscope polarisant (étude minéralogique, structurale et texturale).

Les méthodes de description quantitative habituellement utilisée en géotechnique sont la granulométrie par tamisage jusqu'à 80 µm puis par sédimentométrie en deçà, les limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène, l'activité des argiles, teneur en carbonates, teneur en matière organique, test d'humification de von Post (décrit l'état de décomposition de la matière organique). Le comportement des argiles est caractérisé par leur indice de plasticité et leur limite de liquidité (limites d'Atterberg).

### **Essais mécaniques**

L'étude du comportement mécanique d'un sol fin est généralement plus complexe que celle de matériaux grenus tels le sable. En effet, ces sols contiennent toujours de l'eau et sont très peu perméables. Les interactions entre les particules ont un caractère visqueux : les déformations ne sont pas instantanées, elles peuvent se prolonger indéfiniment (Magnan, 2000). L'analyse ne doit ainsi pas se faire selon une simple relation de contraintes et déformations.

Néanmoins, ces sols présentent l'avantage de pouvoir être prélevés sur le terrain en carottes en limitant le remaniement. Ceci donne accès à des caractéristiques proches de la réalité. Toutefois, un essai sur un échantillon de quelques centimètres de diamètre ne sera jamais représentatif des caractéristiques de l'ensemble d'un massif.

Deux types d'essais permettent habituellement d'étudier la déformabilité des sols argileux (Magnan, 2000) :

- l'oedomètre (essai de fluage)
- l'essai triaxial

La plupart des études sur les sols argileux montrent en général que l'eau interstitielle de ces sols, très peu perméables, exerce une forte influence sur l'évolution des déformations.

Les caractéristiques mécaniques d'un sol peuvent être affaiblies par divers facteurs et en particulier par les mouvements de solifluxions comme on peut en observer sur les falaises de Guéthary. Le matériau est ensuite d'autant plus facilement mobilisable par des mouvements de terrains rapides que les caractéristiques mécaniques sont proches des caractéristiques résiduelles.

### **b) Bibliographie des études géotechniques**

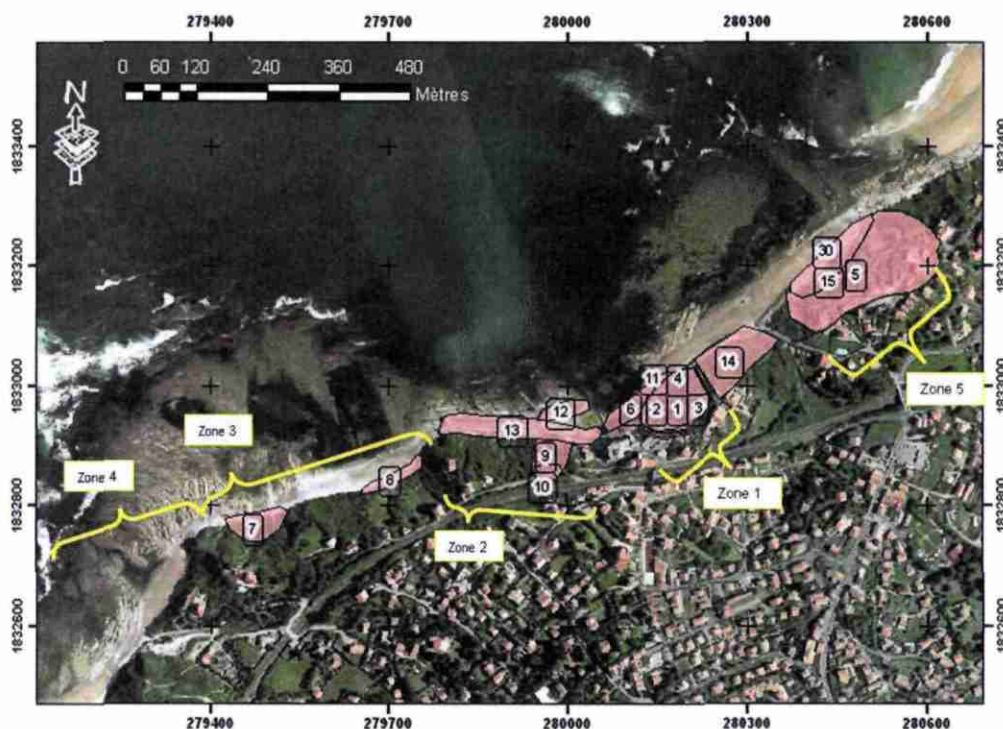
Les flyschs à Silex ou les altérites qui en sont issues affleurent sur le littoral depuis la plage d'Erromardie au sud jusqu'à la plage du centre de Bidart au nord.

Le littoral de Guéthary, long de 1,2 km, présente des signes d'instabilité de façon chronique, et a ainsi donné lieu à de nombreuses études (Figure 18) recensées lors de l'étude menée par A. Alexandre (Alexandre *et al.*, 2003). On peut le subdiviser en quatre lieux-dits qui sont, du nord-est vers le sud-ouest :

- zone 1 : les lacets d'Itsasoan représentent environ 100 m de linéaire côtier ;
- zone 2 : la jetée des alcyons longue de 250 m, séparée de la zone 1 par le port,
- zone 3 : les falaises collinaires de la plage d'Harotzen Costa sur 460 m,
- zone 4 : l'anse de Genitz représentant un linéaire de 350 m.

Les deux premières zones sont protégées de l'océan par des masques d'enrochement et une promenade bétonnée avec murs de remblais. Des enrochements existent par endroits en pied des falaises d'Harotzen Costa.

La plage de Parmentia (zone 5) sur la commune de Bidart est la continuité des lacets d'Itsasoan. Cette zone, très instable, a également été le site de reconnaissances géotechniques.



**Légende**

**Etude\_geotechnique**

Etude\_geotechnique

OBJECTID*	Entreprise	Date	Commentaires
1	Soletanche entreprise	31/07/1978	Confortement d'un glissement - Rapport 3149AB
2	SIMECSOL	23/04/1998	Diagnostic géotechnique
3	SOLTECHNIC	25/02/1999	Confortement chemin et mur
4	Soils et Eaux	mars 2001	R089-0103JMC/M et R120-0204JCM/AL
5	SORES	1995	Objectif : proposer des solutions confortatives
6	Ingénieur T.PE	Novembre 1965	Enrochement des jetées promenades
7	Entreprise LEFEBVRE - DDE 64	juillet 1986	Enrochements
8	Entreprise LEFEBVRE - DDE 64	Mars 1999	Talus en enrochement
9	Gaudin E. Géomètre expert DPLG	juillet 1966	Plan des lieux pour réparation de l'éboulement
10	??	août 1976	restauration d'un mur de soutènements (4 sondages)
11	Ponts et Chaussées des Basses-Pyrénées	10/06/1966	mise en place de drains + gabions + 6 sondages
12	Entreprise LEFEBVRE - DDE 64	Février 1992	Protection de la digue par des enrochements
13	Société MOTER - DDE 64	1979	Enrochements
14	Ingénieur des T.P.E.	janvier 1960	Drains, murs en maçonnerie, enrochements
15	SOGELERG-SOGREAH	Février 1998	Rapport n°030309 - projet non abouti
30	J.Belbeder - travaux publics	mars 1963	Construction d'un seuil de Garantie-Enrochement

Figure 18 : Localisation des études géotechniques recensées sur les communes de Bidart et Guéthary concernant les flyschs à silex ou les altérites de cette formation. (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)

**• Zone 1 : les lacets d'Itsasoan**

De nombreuses reconnaissances géotechniques ont été réalisées pour la propriété Landa Berria, qui surplombe la mer au lieu dit des lacets d'Itsasoan :

- 31/07/1978 : SOLETANCHE ENTREPRISE (1978) dans le cadre du confortement d'un premier glissement sur le côté Ouest de la propriété, ont été réalisés :
  - 8 sondages à la tarière à main, d'une profondeur maximale de 2,90 m, deux sondages sont inexploitable (refus à 50 cm),
  - 8 sondages au pénétromètre dynamique qui ont permis d'identifier la profondeur du substratum (dans les archives recueillies par A. Alexandre et ses co-auteurs (2003), le diagramme de l'essai 2 est absent),
- 05/06/1986 : DDE : étude des lacets d'Itsasoan et sa résidence (OPL/86.101 ; Benech, 1997),
- 29/01/1993 : DDE : étude partielle des lacets d'Itsasoan, la zone instable active étant plus réduite en 1993 qu'en 1986 (OPL/93.029 ; Benech, 1997),
- 23/04/1998 : SIMECSOL dans le cadre d'un diagnostic géotechnique (d'après le rapport de SOLS et EAUX, 2001),
- 25/02/1999 : SOLTECHNIC dans le cadre d'une étude pour le confortement du chemin privé et le mur Nord-ouest de la propriété, ont été réalisés (d'après le rapport de SOLS et EAUX, 2001) :
  - des sondages piézométriques,
  - des sondages au pénétromètre dynamique,
- Mars 2001 : SOLS ET EAUX (2001), dans le cadre de la mise en place de confortements destinés à la stabilisation de glissements actifs, ont été réalisés :
  - l'isobathe du toit du substratum,
  - des coupes géologiques,
  - des plans de situation des renforcements et drainages,
  - 16 sondages au pénétromètre dynamique,
  - 1 sondage destiné à la réalisation d'essais pressiométriques,
  - des calculs de stabilité à l'aide du logiciel TALREN 97, méthode de Bishop
  - 1 essai de cisaillement lent CD sur les sols superficiels glissés et remaniés prélevés dans les talus.

Dans les études réalisées par SIMECSOL et SOLS ET EAUX, trois types de sols ont été distingués. A partir des essais (essai de cisaillement, essais pressiométriques réalisés

par SOLS et EAUX et par SOLTECHNIC, essais pénétrométriques) et de calculs de stabilité (réalisés par SOLS et EAUX en considérant un coefficient de sécurité au glissement légèrement inférieur ou égal à 1), les caractéristiques ont été définies pour chaque type de sol et sont détaillées dans le Tableau 1 (SOLS et EAUX, 2001).

Caractéristiques	Sol 1 : sols superficiels argileux et remaniés	Sol 2 : niveaux argilo-silteux plus compacts et marnes altérées	Sols 3 : Substratum marno-calcaire compact
Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	19	19	18
Cohésion (kPa)	0	10	1000
Angle de frottement (°)	24	25	35
Résistance dynamique de pointe (MPa)	0,5 < Rd < 0,7	2	refus
Pression limite PI (MPa)	0,13	0,5	4
Module pressiométrique E <sub>M</sub> (MPa)	3	5	140
Frottement latéral unitaire (kPa)	2	30	220

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des différentes formations géologiques rencontrées sur le site d'Itsasoan (d'après SOLS et EAUX, 2001)

• **Zone 3 : les falaises de la plage Harotzen Costa**

- 1986 : DDE : travaux du glissement de la Maison Roques (Benech, 1997)
- 09/04/1987 : DDE : étude de stabilisation de la zone Bacharis Laurdenia et Bon Air (OPL/84/043 ; Benech, 1997).

• **Zone 5 : Parlemtentia**

- 1995 : SORES (1995) afin de proposer des solutions confortatives destinées à enrayer les phénomènes d'instabilité, a réalisé :
  - des calculs de stabilité à l'aide du logiciel TALREN V2.3 (1994) – Méthode de Bishop,
  - un sondage carotté d'une profondeur de 25,50 m (outil : carottier Tungstène T6 Ø 101 mm, utilisation d'une couronne en diamant Ø 66 mm dans le substratum calcaire), qui a permis de prélever des échantillons intacts au carottier triple sous gaine (NFP 94-202 ; SC1),
  - 2 sondages à la tarière jusqu'au refus avec prélèvements d'échantillons remaniés tous les mètres (ST1 et ST2),
  - 2 sondages destinés à la réalisation d'essais pressiométriques jusqu'à une profondeur de 25,00 m et 26,50 m (forage destructif jusqu'au substratum, puis carottier diamant) à raisons d'un

sondage tous les 1,50 m selon la norme NFP 94-110 (SP1 et SP2),

- l'installation de tubes piézométriques avec bouche à clé dans tous les sondages,
- 6 puits de 4 m de profondeur creusés à la pelle mécanique en pied de falaise (PM1 à PM6),
- 1 essai triaxial CU+u sur un échantillon du sondage carotté SC01 prélevé à une profondeur de 4,50/5,00 m.

A partir de ces études, la SORES distingue 2 types de formations géologiques : les argiles (altérites) et les flyschs dont les résultats des essais d'identification et mécaniques sont présentés dans le Tableau 2, le Tableau 3 et le Tableau 4.

#### Résultats des essais in situ :

Nature des sols	Pression limite PI (MPa)	Module pressiométrique $E_M$ (MPa)	Rapport $E_M/PI$
Argiles plastiques à fermes	0,15 à 1,40	1,5 à 14	7 à 11
Calcaire (tête de couche)	3,70	75	20

Tableau 2 : Caractéristiques pressiométriques des formations géologiques rencontrées sur le site de Parlementia

Remarque : on note que les valeurs les plus faibles obtenues à 8,50 et 3,50 m de profondeur pour les essais pressiométriques SP1 et SP2 respectivement, indiquent que les caractéristiques des argiles en place sont ponctuellement proches du seuil critique d'autoportance.

#### Résultats des essais en laboratoires :

- Résultats des essais d'identification :

sondage	Profondeur (m)	Nature	W%	Granulométrie		Limites d'Atterberg		GTR 92
				% < 80 $\mu\text{m}$	0/D max (mm)	WI %	IP	
ST1	1,00	Argile à débris beige à ocre plastique	28,2					
	2,00		20,7					
	3,00		26,9	57,1	0/50	95	67	A4
	3,50		27,6	57,1	0/50	95	67	A4
ST2	1,00	Argile à	35,7					

	2,00	débris beige à ocre très plastique	44,5						
	3,00	Argile à gros débris beige à ocre très plastique	36,3	62,1	0/30	91	62	A4	
	4,00		35,0	62,1	0/30	91	62	A4	
	5,00		33,7						
	6,00		34,1						
	7,00		34,4						
	8,00		33,6						
	9,00		36,5						
	10,00		33,1						
	10,70		36,9						
	1,00/1,50			40,4	73,5	0/20	80	55	A4
PM1	0,60/1,00		20,2						
PM2	3,50/4,00	sable moyen à grossier	33,4	77,6	0/20	85	55	A4	
	3,50/4,00		32,0						
PM3	2,50/3,00		33,7	68,9	0/20	82	50	A4	
PM4	1,50/2,00		35,5						
PM5	1,00		5,8						
SC1	1,50		Gravier argileux 0/10	14,0					
	2,00		argile beige à ocre plastique	44,7					
	2,20/2,60			43,7					
	3,00/5,00			45,8	80,9	0/20	80	51	A4
	5,00/7,00			41,9					
	7,00/9,00	39,9		89,2	0/5	70	42	A4	
	9,00/11,00	39,7							

Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques mécaniques obtenues par les essais d'identification des formations géologiques du site de Parlementia

- Résultats de l'essai triaxial :

<b>Essai triaxial consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (Norme NF P 94-074)</b>			
	Sondage	$\sigma'_{v0}$ (KPa)	N° dossier
	SC01	90	MP,95,GEO,542
	Profondeur (m)	$u_0$ (KPa)	Date d'essai
Chantier :	4,50/5,00 m	30	05/02/1996
SORES - Instabilité de falaise à Bidart (Parlementia)			

<b>Caractéristiques des éprouvettes</b>			
<u>Valeurs initiales</u>	1	2	3
Ho (mm)	138,9	142,5	142,1
Do (mm)	70,2	70,6	71,7
W%	43,7	41,8	30,5
ph (kg/m <sup>3</sup> )	1780	1796	1931
ps (kg/m <sup>3</sup> )	2700	2700	2700
Sr (%)	100	99,7	99,8
Ucp (KPa)	998	795,4	794,1
$\sigma'_c$ (KPa)	107,9	157,7	305,9
B:	99,4	97,3	98,5
$\Delta V$ saturation (cm <sup>3</sup> )	12,8	22,4	9
t100 (min)	50	50	50
$\Delta V$ consolidation (cm <sup>3</sup> )	2,2	3,4	10,6
<u>Valeurs après consolidation</u>			
Hs (mm)	138,7	142,2	141,2
Ds (mm)	70,1	70,4	71,3
W (%)	38,7	31	22,9
ph (kg/m <sup>3</sup> )			
<u>Critère de rupture</u>			
qmax - s' (KPa)	130,1	185,1	262,3
qmax - t' (KPa)	58,3	72	96,4
$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ - s' (KPa)	124,3	174,6	262,3
$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ - t' (KPa)	56,8	70,2	96,4
V.écrasement (mm/min)	0,04	0,04	0,04
V.déformation (%/min)	0,029	0,028	0,028
<u>Nature des éprouvettes :</u>	Argile ocre, plastique		
<u>Observations</u>	interprétation proposée sur critère $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$		
	<b>Résultat</b>		
	<b>c' =</b>	<b>20</b>	<b>KPa</b>
	<b><math>\phi'</math> =</b>	<b>20,5</b>	<b>°</b>

Tableau 4 : Résultat de l'essai triaxial réalisé sur les formations altérées de Parlementia

- Février 1998 : SOGELERG-SOGREAH (1998) dans le but de conforter la falaise. Le projet n'a pas été réalisé (Chauvin et Largillier, 1999), l'enquête publique n'ayant pas aboutie.
- Juillet 1999 : ANTEA (Chauvin et Largillier, 1999), suite à l'étude de SOGELERG-SOGREAH propose un projet moins onéreux. Etude basée sur les résultats obtenus par SOLELERG-SOGREAH.

#### • Synthèse et remarques

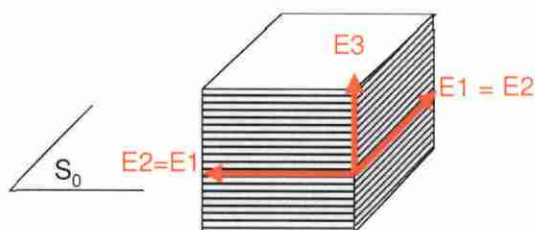
Les caractéristiques de sols et roches obtenues par SOLS ET EAUX en 2001 dans la zone 1 située à 250 m au nord-est sont généralement plus faibles et moins dispersées que celles obtenues par SORES en 1995 (dans les formations argileuses, respectivement :  $P_I$  : 0,13 à 0,5 MPa contre 0,15 à 1,4 MPa ;  $E_M$  : 3 à 5 MPa contre 1,5 à 14 MPa ; les données dans les formations rocheuses ne sont pas comparables, l'un donnant les valeurs pour le calcaire sain, l'autre pour la tête de couche (propriétés probablement dégradées). Il faut noter cependant que la SORES a exécuté 2 sondages destinés à la réalisation des essais alors que SOLS ET EAUX n'en a effectué qu'un. De plus, le nombre d'essais réalisés par SOLS et EAUX n'est pas précisé, de même que la profondeur atteinte ou la nature des résultats (moyenne, valeur minimale ou maximale).

Mais cette dispersion globale des résultats est l'indication d'un sol hétérogène, avec une variabilité verticale (deux essais pressiométriques successifs donnent des résultats différents ; la résistance de la formation au cisaillement engendré par le pressiomètre est certainement dépendante du nombre de bancs de silex présents sur la hauteur de la cellule centrale de l'appareil) et sans doute également latérale. Les altérites ont conservé la structure de la roche mère, est en particulier le litage d'une roche sédimentaire ; on peut ainsi émettre l'hypothèse d'une anisotropie simplifiable en orthotropie de directions principales parallèle et perpendiculaire à la stratification. L'orientation selon laquelle se présentent les plans de stratification peut expliquer ainsi une partie de la variabilité ; en effet, dans la zone 1 (Itsasoan) les bancs ont une direction d'environ  $N16^\circ$  et dans la zone 5, leur direction est subparallèle à la côte,  $N55^\circ E$ , et les bancs sont affectés par de nombreux plis.

### • Conclusion

Bien que de nombreuses études aient été réalisées, seulement deux d'entre elles, concernant les zones 1 et 5 localisées à plus de 500 m au nord-est du glissement de janvier 2004 à Harotzen Costa, ont donné lieu à des essais d'identification et mécaniques. Les autres études géotechniques sur ces sites ont consisté à effectuer des enrochements en ophites afin de protéger la côte de l'action de l'océan. Sur les deux études majeures réalisées, on observe une certaine variabilité des caractéristiques des altérites qui exclut l'application brute de ces caractéristiques mécaniques aux terrains de Harotzen Costa sans un minimum d'attention et de justifications. De plus, afin de déterminer des caractéristiques plus proches de la réalité, l'anisotropie des altérites devrait être prise en compte et pourrait être simplifiée dans un premier temps en une orthotropie de révolution (une seule direction différente, celle perpendiculaire à la stratification (axe noté 3 par la suite) ; la loi de comportement comportera ainsi cinq constantes à déterminer au lieu de deux pour un matériau isotrope et neuf pour un matériau orthotrope :

- $E_1 = E_2$
- $E_3$
- $\nu_{12} = \nu_{21}$
- $\nu_{13} = \nu_{23}$



- $G_{23} = G_{13} = A_{44} = A_{55}$
- $G_{12} = 2(1+\nu_{12})/E_1$

On peut supposer d'ores et déjà des plans de faiblesses mécaniques et l'orientation de ces plans dans l'espace pourrait sans doute expliquer la récurrence de glissements dans certaines zones plus « défavorablement structurées ».

## ***b) Essais d'identifications sur les altérites d'Harotzen Costa***

### **• Acquisition des données**

Les échantillons ont été prélevés au cours des différentes campagnes de terrain en fonction de l'accessibilité des affleurements. A chaque prélèvement, la date et le lieu sont consignés.

Chaque échantillon est identifié par une série de caractères qui renvoient aux conditions de prélèvement ; chaque nom se décompose en 6 parties :

Exemple : G\_aepf081204-2 → G<sup>(1)</sup> + a<sup>(2)</sup> + ep<sup>(3)</sup> + f<sup>(4)</sup> + 081204<sup>(5)</sup> + -2<sup>(6)</sup>

(1) : Initiale du lieu de prélèvement : G → Guéthary ; I → Ibarritz ; V → Viviers-Basques

(2) : état du matériau : a → altérite ; s → roche saine

(3) : type de dépôt : cb → coulée de boue ; gl → glissement ; ep → en place ; nb → niveau bleu<sup>2</sup>

(4) : nature de la roche saine : f → flysch ; m → marnes ; c → calcaires

(5) : date (jjmmaa)

(6) : n° de prélèvement de la journée

Dès son prélèvement, l'échantillon est placé dans un sac imperméable. Les mesures des paramètres d'identifications sont effectuées au laboratoire de mécanique des sols du CDGA (Université Bordeaux 1). La mesure de teneur en eau s'effectue systématiquement dès l'arrivée à Bordeaux afin de minimiser une erreur liée à une perte en eau due à une défektivité de l'imperméabilité du sac. Ensuite, l'échantillon est fractionné en plusieurs parties qui seront dédiées à différents essais. Un sol qui a déjà subi un essai ne peut être que rarement être réutilisé pour un autre. Le nombre et le type d'essais réalisés pour un échantillon dépendent de la quantité de matériau prélevé : on compte environ entre 3 et 5 kg de matériau sec pour une granulométrie, 500 g de

---

<sup>2</sup> En référence à ces niveaux bleutés observés à Guéthary. Ces niveaux stratifiés sont observés au pied du glissement le plus récent de Guéthary ; ils reposent sur des dalles de flyschs et ne semblent pas avoir été remaniés par le glissement.

matériau brut pour une limite d'Atterberg ; il sera ensuite tamisé à 0,4 mm, et seul le passant sera utilisé ; il en faut au moins 200 g sec ; 10 g de matériau de diamètre inférieur à 2 mm sont nécessaire à un essai au bleu, etc...

Les normes françaises préconisent de laisser sécher un échantillon à l'air libre avant un tamisage (préalable à la plupart des essais) afin de ne pas déstructurer ou modifier les propriétés du matériau par la chaleur de l'étuve par exemple. Cette phase est assez longue et peut prendre jusqu'à un mois.

Les essais ont des durées très variables :

- Essai granulométrique

Un tamisage par voie humide prend généralement une journée pour la manipulation elle-même. Les tamis et leur contenu doivent être sec pour leur pesée ; le laboratoire de mécanique des sols ne possède pas d'étuve suffisamment grande pour y insérer les tamis, le matériau est donc séché à l'air libre pendant plusieurs jours à la suite du tamisage. Il est ensuite re-tamisé à sec pour permettre à des hypothétiques particules de sol retenues par un « pont d'eau » entre les mailles du tamis lors du premier tamisage de passer. Le tamisat (passant inférieur à 80  $\mu\text{m}$  et eau qui a servi au tamisage) est quant à lui placé dans l'étuve. Au cours des jours qui suivent, l'eau claire à la surface du mélange sol+eau est régulièrement siphonnée dès que le matériau a décanté. Dès que le matériau est sec, il est pesé et 30 g sont prélevés pour la sédimentométrie.

L'analyse granulométrique de la fraction inférieure à 80  $\mu\text{m}$  est un essai qui dure 24 heures. La veille de l'essai, l'échantillon de sol est placé dans de l'eau à laquelle est ajouté du défloculant. Au début de l'essai la densité de mesure est importante puis diminue au cours du temps (mesures à 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 2 heures, 3 heures, 4 heures, 5 heures, 10 heures et 24 heures).

- Limites d'Atterberg – essai au bleu de méthylène

L'essai à la coupelle de Casagrande est répété au moins 3 fois afin de vérifier l'homogénéité des résultats. Un essai à la coupelle effectué n'est pas forcément un essai exploitable ; en effet, si la teneur en eau du matériau est trop faible ou trop élevée au moment de l'essai (nombre de coups inférieur à 20 ou supérieur à 35) l'essai doit être recommencé. Une demi-journée est généralement nécessaire à la bonne conduite de l'essai. La limite de plasticité est quant à elle déterminée assez rapidement lorsqu'on a pris « le coup de main ».

L'essai au bleu de méthylène a une durée très variable, fonction de la surface spécifique du matériau. Plus celle-ci est grande, plus l'essai dure longtemps. Les argiles de Guéthary, par exemple, nécessitent une demi-journée de mesure (une mesure toutes les 5 min et 2 à 5 ml de bleu sont rajoutés si l'essai est négatif (les altérites de Guéthary nécessitent environ 100 ml de bleu).

#### • Granulométrie

L'analyse granulométrique a été effectuée par tamisage par voie humide pour la fraction de diamètre supérieur ou égale à 80  $\mu\text{m}$ . La colonne de tamis présente les mailles suivantes : 25 mm ; 12,5 mm ; 5 mm ; 2 mm ; 1 mm ; 0,4 mm ; 0,2 mm ; 0,1 mm ; 0,08 mm. Les passants à 80  $\mu\text{m}$  ont été ensuite étudiés par sédimentométrie.

La norme AFNOR recommande l'utilisation de 2,5 kg à 7,2 kg de matériau pour une dimension maximale de grains de 12,5 mm (masse en kg à utiliser : entre 2 à 6 fois le diamètre maximal des grains en cm). Un essai a été réalisé sur un échantillon d'altérite remaniée prélevé fin novembre 2004 dans le bourrelet du glissement de janvier 2004 (échantillon G\_aglf251104-1 ; masse sèche : 5,260 kg). Trois autres essais sont actuellement en cours sur des matériaux prélevés dans les altérites en place.

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des grains. Pour chaque diamètre de tamis, elle indique la masse des particules de taille inférieure ou égale à ce diamètre, c'est-à-dire la masse du tamisat ou passant (partie qui traverse le tamis). La masse est indiquée en pourcentage de la masse totale sèche.

La classification utilisée en France est celle décrite par Atterberg en 1905. Kezdi (1974) précise que « *les seuils du système d'Atterberg, qui constitue la base commune de tous les systèmes de classification ultérieurs, ont été déterminés par référence au comportement du sol sous l'action de l'eau. La limite entre les fractions granulaires du gravier et du sable a été fixée à 2 mm parce que l'eau peut s'écouler à travers un milieu constitué de particules de dimensions supérieures à 2 mm sans retard appréciable. Si la taille des particules est inférieure à 2 mm, le sol reste perméable, mais il oppose une résistance importante au mouvement de l'eau. Pour une taille de particules d'environ 0,02 mm, la montée capillaire de l'eau dans les sols est maximale. Les poils des racines peuvent à peine pénétrer dans des fentes de cette taille. Le seuil de 0,002 mm est associé à des propriétés physiques et bactériologiques : les bactéries ne peuvent se déplacer dans les pores entre les grains plus petits que cette limite. Les particules d'argile de dimensions inférieures à 2  $\mu\text{m}$  ne sédimentent pas lorsqu'elles sont en suspension, mais restent dans un état permanent de mouvement brownien. Les particules dont les dimensions sont inférieures à 0,2  $\mu\text{m}$  sont colloïdales et leur comportement est gouverné par des lois physiques complètement différentes, les forces surfaciques devenant prépondérantes par rapport aux forces de pesanteur. Les dimensions des particules colloïdales d'argile varient de 0,2 à 0,02  $\mu\text{m}$ . On peut rappeler que la fumée et le brouillard sont constitués de particules dont les dimensions sont comprises entre 0,02 et 0,002  $\mu\text{m}$  et que les molécules de gaz ont des dimensions inférieures à 2  $\mu\text{m}$ .* »

Dans le cas de l'échantillon G\_aglf251104-1, la fraction inférieure à 80  $\mu\text{m}$  a été analysée par sédimentométrie. Cette méthode évalue le taux de sédimentation en fonction du temps en utilisant la loi de Stokes qui permet d'évaluer la vitesse de décantation de particules sphériques en suspension dans un liquide au repos. Pour chaque échantillon deux essais de sédimentométrie sont réalisés et moyennés.

Divers coefficients permettent ensuite de caractériser la courbe granulométrique et en particulier le coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen ( $C_u$ ) qui caractérise l'étalement de la courbe et le coefficient de courbure ( $C_c$ ) :

- $C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}^3$  ; la distribution est dite étalée lorsque  $C_U > 2$  ; elle est serrée dans le cas contraire.
- $C_C = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}}$

Les résultats sont présentés sur la Figure 19. Le matériau présente une répartition granulométrique complexe. On notera tout d'abord un taux de fines ( $\varnothing < 80 \mu\text{m}$ ) important, de 60%. La fraction argileuse représente 40% du matériau. Le coefficient d'Hazen, supérieur à 2 ( $C_U = 500$ ) dénote d'une distribution étalée ; la valeur du coefficient de courbure,  $C_c = 0,055$ , témoigne d'une courbe aplatie. La courbe est discontinue, on remarque deux paliers (correspondant à deux classes de grains quasi absente du matériau) qui marquent la prédominance de trois familles granulométriques : un premier mode est observé à  $2 \mu\text{m}$ , correspondant à la classe des argiles, un second mode à environ  $7 \mu\text{m}$ , dans la classe des limons « moyens », et un dernier mode à  $12,5 \text{ mm}$  (graviers), qui s'étend des sables moyens aux graviers. La classe allant des sables moyens graviers est formée par des fragments de silex. Les éléments plus petits semblent être pour une grande par siliceux comme le montre les analyses DRX sur poudre brute (classe des limons), et argileux pour la fraction la plus fine. Une analyse à la loupe binoculaire de la fraction siliceuse permettra peut-être de déterminer sont origine.

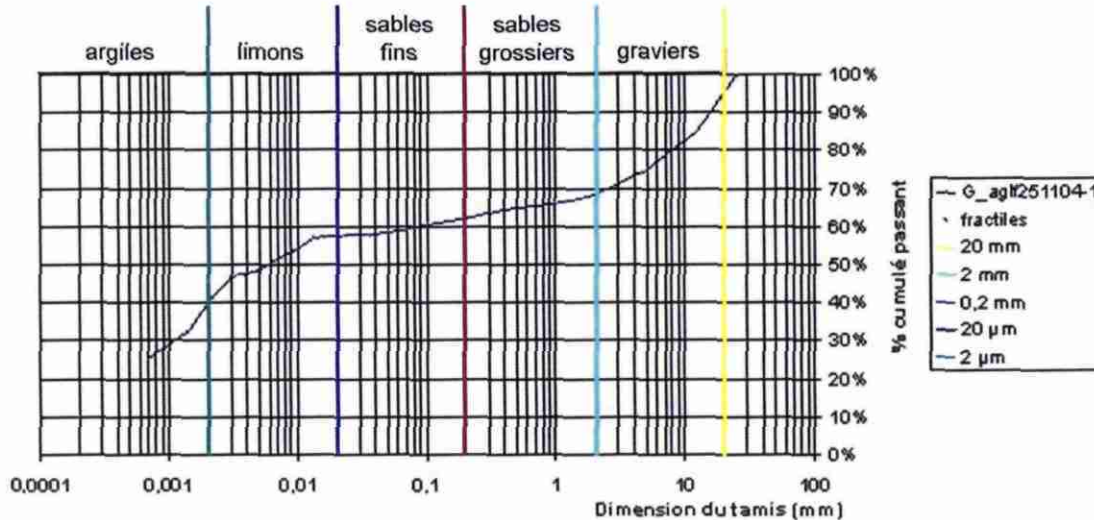


Figure 19 : Courbe granulométrique de l'échantillon prélevé dans le bourrelet du glissement de janvier 2004 à Guéthary.

<sup>3</sup>  $d_n$  correspond au diamètre pour lequel on a n% cumulé de tamisat.

La fraction de fines étant très importante et en particulier la fraction argileuse, il est envisagé d'effectuer les prochaines analyses de cette fraction granulométrique en utilisant un granulomètre laser plus précis sur cette fraction.

Néanmoins, une seule analyse granulométrique ne permet pas de conclure. D'une part, parce qu'un échantillon n'est pas forcément représentatif de l'ensemble de la population, et d'autre part, car la comparaison avec la granulométrie de matériau en place est nécessaire ; en effet, ce matériel possède souvent un taux de fines généralement moins important que les produits du mouvement de terrain (Le Mignon, 2004 ; Pollet, 2004).

#### • Les limites d'Atterberg

Les particules argileuses ont la forme de plaquette ou d'aiguilles de taille inférieure à deux micromètres. Leur structure cristalline, conceptualisée par un empilement de feuillets élémentaires, leur confère une structure ionique qui attire les molécules d'eau polaires. Ces dernières se lient fortement sur la surface accessible formant une couche d'eau adsorbée. La surface totale disponible, ou surface spécifique de l'argile exprimée en m<sup>2</sup>/g, est la somme de la surface externe du feuillet et de la surface interfoliaire, variable en fonction du type d'argile, par unité de masse. Ainsi la kaolinite a une surface spécifique de 10 m<sup>2</sup>/g contre 800 m<sup>2</sup>/g pour la montmorillonite. Cette affinité pour l'eau est appelée activité. Il existe une extrême variabilité des espèces argileuses (400 à 500 espèces) liée aux « défauts » de l'édifice cristallin par rapport au modèles de base d'empilement de couches tétraédriques de silice et de couches octaédriques d'alumine. Cette variabilité est raccordée principalement aux substitutions isomorphes. Une argile est d'autant plus active que sa structure cristalline est désorganisée (Tourenq et Tran Ngoc Lan, 1989).

La quantité d'eau nécessaire à la saturation du feuillet d'argile est donc très variable. D'autre part, le comportement d'un sol argileux, et en particulier sa plasticité, sera différent selon que l'ensemble de la surface spécifique est recouverte par une couche d'eau ou non, et donc en fonction de la teneur en eau pondérale du matériau,

$$w(\%) = \frac{\text{Masse}_d\text{eau}}{\text{Masse}_{\text{des\_particules\_solides}}} = \frac{M_w}{M_d} \quad ^4 \text{ (NF-94-049-1)}.$$

Ainsi Atterberg (1911) a décrit six seuils de comportement en fonction de la teneur en eau pondérale (limite de retrait, limite de plasticité, limite de cohésion, limite de collage, limite de liquidité et limite supérieure d'écoulement visqueux), mais classiquement seuls deux d'entre eux sont utilisés pour caractériser l'activité de la fraction fine selon la Norme Française 94-051 :

- la limite de plasticité,  $w_p$ , qui sépare un état du sol solide d'un état plastique,
- la limite de liquidité,  $w_L$ , qui sépare l'état plastique de l'état liquide.

---

<sup>4</sup>  $M_d$  en référence à masse sèche (dry), qui équivaut à la masse des particules solides seules

L'étendue de la zone plastique est appelée indice de plasticité :  $I_p = w_L - w_p$  ; elle dépend en grande partie de la présence et du type de minéraux argileux dans le sol.

On définit également l'indice de consistance qui décrit l'état du sol à un instant donné en

fonction de sa teneur en eau  $w$  :  $I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$  :

- $I_c < 0$  : sol à l'état liquide ( $w > w_L$ )
- $0 < I_c < 1$  : sol à l'état plastique ( $w_p < w < w_L$ )
- $I_c > 1$  : sol à l'état solide ( $w < w_p$ )

Une classification plus fine est également proposée pour un sol à l'état plastique :

- $0 < I_c < 0,25$  : consistance pâteuse ou très molle
- $0,25 < I_c < 0,5$  : consistance molle
- $0,5 < I_c < 0,75$  : consistance ferme
- $0,75 < I_c < 1$  : consistance très ferme

Deux techniques permettent de déterminer les limites d'Atterberg : la coupelle de Casagrande (limite de liquidité) associée à la méthode du rouleau (limite de plasticité) réalisées sur le mortier (fraction de sol de 0 à 400  $\mu\text{m}$ ) et l'essai au bleu de méthylène (Beaulieu, 1979) réalisé sur la fraction 0 à 2 mm puis rapporté à la fraction adaptée au paramètre recherché (fraction 0/400  $\mu\text{m}$  pour les limites d'Atterberg, fraction 0/2  $\mu\text{m}$  pour l'activité argileuse, etc...). Ces deux techniques ont été utilisées afin de comparer les résultats et constater un éventuel biais lié à l'opérateur ; en effet la première technique est non seulement empirique, mais aussi fortement influencée par l'opérateur. D'autre part, le calcul des seuils à partir de l'essai au bleu est basé sur les corrélations entre la surface active de la fraction 0/500  $\mu\text{m}$  et les indices de plasticité ( $r = 0,88$ ) et de liquidité ( $r = 0,91$ ) obtenues par Beaulieu (1979) par l'étude de 95 échantillons provenant majoritairement de l'Ouest de la France. Sur les essais effectués, on constate que les valeurs obtenues par la méthode de Casagrande sont du même ordre de grandeur que celles obtenues à l'essai au bleu de méthylène. Par ailleurs, l'essai au bleu permet une mesure directe de la surface spécifique de l'argile, ce qui est l'intérêt premier de cet essai.

Les résultats sont généralement représentés dans le diagramme de Casagrande (indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité) qui permet de localiser les échantillons par rapports à quatre familles de sols : les argiles peu plastiques, les limons et sols organiques peu plastiques, les argiles très plastiques et les limons et sols organiques très plastiques. Les sols argileux d'un même dépôt n'ont que rarement des caractéristiques physico-chimiques strictement identiques, mais ils se placent

habituellement de façon structurée dans le diagramme de Casagrande, de façon parallèle à la « ligne A » d'équation  $I_p = 0,73 (w_L - 20)$ .

A ce jour, 8 échantillons prélevés dans le matériau remanié du glissement de janvier 2004 ont permis de classer les altérites de Guéthary dans la classe des argiles très plastiques (Tableau 5 et Figure 20). D'autres essais sont prévus sur le matériau remanié, mais aussi sur le matériau en place. Les essais réalisés par la SORES en 1995 sur le matériau de Parlementia ont également été placés dans le diagramme.

	W	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>C</sub>
Nombre de valeurs	8	8	8	8	8
Moyenne	66,7%	78,5%	36,8%	41,8%	17%
écart type	27%	3%	6%	8%	68%
variance	7%	0%	0%	1%	46%
C.V.	39%	4%	16%	18%	389%
min	40%	74%	26%	27%	-95%
médiane	59%	78%	36%	41%	46%
max	109%	83%	48%	56%	88%
étendue	69%	9%	22%	29%	183%

Tableau 5 : Paramètres statistiques des limites d'Atterberg et teneur en eau pondérale calculés sur huit échantillons remaniés.

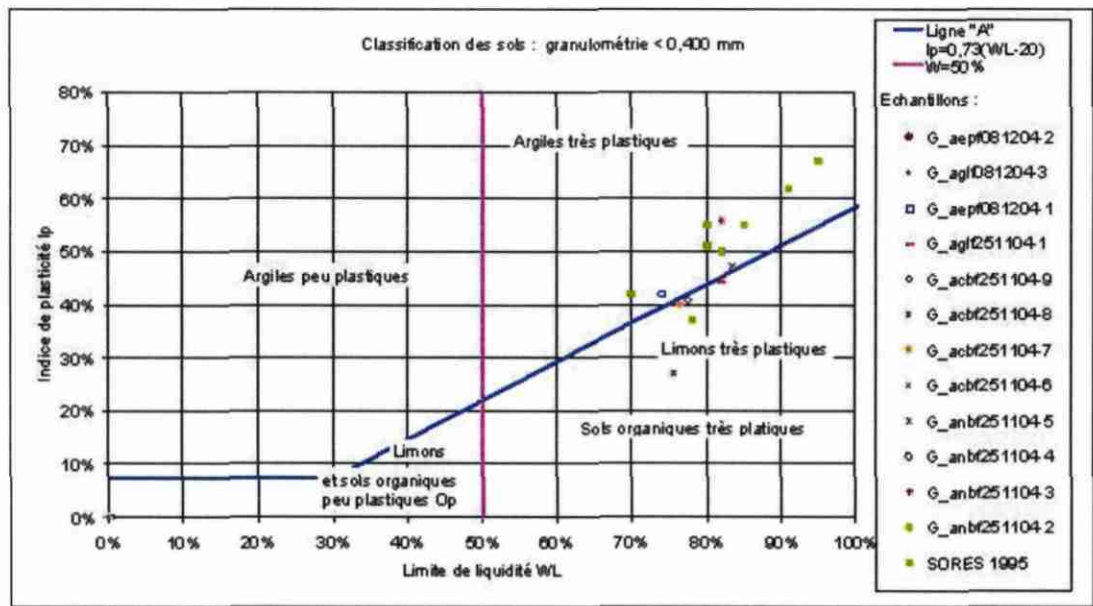


Figure 20 : Classification des sols selon Casagrande à partir des limites d'Atterberg – Applications aux échantillons prélevés à Guéthary et à Parlementia

Les points issus des caractéristiques des échantillons de Harotzen Costa s'alignent sur la « ligne A », on remarque néanmoins deux échantillons qui semblent être atypiques. A la fin des essais, les tests seront effectués afin d'éliminer de tels échantillons des statistiques ; ils seront considérés séparément afin d'expliquer leur variabilité.

Le matériau est très plastique et se distribue sur la frontière entre limons et argiles.

Les points obtenus par les essais de la SORES s'alignent selon une droite parallèle à la « ligne A » dans le domaine des argiles très plastiques.

La comparaison de ces deux séries de prélèvements montre une différence entre les caractéristiques mesurées dans les altérites remaniées à Harotzen Costa et dans celles de Parmentia. Cette variabilité peut être attribuée à une différence des propriétés physico-chimiques du matériau, mais il ne faut pas négliger le biais lié au changement d'opérateur.

Les indices de consistance ont été calculés sur 12 échantillons dont 8 pour lesquels les limites d'Atterberg ont été calculées et 4 pour lesquels les essais n'ont pas encore été réalisés ; les limites moyennes ont alors été utilisées (Tableau 6). Ils se situent dans le domaine plastique majoritairement. Trois échantillons présentaient une consistance liquide ; ils ont été prélevés dans des coulées boueuses en pied de bourrelet. Deux échantillons étaient dans un état solide, il s'agissait d'échantillons prélevés dans un matériau en place, l'un, G\_aepf081204-2, a été prélevé dans la niche d'arrachement du glissement à environ 3 m de profondeur sous la surface du sol, l'autre G\_aepf081204-1, provient d'un prélèvement effectué au sud du glissement, à une altitude de 2 m environ au dessus du niveau de la mer dans des terrains en place. Néanmoins, la teneur en eau de ces échantillons est très proche de l'indice de plasticité moyen. Un état plastique du sol en place serait à l'origine de mouvements de terrain de type solifluxion.

N° de l'échantillon	Teneur en eau W (%)	Limite de liquidité WI (%)	Limite de plasticité Wp (%)	Indice de plasticité Ip (%)	Indice de consistance Ic	Etat du sol
G_acbf251104-9	95	77	37	41	-0,43	sol liquide
G_acbf251104-8	101	76	48	27	-0,95	sol liquide
G_acbf251104-6	109	83	36	47	-0,55	sol liquide
G_aglf081204-3	39	<i>79</i>	<i>37</i>	<i>42</i>	<i>0,95</i>	<i>sol plastique</i>
G_aglf251104-1	50	84	38	46	0,72	sol plastique
G_acbf251104-7	69	76	36	40	0,19	sol plastique
G_anbf251104-5	44	<i>79</i>	<i>37</i>	<i>42</i>	<i>0,83</i>	<i>sol plastique</i>
G_anbf251104-4	41	74	32	42	0,79	sol plastique
G_anbf251104-3	40	82	26	56	0,75	<i>sol plastique</i>
G_anbf251104-2	45	78	41	37	0,88	sol plastique
G_aepf081204-2	31	<i>79</i>	<i>37</i>	<i>42</i>	<i>1,14</i>	<i>sol solide</i>
G_aepf081204-1	35	<i>79</i>	<i>37</i>	<i>42</i>	<i>1,05</i>	<i>sol solide</i>

Tableau 6 : Etat du sol. En noir – police normale : valeurs mesurées à la coupelle de Casagrande ; en italique bleu : valeur calculée à partir de la moyenne des valeurs mesurées (essai non réalisé)

Ces observations et mesures démontrent tout d'abord une forte sensibilité du sol à l'eau ( $I_p$  moyen = 42%,  $w_L$  moyen = 79%). De plus, la teneur en eau du sol dans le glissement induit un état du sol plastique, voire liquide dans les zones qui ont évolué en coulées boueuses. Si cette sensibilité du sol et de telles teneurs en eau existent sur l'ensemble des altérites de Guéthary, des phénomènes de solifluxion sont prévisibles, ces derniers pouvant évoluer en glissements-coulées en cas d'augmentation de la teneur en eau du matériau.

A partir de l'indice de plasticité du matériau et du pourcentage de particules argileuses ( $\varnothing < 2 \mu m$ ), on définit l'indice de Skempton ( $A_c$ ) :

$$A_c = \frac{I_p}{\% < 2 \mu m} \quad \text{avec} \quad I_p = Wp - WI$$

Cet indice permet de définir un niveau d'activité du sol (Tableau 7).

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Sol inactif	Sol peu actif	normal	Sol actif	Sol très actif
$A_c < 0,5$	$0,5 < A_c < 0,75$	$0,75 < A_c < 1,25$	$1,25 < A_c < 2$	$A_c > 2$

Tableau 7 : Classification des sols selon l'indice de Skempton

En se basant sur le taux d'argile obtenu par l'essai granulométrique sur l'échantillon G\_aglf251104-1 ( $\% < 2 \mu m = 39\%$ ), ainsi que sur l'indice de plasticité obtenu pour cet échantillon (46%), on obtient un indice de Skempton de 1,18, soit un sol de type normal.

La forte proportion en matériau de granulométrie non argileuse, dont la nature est siliceuse pour les graviers et sables et semble l'être comme en témoigne les premiers résultats aux DRX pour la fraction limoneuse, paraît « stabiliser » ce matériau très plastique. En effet, l'activité du quartz est nulle (Skempton, 1948 ; Kezdi, 1974).

La caractérisation de la fraction argileuse a été effectuée à l'essai au bleu de méthylène et permet de compléter les premiers résultats.

#### • Caractérisation de la fraction argileuse

L'essai au bleu de méthylène permet de quantifier la surface spécifique d'un matériau argileux. Le but de l'essai est d'évaluer la richesse d'un sol en argile et cela d'une façon globale. Le résultat de l'essai dépend directement de la quantité et de la nature des argiles dans le sol. Ces dernières absorbent une quantité de bleu de méthylène proportionnelle à la somme de leurs surfaces lorsqu'elles sont mises en présence d'une solution de ce colorant. La nature de la fraction argileuse est exprimée dans cet essai par la surface spécifique (Beaulieu, 1979). Elle est d'autant plus élevée que l'argile est active (Tableau 8).

Type d'argile	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)
Kaolinite	5 à 20
Illite	40 à 60
Vermiculite	200
Montmorillonite	300 à 800

Tableau 8 : Surface spécifique des argiles les plus courantes

Pour une argile donnée, la surface totale développée est proportionnelle à la quantité que le sol contient. De la quantité totale de bleu qu'on aura introduite (elle dépend de la taille de l'échantillon de sol soumis à l'essai), on calculera celle qui correspond à 100 g de sol ("valeur de bleu"). L'essai est réalisé sur la fraction 0/2 mm et rapporté à la fraction 0/5 mm (NF P 94-068) afin d'obtenir la valeur au bleu normalisée, à la fraction 0/0,4 mm pour obtenir les limites d'Atterberg, et à la fraction 0/2 µm pour déterminer l'activité de la fraction argileuse.

L'essai réalisé sur l'échantillon G\_aglf251104-1 a donné une valeur au bleu VB = 9,5 g pour w = 0 % sur la fraction 0/2 mm (59 % du matériau), soit une surface active de la fraction argileuse (diamètre inférieur à 2 µm, ici 39 % du matériau global) de 300 m<sup>2</sup>/g. Cette valeur est comparable à celle des montmorillonites (300 à 800 m<sup>2</sup>/g).

L'indice de nocivité N (Lautrin, 1989) classe le sol en fonction de la valeur au bleu et du pourcentage d'argiles (< 2 µm) :  $N = \frac{100 \times VB}{\% < 2\mu m}$ . L'échantillon analysé sur le site

d'Harotzen Costa présente un N = 16, ce résultat classe le sol dans les argiles très actives (N<1 : sols non argileux ; 1<N<3 : argiles inactives ; 3<N<5 : argiles peu actives ; 5<N<8 : argiles normales ; 8<N<13 : argiles actives ; 13<N<18 : argiles très actives ; N > 18 : argiles nocives).

Un premier essai au bleu de méthylène a permis d'obtenir une idée du comportement du sol lié à son argilosité. Un seul essai n'est néanmoins pas représentatif, d'ores et déjà d'autres sont en cours et sont programmés.

#### • Classification du sol

A partir de ces résultats, les différents échantillons peuvent être placés dans les différentes classifications de sols utilisées en géotechnique. Nous utiliserons préférentiellement la classification GTR (Guide de Terrassements Routiers) qui est plus précise pour les sols argileux (Tableau 9 et Tableau 10).

Classe	Définition	Caractéristiques	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50\text{mm}$ et passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A1 à A4 selon VB ou $I_p$
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50\text{mm}$ et passant à $80\mu\text{m} \leq 35\%$	B1 à B6 selon VB ou $I_p$ et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50\text{mm}$ et passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou passant à $80\mu\text{m} \leq 12\% + VBS > 0,1$	30 sous-classes selon VB, $I_p$ et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec des fines	$V_B \leq 0,1$ et passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	

Tableau 9 : Classification globale GTR (Guide de Terrassements Routiers)

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
granulométrie	Classe	VB et lc	Sous classe 1	Paramètres d'état	Classe
D <sub>max</sub> ≤ 50mm et Tamisat à 80mm > 35%	A	VB ≤ 2,5 ou lp < 12	A1  Limos peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	P   ≤ 3 ou Wn ≥ 1.25W <sub>OPN</sub>	A1 th
				3 <   P   ≤ 8 ou 1.10W <sub>OPN</sub> < Wn ≤ 1.25W <sub>OPN</sub>	A1 h
				8 <   P   ≤ 25 ou 0.9W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 1.10 W <sub>OPN</sub>	A1 m
				0.7W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 0.9W <sub>OPN</sub>	A1 s
				Wn < 0.7W <sub>OPN</sub>	A1 ts
		12 < lp ≤ 25 ou 2,5 < VB < 6	A2  Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	P   ≤ 2 ou lc ≤ 0.9 ou Wn ≥ 1.3W <sub>OPN</sub>	A2 th
				2 <   P   ≤ 5 ou 0.9 < lc ≤ 1.05 ou 1.1W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 1.3W <sub>OPN</sub>	A2 h
				5 <   P   ≤ 15 ou 1.05 < lc ≤ 1.2 ou 0.9W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 1.1W <sub>OPN</sub>	A2 m
				1.2 < lc ≤ 1.4 ou 0.7W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 0.9W <sub>OPN</sub>	A2 s
				lc > 1.4 ou Wn < 0.7W <sub>OPN</sub>	A2 ts
		25 < lp ≤ 40 ou 6 < VB ≤ 8	A3  Argiles et argiles marnées, limons très plastiques...	P   ≤ 1 ou lc ≤ 0.8 ou Wn ≥ 1.4W <sub>OPN</sub>	A3 th
				1 <   P   ≤ 3 ou 0.8 < lc ≤ 1 ou 1.2W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 1.4W <sub>OPN</sub>	A3 h
				3 <   P   ≤ 10 ou 1 < lc ≤ 1.15 ou 0.9W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 1.2W <sub>OPN</sub>	A3 m
				1.15 < lc ≤ 1.3 ou 0.7W <sub>OPN</sub> ≤ Wn < 0.9W <sub>OPN</sub>	A3 s
				lc < 1.3 ou Wn < 0.7W <sub>OPN</sub>	A3 ts
		ln > 40	A4  Argiles et argiles marnées, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	A4 th
		VB > 8			A4 h
					A4 m
					A4 s

Tableau 10 : Classification détaillée de la classe A de la classification GTR (Guide de Terrassements Routiers)

La majorité des échantillons étudiés appartient à la classe A4, celle des argiles et argiles marneuses très plastiques. Deux échantillons sont classés en A3, le domaine des argiles et argiles marneuses et des limons très plastiques.

#### • Conclusions

Les mesures des paramètres mécaniques réalisées par différents bureau d'étude mettent en évidence une forte sensibilité de l'altérite des flyschs à silex de Guéthary à l'eau (taux d'argile important, indice de plasticité et de liquidité élevés qui placent cette formation dans le domaine des argiles très plastiques, classification dans les sous-ordres A3 et A4 du GTR). De plus, la résistance de ce matériau aux contraintes mécaniques est relativement faible (angle de frottement interne proche de 20°, cohésion de 20 kPa, module oedométrique inférieure à 15 MPa).

Ces caractéristiques sont nettement différentes de celles de la roche mère, matériau compétent naturellement plus résistant (module oedométrique à 75 MPa en tête de couche).

Les processus d'altération engendrent une importante perte de résistance mécanique du matériau et favorise ainsi les instabilités de terrain.

#### **c) Perspectives**

Plusieurs types d'essais vont prochainement être réalisés :

- la porosité mercure (au laboratoire TREFLE-ENSAM) sur les flyschs sains et altérés, couplée à la porosité par analyse d'image d'une lame mince (étude menée à l'Université Bordeaux 1, laboratoire UMR-EPOC) afin de déterminer une possible anisotropie de la porosité,
- la teneur en matière organique des flyschs (Université Bordeaux 1, UMR EPOC),
- les caractéristiques mécaniques de l'altérite par des essais oedométriques (essai de fluage, Université Bordeaux 1, CDGA) et des essais triaxiaux (Université Bordeaux 1, CDGA).

De plus, étant donné que l'état du sol est fortement lié à sa teneur en eau, divers instrumentations ou essais *in situ* permettraient d'apporter des informations complémentaires. La connaissance de la capacité de l'eau à s'infiltrer et à circuler dans les altérites peut être déterminée par des essais de perméabilité de type Porchet ou Muntz. La pose d'un humitub étalonné sera un élément important de la prévision de la stabilité d'un massif d'altérite. Un réseau de piézomètres permettrait également de déterminer le niveau d'une nappe potentielle et ainsi de déterminer la surface de la zone saturée en eau.

## 2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE

### 2.3.1. Acquisition des données

Chaque campagne de terrain est l'occasion d'effectuer des mesures physico-chimiques et des prélèvements d'eau des sources (huit campagnes de novembre 2004 à mars 2005 ; venues d'eau des Viviers-Basques : deux à trois sources sont suivies systématiquement, quatre autres venues font l'objet d'un suivi à pas de temps moins dense car leur comportement est semblable aux autres sources ; une venue d'eau à Guéthary ; deux à trois venues d'eau à Ilbarritz).

Pour chaque source sont effectuées *in situ* des mesures de pH (au pH-mètre), de conductivité, de température (au conductimètre), d'alcalinité en utilisant la méthode colorimétrique, et deux prélèvements de 60 ml chacun d'eau filtrée : l'un des échantillons est conservé intact, il sera utilisé pour la mesure de la concentration en anions ; l'autre est acidifié sur le terrain avec de l'acide nitrique et sera utilisé pour les cations ; l'acidité permet de stopper les évolutions chimiques liées aux bactéries dans l'eau.

Les échantillons d'eau sont conservés à une température inférieure à 4°C avant d'être analysés au laboratoire de chimie de l'EGID (Environnement, Géo-ingénierie et Développement), Université Bordeaux 3. La mesure de la concentration en ions majeurs consiste à faire passer l'eau prélevée à travers une colonne ; les différents ions traversent la colonne avec une vitesse qui leur est propre. L'analyseur mesure la conductivité à un endroit donné de la colonne ; chaque pic de conductivité correspond à un ion donné. Un étalonnage de la colonne est nécessaire avant le passage d'une série. Pour cela, des étalons sont préparés avec des concentrations en ions connues et croissantes. A partir des étalons, on trace pour chaque ion la droite de la concentration en cet ion en fonction de l'aire du pic de conductivité (Figure 21). Cette droite est la droite de calibration. A partir de cet étalonnage, on fait correspondre une aire de pic à une concentration pour un échantillon donné. Généralement, les limites de pics sont définies manuellement afin de sélectionner l'aire optimale (Figure 22).

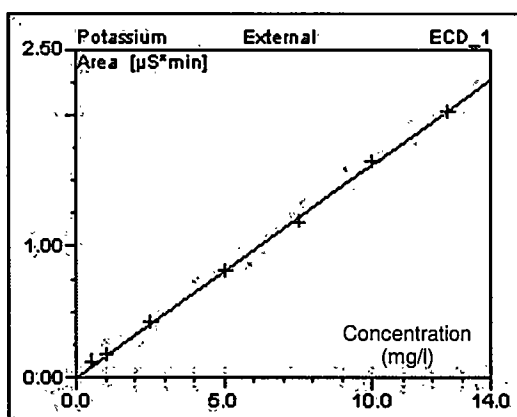


Figure 21 : Droite de calibration du Potassium

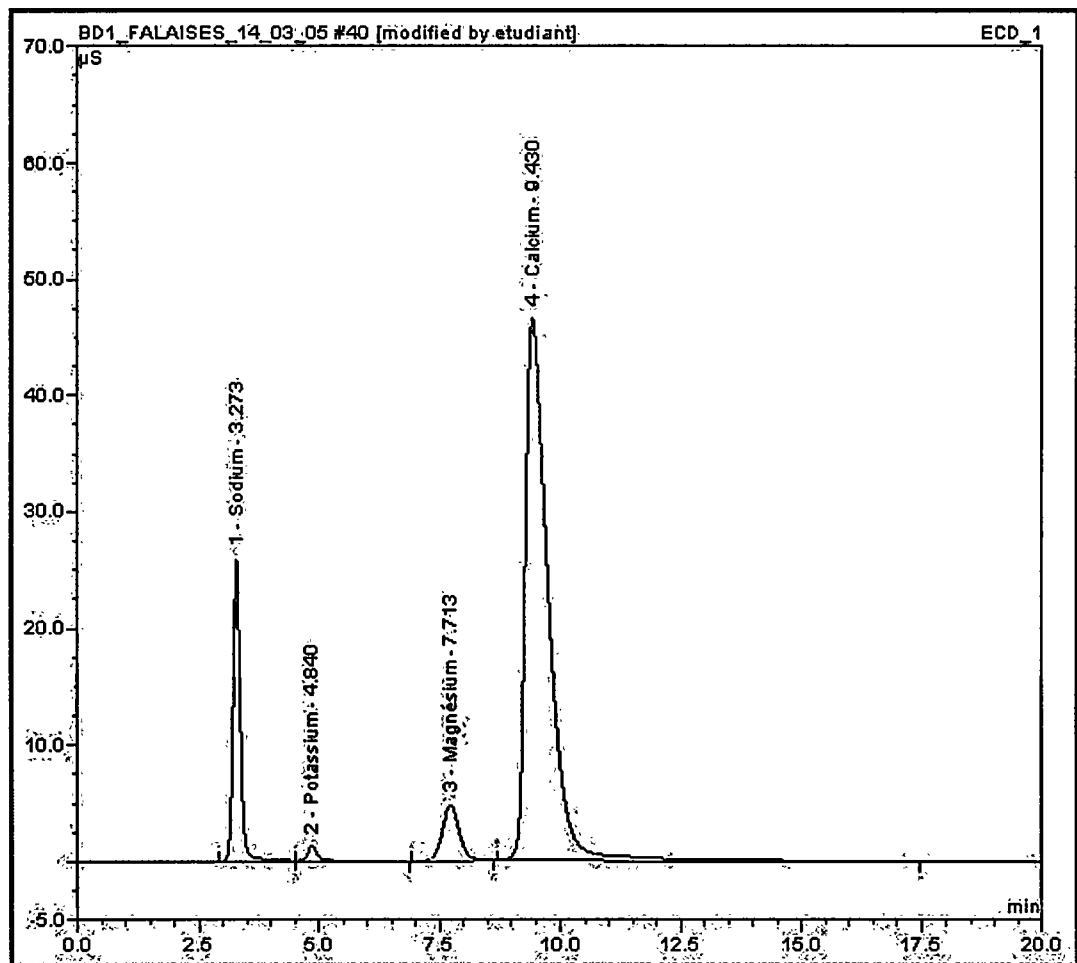


Figure 22 : Exemple d'un diagramme de la conductivité en fonction du temps

Les différentes données sont ensuite vérifiées et traitées sous Excel (calcul de balances ioniques ; diagramme de Schoeller).

### 2.3.2. Les précipitations

Les précipitations sont souvent corrélées aux mouvements de terrains en particulier dans les formations superficielles (Govi *et al.*, 1985, dans Le Mignon, 2004).

En effet, l'eau météorique qui s'infiltre dans le sol engendre une augmentation du poids volumique du sol situé au-dessus de la nappe, ainsi qu'une diminution des forces de capillarité qui se développent à l'interface entre la phase air et la phase eau, ce qui génère une perte de cohésion dans le matériau engendrée par la succion. De plus, en fonction de la capacité d'infiltration et du temps de transit, les précipitations peuvent engendrer une montée brutale de la nappe.

C'est en cela que les précipitations des jours précédents un évènement sont au moins aussi importantes que celles qui ont lieu au moment du déclenchement, voir plus.

La côte basque, soumise à un climat océanique, est particulièrement arrosée (Durand et Mallet, 2004 ; Winckel *et al.*, 2005 ; les précipitations annuelles moyennes de 1956 à 2004 sont de 1476 mm, données MeteoFrance, 2005). Le glissement observé en janvier 2004 s'est produit en période particulièrement pluvieuse, 201 mm d'eau sont tombés durant ce mois.

Ces faits, ajoutés à la sensibilité des altérites à l'eau, soulignent l'importance du drainage de l'eau de pluie, entre autre, afin de minimiser les instabilités.

### 2.3.3. Venues d'eau

A ce jour, une seule venue d'eau permanente, nommée G1, est observée et suivie depuis novembre 2004 sur le site de Guéthary au lieu-dit Harotzen Costa. Elle apparaît à l'extrémité sud-ouest du glissement récent et s'écoule en cascade sur 3 m de flyschs à silex environ sur lesquels on observe des dépôts. Sur le replat au-dessus de la cascade, apparaît une flaque verdâtre. En creusant dans les altérites on s'aperçoit que l'eau en émerge (Figure 23).



Figure 23 : Arrivée d'eau au sein des altérites en place. A droite : localisation de la venue d'eau (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE 2000) ; à gauche : venue d'eau

Le débit de la venue d'eau est relativement faible, mais paraît constant sur la période d'étude (du 16/11/04 au 30/03/05).

Cette eau présente une alcalinité très faible, quasiment nulle (Tableau 11). Son pH est basique (8,0 en moyenne) et sa conductivité particulièrement élevée (902  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en moyenne). La température de l'eau est celle de la température atmosphérique ambiante, les prélèvements et mesures étant effectués dans la partie inférieure de la cascade laissant à la température de l'eau le temps de se rééquilibrer avec celle de l'air.

	nombre de valeurs	Moyenne	écart type	Coefficient de variation
Alcalinité (mg/l)	7	22,0	15,0	68%
pH	7	8,0	0,6	8%
Conductivité (uS/cm)	7	901,9	155,2	17%
Température de l'eau	7	8,3	2,2	27%

Tableau 11 : Propriétés physico-chimiques moyennes de G1

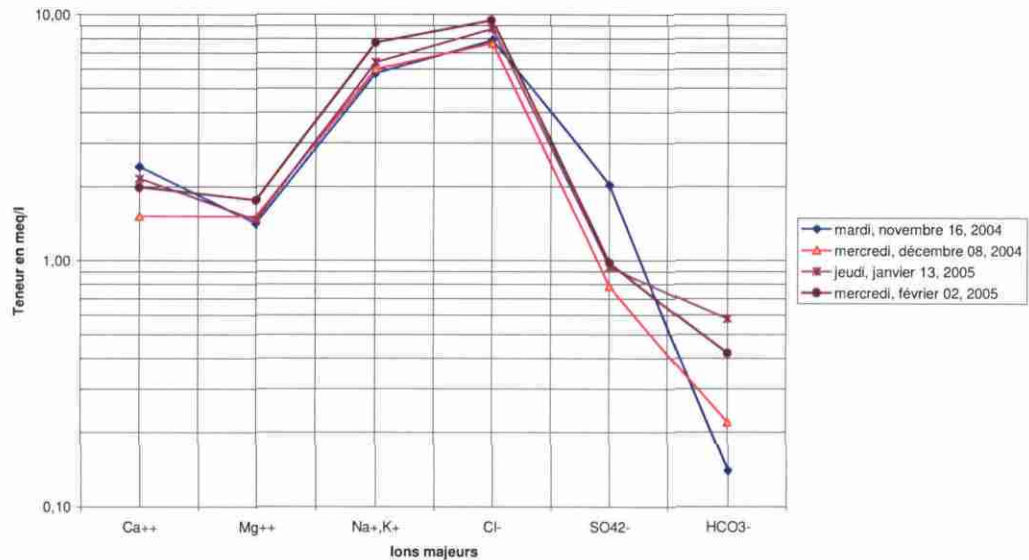


Figure 24 : Diagramme de Schoeller des prélèvements du 16/11/04, 08/12/04, 13/01/2005 et 02/02/2005 (Balances ioniques respectivement de -2,5%, 2,0%, -2,1% et 2,6%).

Les analyses chimiques révèlent une eau au faciès nettement chloruré sodique, rappelant le faciès de l'eau de mer (Figure 24).

On peut émettre l'hypothèse que cette eau a une origine météorique, sa salinité importante, à l'origine de la forte conductivité de l'eau, étant alors due au transport de sels par l'eau de pluie ainsi qu'au lessivage du sol et de la végétation recouverts de sels par les embruns. L'eau s'infiltrerait dans le niveau superficiel déstructuré du sol et émergerait au niveau de G1. Cette venue d'eau est localisée à proximité de l'exutoire d'un talweg d'une surface d'environ 1570 m<sup>2</sup> (Surface calculée avec ArcMap (© ESRI) à partir des orthophotos (© ORTHOLITTORALE, 2000). Si on considère les précipitations moyennes mensuelles à Socoa calculées de janvier 1921 à novembre 2004 (données Météo France, Station de Socoa), soit 123,4 mm par mois, il tombe en 1 mois sur le talweg 193 m<sup>3</sup> d'eau.

Ce volume de précipitation est suffisant pour alimenter par ruissellement cette venue d'eau dont le débit est faible. Ainsi, cette source pourrait être uniquement alimentée par les précipitations immédiates. Afin de conforter cette hypothèse des analyses de l'eau de

pluie sont nécessaires. Mais généralement, l'eau de pluie ne contient ni calcium, ni magnésium, ni sulfates et nitrates ; ces quatre éléments représentent en moyenne une masse totale 170 mg/l. La provenance de ces ions peut être anthropique dans le cas des sulfates et des nitrates, et l'apport de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  peut être lié à des échanges avec l'argile ce qui serait alors synonyme de modification des caractéristiques de l'argile par l'eau météorique. Par ailleurs, des additions d'eau d'origine anthropique sont possibles, deux habitations surplombent le talweg.

Il est de plus probable que toute l'eau qui s'écoule via ce talweg ne ressorte pas à G1, une partie peut s'infiltrer, une autre s'évaporer (évaporation et évapotranspiration), et il faut également considérer les variations du niveau de la nappe. En effet, le bilan hydrique est généralement :

$$P = Q + E + \Delta R$$

Avec P : précipitations ; Q : débit du ruissellement ; E : Evaporation et évapotranspiration ;  $\Delta R$  : variations des réserves souterraines.

Une autre venue d'eau est observée à la limite Sud du glissement. Le faible débit ne permet pas de mesures, mais par temps sec l'humidité importante de cette zone et en particulier les fréquentes coulées boueuses qui la caractérisent contraste avec le matériau asséché du bourrelet adjacent (Figure 25).



Figure 25 : Venue d'eau au sein du glissement

Ces deux venues d'eau démontrent que les altérites ne sont pas des matériaux totalement imperméables. Des circulations de fluides existent dans le matériau en place comme dans le matériau remanié par le glissement.

On remarque également plusieurs canalisations. En particulier, un fossé bétonné guide l'eau de ruissellement du haut de la falaise jusqu'à la plage le long du chemin d'Harotzen Costa. Au nord-est immédiat du glissement de janvier 2004, on observe une canalisation en PVC, qui, jusqu'à présent, est restée sèche.

Benech (1997) signale de plus « de nombreuses arrivées d'eau en pied de falaise ».

D'autre part, une partie de l'altérite peut être immergée à marée haute ou seulement subir l'effet d'humidification par l'eau de mer apportée par les embruns, la houle et les tempêtes.

**Une question se pose : quelle est l'influence de l'eau de mer au point de vue chimique (activité ionique de l'eau très importante bien que pH basique) et physique (saturation du massif de sol à chaque marée haute, effet de la cyclicité et de la fréquence des chargements et déchargements du sol en eau par la mer) ?**

## 2.4. LES MOUVEMENTS DE TERRAINS

### 2.4.1. Historique des instabilités

#### *a) Etudes des photographies aériennes*

Les photographies aériennes des campagnes de 1938, 1954, 1968, 1977, 1982-83, 1992, 1996 et 2000 témoignent de l'activité de la côte Harotzen Costa de Guéthary. En effet, différents mouvements de terrain ont été répertoriés (Figure 26) ; certains semblent s'accompagner de la disparition de bâtiments et de routes (Figure 27) ; et d'autres semblent à venir (Figure 28).

Le glissement correspondant à la niche d'arrachement la plus à l'ouest (Figure 26) apparaît dès 1938. On remarquera que celui-ci coupe le chemin d'accès à une villa. Sur la photographie de 1954, ce chemin est décalé (chemin rectiligne en 1938 et forme un coude en 1954). En 1977, la surface affectée est plus grande, le mouvement de terrain a emporté le nouveau chemin d'accès ; le glissement semble avoir une évolution globalement régressive sur la période 1938-1977. Par contre, en 1992, on constate la cicatrisation du glissement, marquée par le développement de la végétation.

La disparition de la maison M1 (Figure 27) s'accompagne de l'apparition de deux niches d'arrachement à vif (en rouge, Figure 26) sans doute intégrées dans un glissement plus important circulaire (en jaune, Figure 26).

La disparition des maisons M2 et M3 (Figure 27) ne semble pas, *a priori*, liée à un mouvement de terrain. Mais on ne peut exclure l'existence d'un mouvement de terrain qui aurait eu lieu entre 1954 et 1968, dont les traces seraient couvertes par la végétation en 1968.

Le glissement noté « postérieur à 2000 » s'est produit en janvier 2004. Il s'agit du glissement récent dont il est fait référence à plusieurs reprises dans ce rapport.

Diverses formes morphologiques observées sur les photographies aériennes et sur le terrain indiquent la présence de mouvements de terrains actuels. Les niches d'arrachement plausibles sont reportées sur la Figure 28, mais la liste n'est pas exhaustive. Mais il faut noter que ce n'est pas parce qu'on observe des gradins d'arrachement qu'une catastrophe est imminente ; en effet, dans certains cas particuliers, la création de ces gradins, synonyme de l'ouverture d'une zone en tension, permet le drainage du site et peut donc favoriser la stabilité. Néanmoins, il est nécessaire d'étudier et de suivre l'évolution de ces zones potentiellement à risque.

Enfin, on remarquera une particularité géomorphologique du site : des arêtes plus compétentes se singularisent (Figure 28) ; elles correspondent au point de vue structural à des zones très plissées (les plis, en chevron, ont une longueur d'onde métrique). Au point de vue lithologique, ces zones sont constituées par une plus grande épaisseur de flysch sain ; en effet, celui-ci résiste jusqu'à une altitude d'environ 5 m au-dessus du niveau de la plage (Figure 29), alors qu'il ne fait qu'affleurer au niveau du sable de la plage dans les zones adjacentes.

Les glissements de terrain se développent de part et d'autre de ces arêtes, sans les affecter. Il semblerait que certaines maisons soient construites sur ces points durs, en particulier la maison possédant une piscine. Par ailleurs, la présence de la piscine informe d'une certaine stabilité de la zone sur au moins une échelle de temps récente.

Les photographies aériennes constituent un document historique précieux à l'identification géomorphologique des mouvements de terrains. Ici, elles ont permis de déterminer l'évolution des mouvements de façon qualitative. Mais la meilleure exploitation qu'on puisse en faire est de créer un modèle numérique de terrain à partir de chaque campagne de photographie aérienne afin de quantifier l'évolution des pentes : la comparaison des surfaces topographiques permettrait l'estimation des volumes de terrains enlevés par l'érosion au sens large.

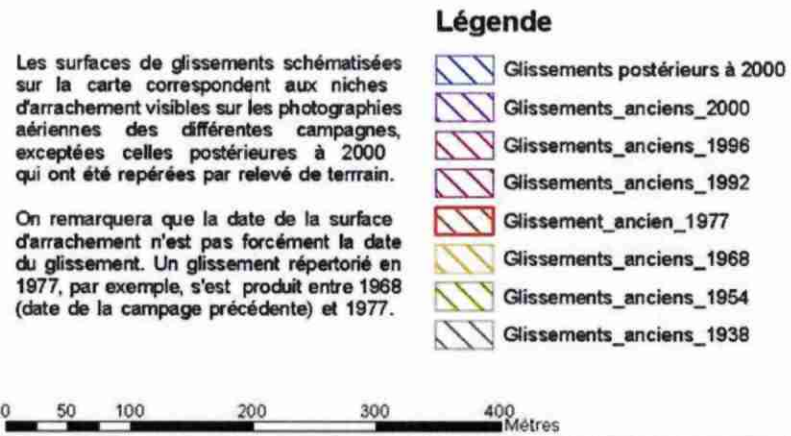


Figure 26 : Glissements de terrains répertoriés sur le secteur de Guéthary (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)

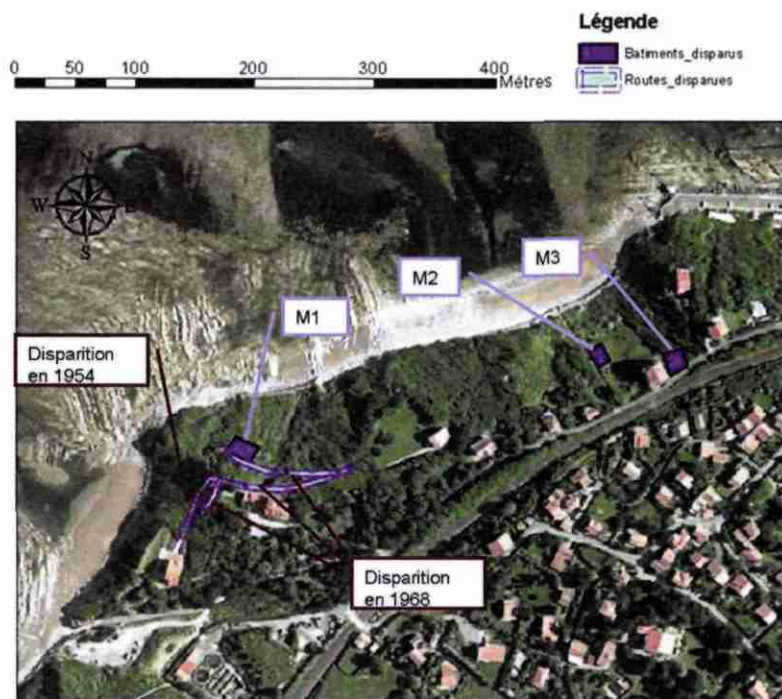


Figure 27 : Evolution des infrastructures dans le secteur de Guéthary. Les maisons signalées disparues M1, M2 et M3 sont visibles sur les photographies de 1954 et disparaissent dès 1968. (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)

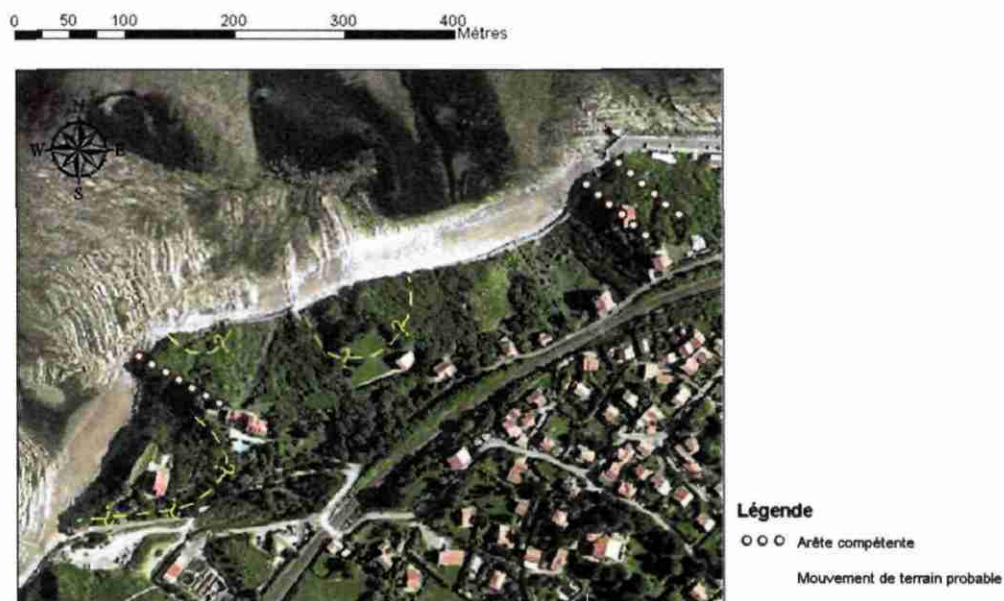


Figure 28 : Informations sur la géomorphologie obtenues par l'étude des photographies aériennes de la campagne de 2000 (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)



Figure 29 : Photographie de l'arête située la plus à l'ouest ; on remarquera l'importance de l'épaisseur de flysch sain ; un carnet de terrain vert donne l'échelle (photos M.Borie, janvier 2005)

## 2.4.2. Observations de terrain

### a) Le glissement de janvier 2004

#### • Description morphologique du glissement

Le glissement s'est produit sur une falaise côtière orientée NNW (Figure 26). La pente naturelle était à cet endroit d'environ  $35^\circ$  (pente actuelle du versant à l'est du glissement). L'extrémité de la zone source est à une altitude de 30 m et le pied du glissement arrive sur la plage à l'altitude d'environ 2 à 3 m. La pente moyenne du glissement est de  $27^\circ$ , mais elle évolue de  $90^\circ$  (extrémité supérieure de la niche d'arrachement, sur 1,5 m environ) à  $70^\circ$  (niche d'arrachement, sur environ 2,5 m), puis à  $40^\circ$  et à  $20^\circ$  (replat formé par le bourrelet), pour se terminer en front de bourrelet à  $40^\circ$ .

Selon la nomenclature descriptive d'un glissement (IAEG, 1990), on définit  $L_r$  la longueur de surface de rupture,  $L_d$  la longueur de la masse glissée,  $L$  la longueur totale,  $W_r$  la largeur de la surface de glissement,  $W_d$  la largeur de la masse glissée,  $D_r$  la profondeur de la surface de rupture et  $D_d$  celle de la masse glissée.

Dans le cas du glissement de janvier 2004 (Figure 30), les paramètres ont été mesurés ou estimés à partir du profil topographique effectué dans le glissement lors de la

campagne géophysique de juillet 2004 et de celui situé à l'est du glissement (Gourry *et al.*, 2004). La surface de rupture a été estimée en traçant une courbe dans la continuité de la niche d'arrachement jusqu'au pied de falaise en faisant l'hypothèse d'un glissement circulaire en s'inspirant de la surface conductrice visible sur le profil géophysique dipôle-dipôle effectué dans le glissement et fournis en novembre 2004 (Genna *et al.*, 2004a).

- $L_r = 53$  m
- $L = L_r = 53$  m ; en effet, le pied du glissement correspond clairement au bas de la colline, et le bourrelet, même s'il s'est propagé au-delà pendant le glissement, est aujourd'hui limité par le haut de plage car régulièrement dégraissé par la mer.
- $L_d = 48$  m
- $W_r$  est estimé à partir des orthophotos (© ORTHOLITTORALE, 2000) à 30 m, de même que  $W_d$  ; l'échelle des photographies ne permet pas plus de précision
- $D_r = 11$  m à partir des hypothèses faites sur la surface de rupture
- $D_d = 10$  m à partir des hypothèses faites sur la surface de rupture

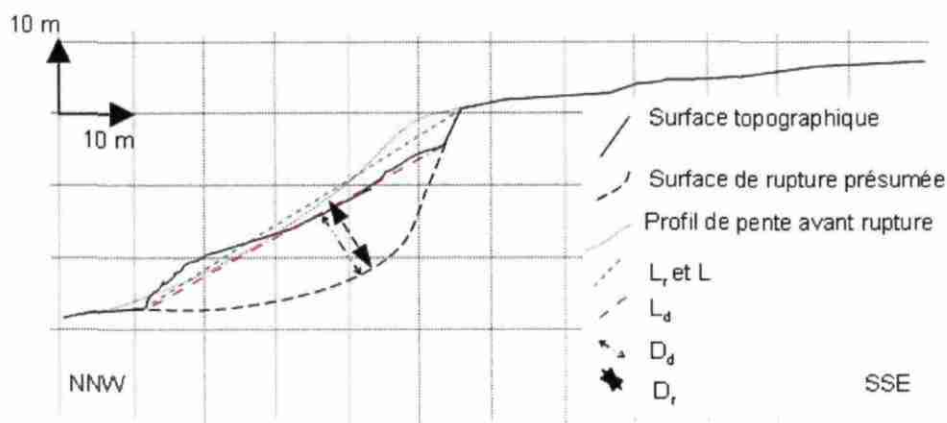


Figure 30 : Schéma et description du glissement de janvier 2004

Sur la coupe, la surface mobilisée estimée est de  $500 \text{ m}^2$ , soit, pour une largeur de 30 m, un volume mobilisé de  $15000 \text{ m}^3$ . La surface estimée du bourrelet en juillet 2004 est de  $450 \text{ m}^2$ , soit pour une largeur de 30 m, un volume mobilisé de  $13500 \text{ m}^3$ .

Ainsi, en coupe transversale au glissement,  $50 \text{ m}^2$  de matériau a été érodé par l'océan suite au glissement à la date du profil (juillet 2004), c'est-à-dire sur 6 mois. Ceci équivaut à un volume de matériau de  $1500 \text{ m}^3$  (10% du matériau global mobilisé). Le dégraissage du matériau n'est cependant pas linéaire au cours du temps, il dépend

de la quantité de matériau apporté en pied de glissement par les divers facteurs (gravité, ruissellement, coulées de boues) ainsi que de l'aptitude de l'océan au déblaiement (coefficient de marée, force de la houle, des courants, etc...).

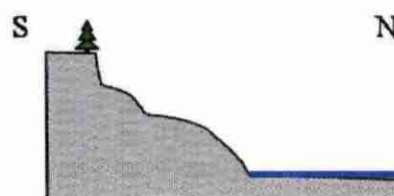
Les caractéristiques générales de rupture sont proposées dans le Tableau 12, extrait des fiches types pour les mouvements de terrains élaborées par Laugier (2002).

<b>LE SCENARIO DE RUPTURE</b>	
<i>Caractéristiques générales</i>	
Date	Janvier 2004
Durée estimée	Quelques minutes max.
Conditions climatiques	Période pluvieuse, hiver
Facteurs déclenchants ou aggravants	précipitations ?
<i>Processus de déstabilisation et de rupture au niveau de la zone source</i>	
Rupture, réactivation ou accélération	Rupture brutale
Type de rupture	Glissement plan à courbe
Angle de frottement	20,5° (SORES, 1994)
Direction moyenne du vecteur déplacement	N150°
Nombre de phases de rupture	1

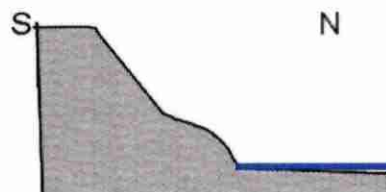
Tableau 12 : Caractéristiques de rupture (d'après Laugier, 2002, modifié)

Dans ce glissement, la niche d'arrachement peut être différenciée en deux zones en novembre 2004 (Figure 31) :

- A l'ouest une niche d'arrachement « classique » en demi-cercle à partir de laquelle un profil de glissement « niche d'arrachement – bourrelet(s) » s'installe :



- à l'est, une niche d'arrachement rectiligne, suivie par un terrain raviné en pente forte (40°) :



Ces deux profils distincts suggèrent que la surface de rupture est différente de part et d'autre du glissement : à l'ouest le profil de rupture est le profil type d'un glissement rotationnel (« en coup de cuillère ») alors qu'à l'est le glissement aurait suivi un plan de faiblesse mécanique ; la direction du plan de rupture N40°E – 40°N. Si on émet l'hypothèse que les bancs conservent dans le glissement la direction et le pendage des bancs qui pénètrent dans le glissement, c'est-à-dire N11°-20°SE, le plan de rupture correspondrait à une discontinuité de direction et pendage proches de ceux des fractures de la famille D.



Figure 31 : Glissement de janvier 2004 sur les falaises de Guéthary

#### • Observations de terrain et évolution du glissement

Le glissement est encore à l'heure actuelle en évolution (coulée de boue en pied de bourrelet, niche d'arrachement en tête du bourrelet (nouveau départ à prévoir ?), gradin d'arrachement au nord de l'ancienne niche, ...). La végétation arbustive (tamaris principalement) d'avant le glissement a laissé place à des plantes hydrophiles (roseaux) sur le bourrelet.

Le pied du glissement est régulièrement nettoyé par la mer et le matériau saturé par l'eau de mer et de pluie. Cette augmentation de la teneur en eau engendre des coulées boueuses (dépassement des limites de liquidité) et ainsi l'évacuation du matériau vers l'océan. Le ravinement observé sur la surface actuelle du glissement est également une forme d'érosion.

Au contact de la levée nord-est du glissement des fentes de tensions tordues ont été observées. Elles témoignent des contraintes subies par le matériau mobilisé par le glissement et en particulier d'un mouvement de cisaillement en bordure du glissement. L'apparition de fentes tensions en 2005, un an après le mouvement initial, suggère que le glissement est toujours actif, bien que peu rapide (mouvement de solifluxion).

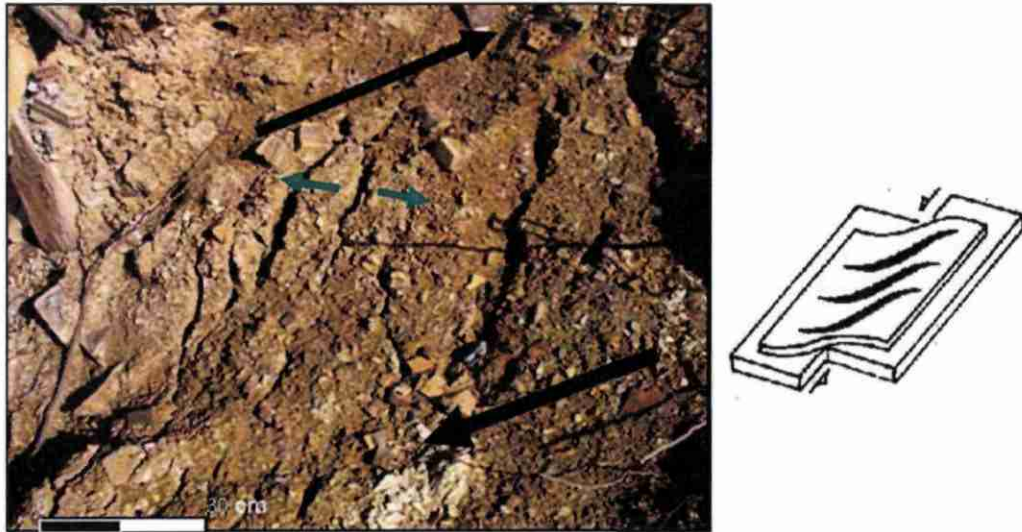


Figure 32 : Fentes de tension et schéma interprétatif

L'apparition de gradins d'arrachement dans le bourrelet actuel va également dans le sens d'un mouvement persistant, continu ou non, dans le temps. Afin de suivre et d'étudier les phases de réactivation qui engendreront des déformations de la surface actuelle du glissement, un suivi photogrammétrique terrestre est envisagé (par analyse d'images stéréoscopiques prises à partir d'un point fixe).

Deux autres gradins d'arrachement en amont et latéralement au glissement ont été observés. De plus, dans le profil géophysique effectué dans le glissement (Genna *et al.*, 2004a) on observe une surface circulaire conductrice en amont du glissement actuel partant d'un dénivelé. L'évolution future du glissement semble ainsi régressive, mais il faut tenir compte du fait qu'à la suite du glissement majeur, les circulations de fluides et répartitions de masse ont changé, évoluant peut être vers un contexte stabilisateur.

### **b) Autres mouvements de terrain**

A l'ouest du glissement de janvier 2004, de nouvelles niches d'arrachement ont été observées les 12 et 13 janvier 2005 (Figure 33) en pied de falaise.

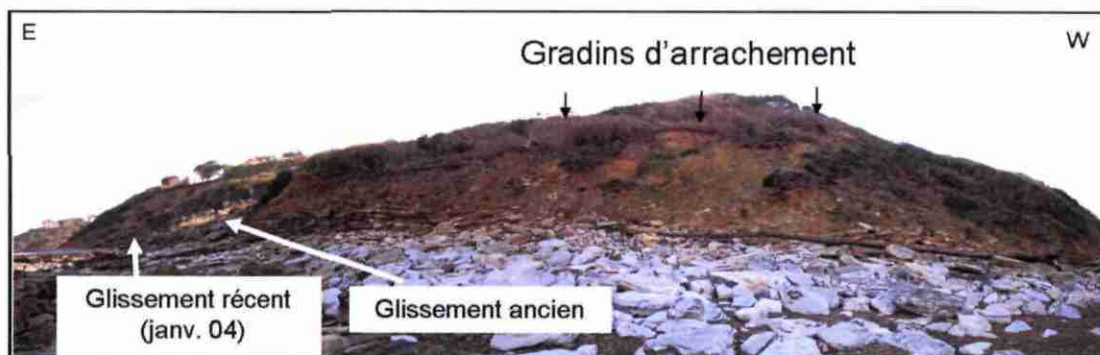


Figure 33 : Apparition de gradins d'arrachements à l'ouest des glissements précédents (12 janvier 2005)

D'autre part, les terrains de l'ensemble des falaises d'Harotzen Costa sont affectés par des processus de type solifluxion comme en témoigne la végétation (Figure 34).



Figure 34 : Déformation des arbres par les mouvements de solifluxion du sol (janvier 2005)

### 2.4.3. Conclusion

L'ensemble des désordres observés sur une grande partie des falaises du secteur étudié, est une manifestation d'un mouvement général des altérites qui se ponctue de temps à autres par des glissements rapides locaux en fonction de la répartition des contraintes dans le massif. Le glissement de janvier 2004 est un de ces mouvements liés à l'accumulation de contraintes. A la suite d'un mouvement majeur, les contraintes se réarrangent, et la distribution peut totalement changer, rendant toute tentative de prédiction complexe.

### 3. Site d'Illbarritz

#### 3.1. INTRODUCTION

La falaise d'Illbarritz, formée d'une trentaine de mètres de matériau marno-calcaire surmonté de sables gravo-argileux, est le siège d'instabilités constantes mobilisant des volumes très variables, du simple bloc de quelques décimètres cubes aux pans entiers de plusieurs décimètres cubes. Les instabilités permanentes de terrain existant à Illbarritz ont conduit à la fermeture de la plage (Figure 35).

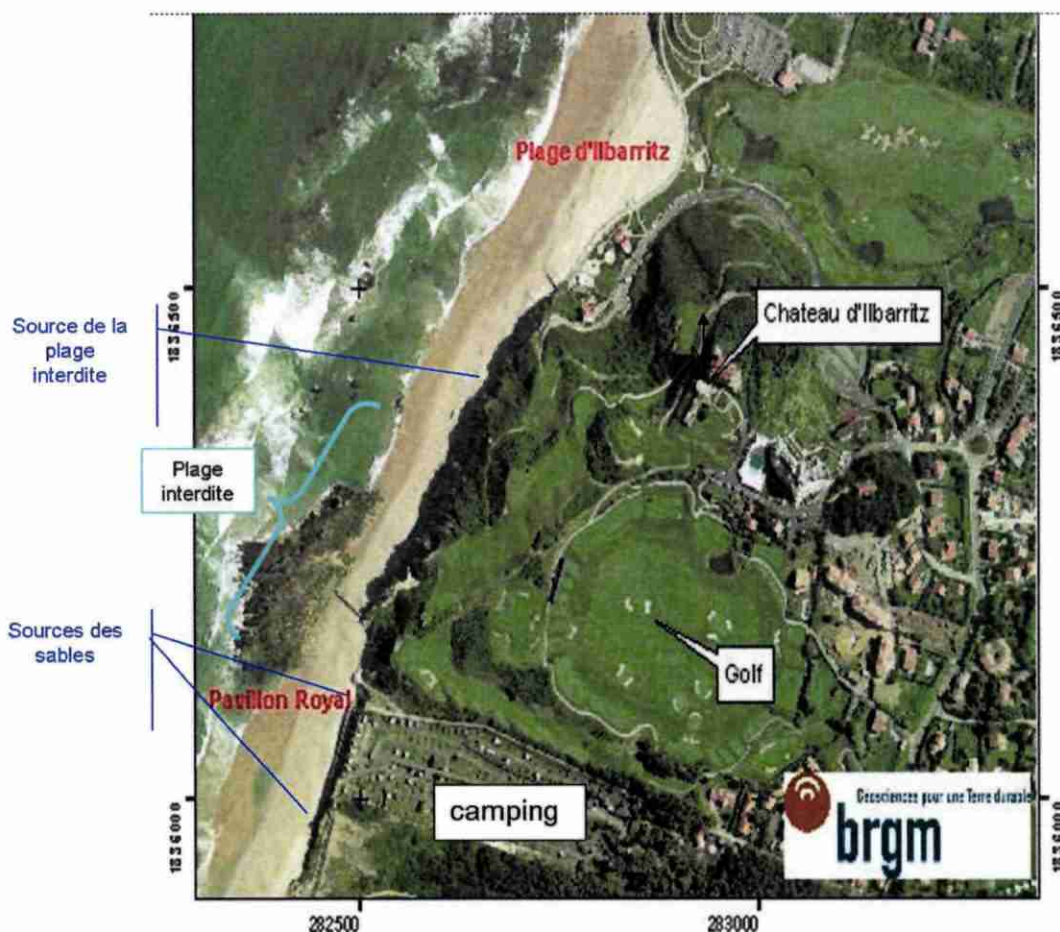


Figure 35 : Site d'Illbarritz (fond cartographique : © ORTHOLITTORALE, 2000)

Face aux phénomènes, l'enjeu est double, d'une part le recul de la falaise diminue la surface du terrain de golf aménagé en arrière et, d'autre part, les chutes de matériaux engendrent un risque réel pour le public qui fréquente la plage malgré les interdictions (Figure 36).

Le but de ce travail est de comprendre les mécanismes des différentes instabilités observées, déterminer les facteurs aggravants, et de quantifier les volumes de matériau érodés.



*Figure 36 : Danger au pied de la falaise d'Ibarritz : promeneurs adossés à la falaise (personnages floutés entourés de rouge)*

## 3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

### 3.2.1. Le substratum rocheux

La falaise d'Illbarritz s'étend sur environ 400 m entre les plages d'Illbarritz au nord et la plage du Pavillon royal au sud (Figure 37). La pente naturelle est en moyenne de 40° à 50°, mais localement, elle peut atteindre jusqu'à 75° (Chauvin et Largillier, 2000a). La partie inférieure de la falaise d'Illbarritz est formée par les marno-calcaires lutétiens supérieurs de Goureppe sur 30 m d'épaisseur. Au sein des marnes, quelques bancs plus carbonatés sont identifiables. La direction des bancs, variable, évolue de N30°E à N40°E ; ceux-ci plongent de 20° à 40° vers l'est (vers le continent).

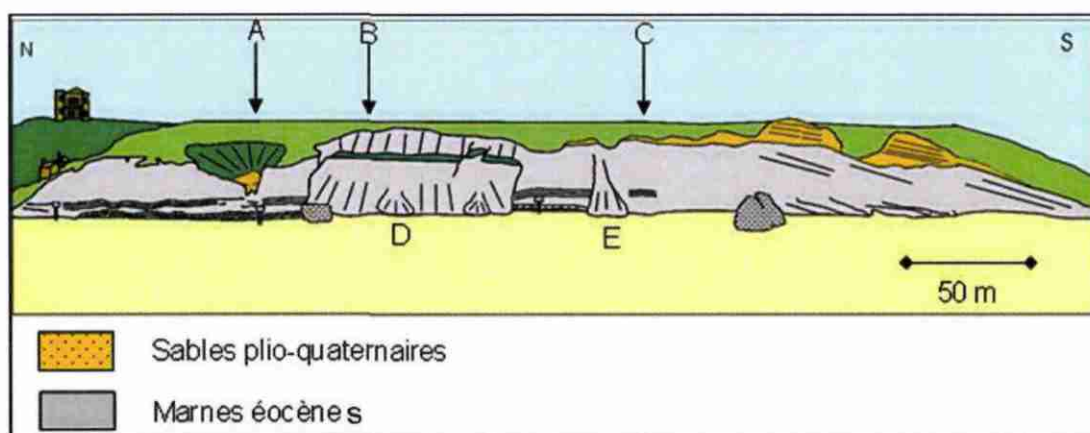


Figure 37 : Panorama des falaises d'Illbarritz (longueur : 400 m ; hauteur 30 à 40 m ; décembre 2004). Légendes A à E détaillées dans le texte.

Un niveau plus carbonaté est remarquable au pied de la falaise depuis l'extrémité nord jusqu'au point C (Figure 37). Au-dessus de ce banc, une succession de bancs calcaires d'épaisseur centimétrique apparaît.

A l'extrémité sud du profil, les bancs plongent vers le sud-est, amorçant la dépression topographique du camping du Pavillon Royal.

La fracturation est très abondante dans les niveaux les plus carbonatés. Bien que les plans soient très dispersés, trois familles semblent se distinguer (à vérifier par davantage de mesures) dans les niveaux les plus compétents (Figure 38) : une famille subparallèle au trait de côte (N20/40°E 45/80°WNW) et deux familles perpendiculaires (N100/140°E 40/60°NNE et N100/140°E 40/60°SSW). Beaucoup de fractures ne se prolongent pas dans les niveaux marneux. Par ailleurs, les bancs les plus carbonatés

d'épaisseur centimétrique sont fréquemment découpés en éléments centimétriques à décimétriques par un réseau de fractures au plan très variable.

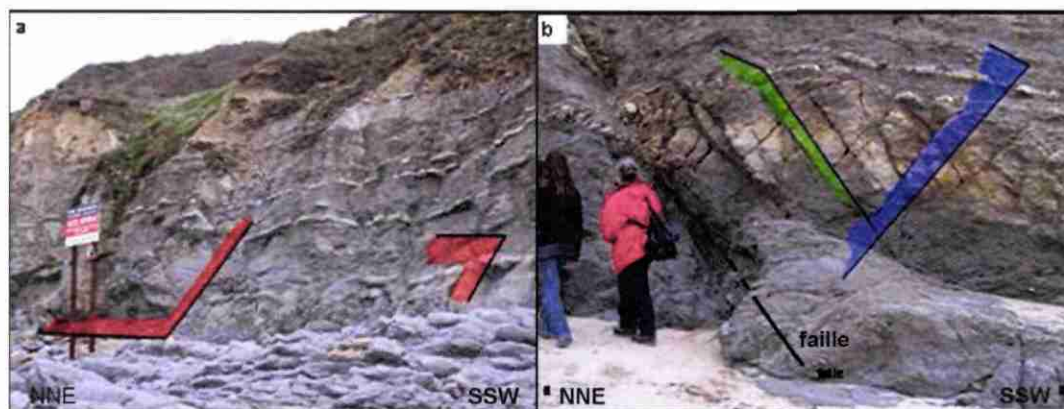


Figure 38 : Fracturation dans les marno-calcaires lutétiens. (a) : fractures subparallèles à la pente topographique (environ N36°E 50°NW) ; (b) Fractures et failles perpendiculaires au trait de côte (environ N°130°E 55°SW et N130°E 53°NE)

La frange d'altération des marnes ne se perçoit pas visuellement sur l'affleurement, mais différents auteurs (Falchi, 1981 ; Chauvin et Largillier, 2000a) l'identifient lorsqu'elle existe sur un à quatre mètres d'épaisseur au sommet du niveau à l'interface avec les sables plio-quadernaires.

### 3.2.2. Le recouvrement alluvionnaire

Les formations plio-quadernaires reposent en vaste nappe alluviale sur les formations antérieures à une altitude d'environ 30 m NGF sur le site étudié. Le contact plonge vers le sud à partir d'une cinquantaine de mètres de l'extrémité Sud de la falaise. Le matériau de nature principalement siliceuse, d'origine détritique, a comblé les paléovallées et paléo-bassins. On observe deux niveaux majeurs, le niveau inférieur est composé de sables fins limoneux ocres, d'épaisseur variable (2 à 5 m) ; la couche supérieure de grave argileuse de couleur un peu plus claire. Des stratifications obliques témoignent de l'agitation du milieu lors du dépôt (Figure 39). Le niveau inférieur est caractérisé par des lentilles argileuses (Schoeller, 1951).

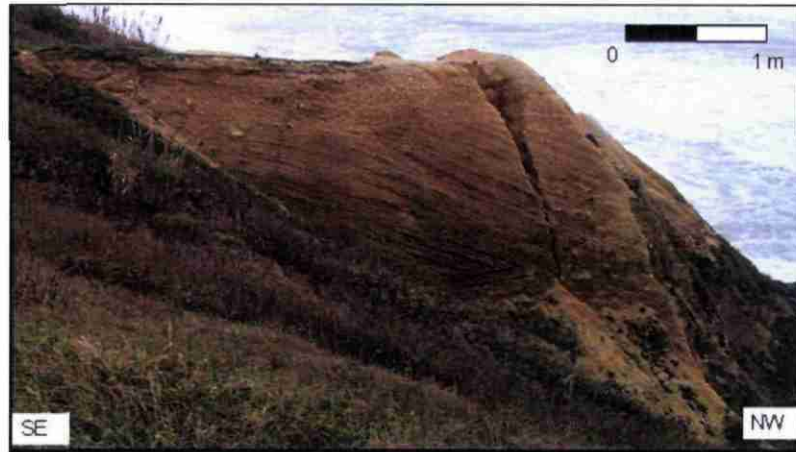


Figure 39 : Sables plio-quaternaires. Les stratifications obliques sont soulignées par des traits noirs

Les niveaux les plus graveleux ont été exploités et notamment au niveau du point B (Figure 37 ; Chauvin et Largillier, 2000a).

Le talus formé par ces sables est particulièrement pentu (subvertical à certains endroits), soit supérieur à la pente d'équilibre de la formation estimée à 45° par Chauvin et Largillier (2000a).

### 3.2.3. Propriétés des matériaux

#### a) Etude bibliographique

Les études bibliographiques se sont portées dans un premier temps sur le site même du golf d'Ilbarritz. Mais la similitude géologique voire hydrogéologique entre ce dernier site et la Côte des Basques à Biarritz a permis l'extension de la bibliographie des études géotechniques à ce dernier site. Cette falaise de plus de 1,5 km de long, dont la situation géographique en pleine ville de Biarritz en fait un site particulièrement vulnérable, a subi de nombreux travaux de confortements depuis 1877 et études depuis 1975 (Alexandre *et al.*, 2003).

#### • Sur le site d'Ilbarritz (Bidart)

Les études réalisées sur le site d'Ilbarritz entre la plage du Pavillon Royal et les plages d'Ilbarritz sont rares. En effet, on n'en recense qu'une seule (Alexandre *et al.*, 2003) effectuée par ANTEA (Chauvin et Largillier, 2000a). Dans le cadre d'un avant-projet sommaire (APS) en perspective d'un confortement paysager de la falaise, une étude géologique et hydrogéologique a été réalisée. Les calculs d'ordre géotechnique ont été

basés sur les résultats d'essais antérieurs effectués sur la falaise de la Côte des Basques, localisée à 1,5 km au nord-est. Les pentes d'équilibre suivantes ont été déduites :

- Pente d'équilibre ( $F=1,5$ ) dans les marnes saines :  $45^\circ$  à  $50^\circ$
- Pente d'équilibre ( $F=1,5$ ) dans les marnes altérées :  $33^\circ$
- Pente d'équilibre dans les alluvions drainées :  $45^\circ$
- Pente de masque drainant dans les alluvions :  $33^\circ$

L'APS proposait plusieurs modèles d'aménagement dont le plus lourd conduisait aux mêmes types de travaux que ceux réalisés sur la Côte des Basques.

Le projet n'ayant pas abouti, consécutivement à une révision de l'objectif de confortement (demande de simple mise en sécurité de la plage en pied de falaise suite à l'interdiction du haut de la falaise au public), un enrochement de l'ensemble de la falaise a été préconisé (Chauvin et Largillier, 2000b). Les travaux n'ayant pas été effectués avant l'été, deux épis perpendiculaires au linéaire côtier ont été érigés de façon provisoire, ainsi qu'il l'a été recommandé dans le rapport, afin de limiter l'accessibilité de la plage au public. Cinq ans plus tard, les épis sont toujours présents et la question soulevée par les auteurs du rapport, à savoir si l'effet de ces enrochements à long terme est néfaste, est d'actualité. En effet, deux barrières perpendiculaires à la côte qui s'enfoncent de 45 m et 21 m sur l'estran peuvent engendrer des modifications des courants à marée haute et on peut aisément imaginer des phénomènes de réflexion de la houle qui accentueraient l'effet érosif de la mer dans certaines zones.

#### • Sur le site de la Côte des Basques (Biarritz)

Le site d'Ilbarritz est similaire au site de la Côte des Basques par sa géologie. En effet, la Côte des Basques est une falaise de 50 m de hauteur composée de marnes de l'Eocène (Lutétien) et dont le sommet est formé par des alluvions sablo-graveleux plio-quadernaires (environ 10 m d'épaisseur). Les marnes, de pendage variant de  $25^\circ$  à  $35^\circ$ NE, forment ici le flanc nord d'un anticlinal dont l'axe se situe au sud du ruisseau de Chabbague (Sud de la limite de la commune de Biarritz ; Falchi, 1981).

De nombreuses études ont été recensées dans la synthèse bibliographique de l'étude de l'érosion de la côte basque réalisée par A. Alexandre et ses co-auteurs (2003). Il existe de plus des rapports complémentaires qui traitent également de l'érosion de la côte, on citera en particulier celui de Falchi (1981) qui a effectué une importante étude géologique et hydrogéologique par ailleurs. Des études purement géologiques sont citées dans Falchi (1981), parmi lesquels on retiendra :

- Alvinerie J., Mayeux C., et Rechiniac A., 1962, Esquisse sédimentologique de la coupe de Biarritz. Colloque sur le paléogène t.1, BRGM, pp.301-315
- Bertrand L., 1902, Contribution à l'étude géologique des environs de Biarritz-Bidart et Bayonne. BSGF (4) II pp.83-86
- Carrez L., 1896, Coupe des falaises de Biarritz et Bidart, BSGF (3) XXIV p.392-411
- Jacquot M.E., 1864, Description géologique des falaises de Biarritz, Bidart, Guéthary et Saint Jean-de-luz. Edition Lafargue (Bordeaux).
- Koechlin-Schlumberger, 1855, Notice sur la falaise entre Biarritz et Bidart, BSGF (2) XII, pp.1235-1257

#### Caractéristiques des marnes

Falchi (1981) distingue les « marnes altérées (MA) », dont l'épaisseur varie entre 1 et 4 m lorsqu'elles existent des marnes saines qu'il subdivise en trois faciès notés M1, M2 et M3 différant globalement par leur taux en carbonate qui influe sur leur compétence : *« le passage de la zone 1 à la zone 3 montre une diminution de la plasticité générale, une augmentation du taux de CaCO<sub>3</sub>, une amélioration à l'érosion marine, une augmentation des grandes fissures et des recristallisations, l'absence d'écoulement de fissures, l'aspect de dégradation générale quelle que soit la zone considérée »*. L'altération s'est produite par dissolution de la fraction carbonatée par les eaux telluriques et se marque par une forte teneur en eau de l'altérite par imprégnation constante, une chute de la teneur en CaCO<sub>3</sub> (20% contre 46% dans les marnes saines), des auréoles d'oxydation et une détérioration des propriétés mécaniques. Ces altérites ne sont observées que dans les zones où un écoulement existe.

Les caractéristiques mécaniques des marnes mesurées lors de la campagne mécasol en 1976 (dans Falchi, 1981) sont présentées dans le Tableau 13.

	Marnes altérées M.A.	Marnes franches M.1.	Marnes résistantes M.2.
Caractéristiques lithologiques	Mur de la nappe, présence de tâches d'oxydations superficielles	Finement craquelée, très plastique en présence d'eau	Fracturée, matériau semi-rocheux formant un éperon
Epaisseur en (m)	0 à 4	70	70
Poids volumique en kN/m <sup>3</sup>	14,5	18,5	18.5
C en MPa	C <sub>d</sub> = 0,04 C <sub>uu</sub> = 0,08	C <sub>d</sub> = 0,07	
φ en degrés	φ <sub>d</sub> = 16 φ <sub>uu</sub> = 0	φ <sub>d</sub> = 31	
Limite de liquidité W <sub>L</sub>	60	33	
Indice de plasticité I <sub>P</sub>	40	18	
Teneur en eau W	13 à 25	0	
Porosité n	0	Circulation dans les craquelures de surface (eau de pluie)	Infiltration d'eau de pluie dans des diaclases
Perméabilité	Nulle		
Circulation d'eau de nappe	Nulle		
% massique en CaCO <sub>3</sub>	20	46.5	64
% massique en SiO <sub>2</sub>	72,8	48	31
% massique en sulfates	0	0	
% massique en chlorures	0	0	

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des marnes (d'après Falchi, 1981, modifié)

D'après Falchi (1981), les caractéristiques mécaniques mesurées sont surestimées pour deux raisons :

- les mesures ont été effectuées sur des échantillons carottés en retrait de la falaise, et donc sur un matériau non exposé à l'altération météorique et océanique,
- les valeurs données sont moyennées et ne tiennent pas compte des variations locales de compacité du matériau.

Par ailleurs, les caractéristiques des marnes saines et altérées ont été mesurées ou déterminées par rétro-analyse de mouvements de terrain lors des avant-projets détaillés réalisés par le BRGM pour le confortement de la Côte des Basques (Tableau 14 et Tableau 15, Riondy *et al.*, 1991 et Riondy et Denis, 1992).

Côte (m) (0 NGF)	Epaisseur (m)	Nature	$\varphi$ (°)	C (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	PI (MPa)	E (MPa)
37	1	Marne altérée	17	25	20	15	10
36		Marne saine	$\geq 30$	$\geq 70$	21	3,5	100

Tableau 14 : Caractéristiques des marnes saines et altérées en zone B (Riondy *et al.*, 1991)

Côte (m) (0 NGF)	Epaisseur (m)	Nature	$\varphi$ (°)	C (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	PI (MPa)	E (MPa)
41	1	Marne altérée	17	25	20	15	10
40		Marne saine	$\geq 30$	$\geq 70$	21	3,5	100

Tableau 15 : Caractéristiques des marnes saines et altérées en zone C (Riondy et Denis, 1992)

#### Caractéristiques des sables plio-quaternaires

Le Tableau 16 résume les données recueillies par Falchi (1981) pour les différents faciès des sables.

	Sables blancs	Sable rouge	Galets et graviers
Caractéristiques lithologiques	Contient des nodules d'impuretés limoneuses	Sable ferrugineux, réservoir de la nappe	Emballées dans des argiles plus ou moins sableuses
Epaisseur en (m)	0 à 3	0 à 5	0 à 8
Taille (mm)	0,2	0,2	10 à 100
Poids volumique en kN/m <sup>3</sup>	15,5	15,5	
C en MPa	0	0	
$\varphi$ en degrés	33	33	
Porosité n	54	65	
Perméabilité	$10^{-5}$		

Circulation d'eau de nappe	Possible	Très forte	Forte
% massique en CaCO <sub>3</sub>	0	0	
% massique en SiO <sub>2</sub>	96,4	97,5	

Tableau 16 : Caractéristiques des alluvions (Falchi, 1981)

Les caractéristiques détaillées des sables plio-quadernaires ont été mesurées ou déterminées par rétro-analyse de mouvements de terrain lors des avants projets détaillés réalisés par le BRGM pour le confortement de la Côte des Basques (Tableau 17 et Tableau 18 ; Riondy *et al.*, 1991 et Riondy et Denis, 1992).

Côte (m)	Epaisseur (m)	Nature	$\phi$ (°)	C (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	PI (MPa)	E (MPa)
45							
	2	Remblai	25	0	19	0,5	3
43							
	6	Sable fin	30	0	19	0,5 à 0,8	2,5 à 6,0
37							

Tableau 17 : Caractéristiques mécaniques des alluvions en zone B de la Côte des Basques (Riondy *et al.*, 1991)

Hauteur de la nappe : 41 m à 39 m, selon drainage

Côte (m)	Epaisseur (m)	Nature	$\phi$ (°)	C (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	PI (MPa)	E (MPa)
53							
	1,5	Remblai	25	0	19	0,5	3
51,5							
	1,5	grave	30	0	20	1	6
50							
		sable	30	0	20	0,8	3 à 10
47							
		Sable argileux	30	0	19	0,8	7
41							
		Marne altérée	17	25	20	15	10
40							
		Marne saine	$\geq 30$	$\geq 70$	21	3,5	100

Tableau 18 : Caractéristiques mécaniques des alluvions en zone C de la Côte des Basques (Riondy et Denis, 1992)

Hauteur de la nappe : 45,5 m à 42,5 m, selon drainage

Un essai de cisaillement réalisé sur les sables limoneux (masse volumique humide :  $\gamma_h = 19 \text{ kN.m}^{-3}$ ) lors de l'APD de la zone C a donné les caractéristiques suivantes :

- $\varphi = 30^\circ$
- $c = 25 \text{ kPa}$

#### • Synthèse

La nature des matériaux des falaises de la Côte des Basques et d'Ibarritz, ainsi que leur agencement dans l'espace sont très similaires. Cette observation permet dans un premier temps la transposition des caractéristiques mécaniques déterminées sur le premier aux marnes et sables d'Ibarritz à condition de faire la bonne correspondance entre les différents niveaux. L'analogie entre les niveaux peut de plus s'appuyer sur les résultats d'essais d'identification.

On remarque cependant que les valeurs données par les différents auteurs sont parfois dispersées. L'explication est en partie liée à l'hétérogénéité du matériau, mais également à la méthode de détermination. En effet, les caractéristiques obtenues par rétro-analyse de phénomènes naturels sont celles du matériau analysé dans son ensemble, avec une part importante d'incertitude qui augmente avec le nombre de variables à déterminer. D'autre part, les caractéristiques mesurées par essais mécaniques sont celles d'un échantillon, de taille limitée, et elles sont souvent surestimées par rapport aux caractéristiques globales du massif rocheux.

#### ***b) Essais d'identification***

Dans un premier temps, les essais d'identification ont été réalisés sur le matériau glissé. Mais ils seront complétés par des essais sur le matériau altéré en place ainsi que sur le matériau sain. La comparaison entre les différents matériaux permettra de mieux connaître et comprendre l'altération des marnes et sa conséquence, ainsi que la transformation du matériau au cours du mouvement de terrain.

#### • Analyse granulométrique

Le principe de l'essai est rappelé dans le paragraphe « Essais d'identification » du chapitre 2.2.3 « Propriétés des flyschs à silex de Guéthary et de leurs altérites ». L'analyse granulométrique a été réalisée sur un échantillon prélevé dans un glissement qui s'était produit dans les jours précédents (point E, Figure 37). Le glissement a charrié à la fois les matériaux marneux au sein desquels il s'est produit, mais a également entraîné les alluvions sus-jacents.

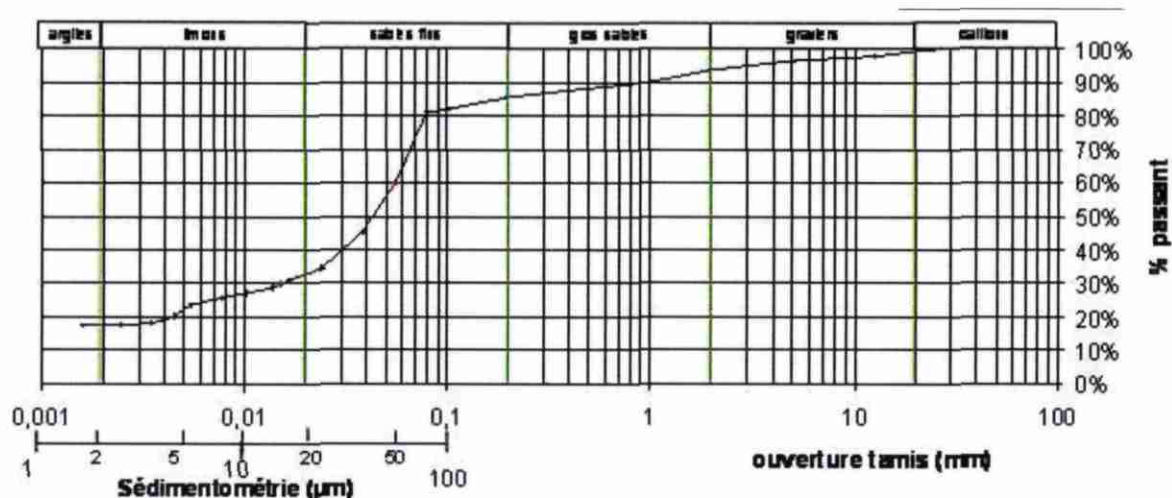


Figure 40: Courbe granulométrique de l'échantillon I\_acbm251104-1

La granulométrie est étalée ( $C_u = 550$ ), quelques éléments grossiers (galets siliceux plio-quadernaires et éléments marneux) apparaissent dans une matrice marneuse de sable fin à limon (Figure 41). La proportion de fines est élevée avec 81% des matériaux de diamètre inférieur à 80  $\mu\text{m}$ , dont moins de 20% de matériaux argileux (inférieur à 2  $\mu\text{m}$ ). Le coefficient de courbure élevé,  $C_c = 40$ , met en évidence l'importance de la fraction 10 à 100  $\mu\text{m}$  (limons à sables fins).

En l'état d'avancement actuel, aucune conclusion ne peut être émise sans disposer de davantage de mesures.



Figure 41 : Matériau du bourrelet du glissement E environ 4 mois après l'évènement (mars 2005)

#### • Limites d'Atterberg

Les principes de cet essai sont énoncés dans le paragraphe « Essais d'identification » du chapitre 2.2.3. Le Tableau 19 et la Figure 42 présentent les résultats obtenus sur les échantillons prélevés dans le glissement E, ainsi que ceux mesurés par Mécasol lors de sa campagne de 1976.

	Teneur en eau	Wl	Wp	lp	lc
nbval	4	3	3	3	3
Moyenne	26%	41%	17%	25%	67%
écart type	2%	1%	0%	1%	7%
variance	0%	0%	0%	0%	0%
C.V.	9%	2%	0%	4%	10%
min	22%	40%	16%	23%	60%
médiane	26%	42%	16%	25%	64%
max	29%	42%	17%	25%	76%
étendue	7%	2%	0%	2%	16%

Tableau 19 : Limites d'Atterberg des échantillons prélevés dans le glissement E d'Illbarritz

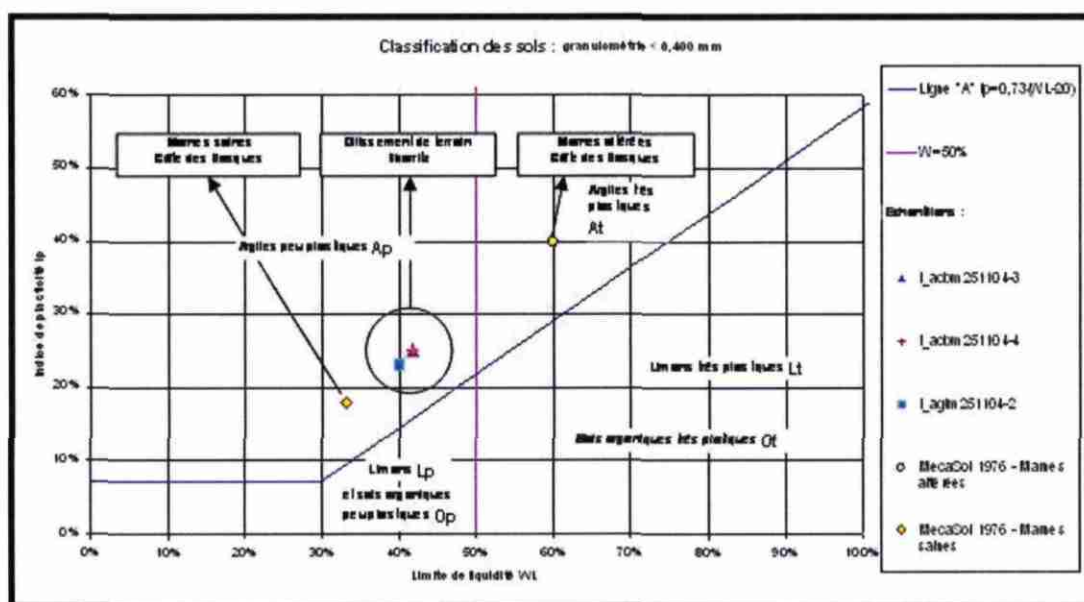


Figure 42 : Diagramme de Casagrande et applications aux formations géologiques d'Ilbarritz

Trois types d'échantillons apparaissent dans le diagramme de Casagrande et s'alignent parallèlement à la « ligne A », dans le domaine argileux (au-dessus de la « ligne A ») : du moins plastique au plus plastique s'agencent les marnes saines, puis le matériau du glissement de terrain et enfin les marnes altérées.

L'alignement le long d'une ligne parallèle à la « ligne A » est caractéristique d'échantillons issus d'un même dépôt. Or ici, les marnes altérées et saines proviennent de la Côte des Basques et le matériau du glissement de terrain d'Ilbarritz. Cette configuration étaye l'hypothèse de la ressemblance des matériaux entre ces deux sites en plus de leur similitude stratigraphique.

Les marnes saines, peu plastiques, évoluent vers un matériau plastique lors de leur altération. Si cette tendance se confirme avec les futures études, elle montrerait que le glissement de terrain a mobilisé un matériau en cours d'altération.

Le matériau constituant le glissement a une teneur en eau plus élevée que les marnes en place saines ou altérées, ce qui leur donne une consistance molle à très ferme (plastique) contre une consistance solide pour les matériaux en place. Les mouvements de type solifluxion persistaient probablement au moment du prélèvement (quelques jours après le glissement).

L'indice de Skempton est compris entre 1,30 et 1,40 pour les échantillons prélevés dans le glissement. Ces valeurs caractérisent un sol actif. En extrapolant les résultats granulométrique aux marnes de la Côte des Basques, on obtient les valeurs de 2,22

pour les marnes altérées, soit un sol très actif, et de 1,00 pour les marnes saines (sol normal).

Bien que peu argileux au point de vue granulométrique, les marnes de l'éocène évoluent vers un matériau très plastique et instable en s'altérant. Ces caractéristiques sont sans doute liées à la nature de l'argile de formation et aux transformations minéralogiques engendrées par l'altération.

#### • Classification du sol – Conclusion et perspectives

Le matériau glissé d'Ibarritz appartient à la classe A2 de la classification GTR (Guide de Terrassements Routiers), constituée de sables fins argileux, des limons, des argiles et marnes peu plastiques et des arènes.

Altérées, les marnes forment un matériau très actif, particulièrement instable. D'après Falchi (1981) l'altération se caractérise par la diminution de la teneur en carbonate. Afin de localiser les zones altérées sur les falaises d'Ibarritz des prélèvements sont prévus à équidistance le long d'un profil vertical ainsi que le long d'un profil horizontal sur lesquels des analyses de calcimétrie seront effectuées. Une corrélation entre teneur en carbonate et un paramètre de sensibilité à l'eau (indice de plasticité, activité, ...) sera également recherchée.

### 3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE

#### 3.3.1. Présentation

Les sables plio-quadernaires forment le seul aquifère répertorié sur le site étudié (SIGES, 2005). D'après Chauvin et Largillier (2000a), le mur de l'aquifère semblerait plonger vers l'intérieur des terres. Sur le site étudié, on observe une venue d'eau notée Is1 (Point A; Figure 37). La source, non visible depuis la plage, émerge des sables plio-quadernaires et elle est localisée dans une dépression accessible depuis le golf (accès difficile à cause de la végétation dense). L'écoulement se produit en cascade le long de la falaise marneuse sur environ 7 m le long desquels on constate la présence de dépôts.

Cette source serait une source de débordement, qui émerge à la faveur d'un talweg (Figure 43, localisation Figure 35 : « Source de la plage interdite », photographie Figure 44).

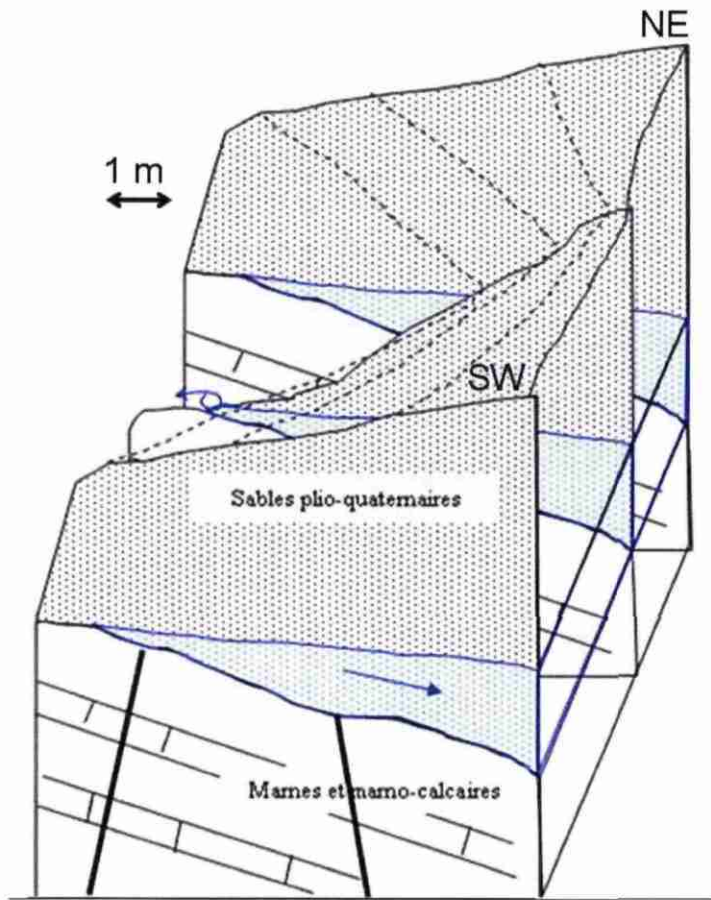


Figure 43 : Bloc diagramme représentant le système de la source de débordement Is1 à Ilbarritz

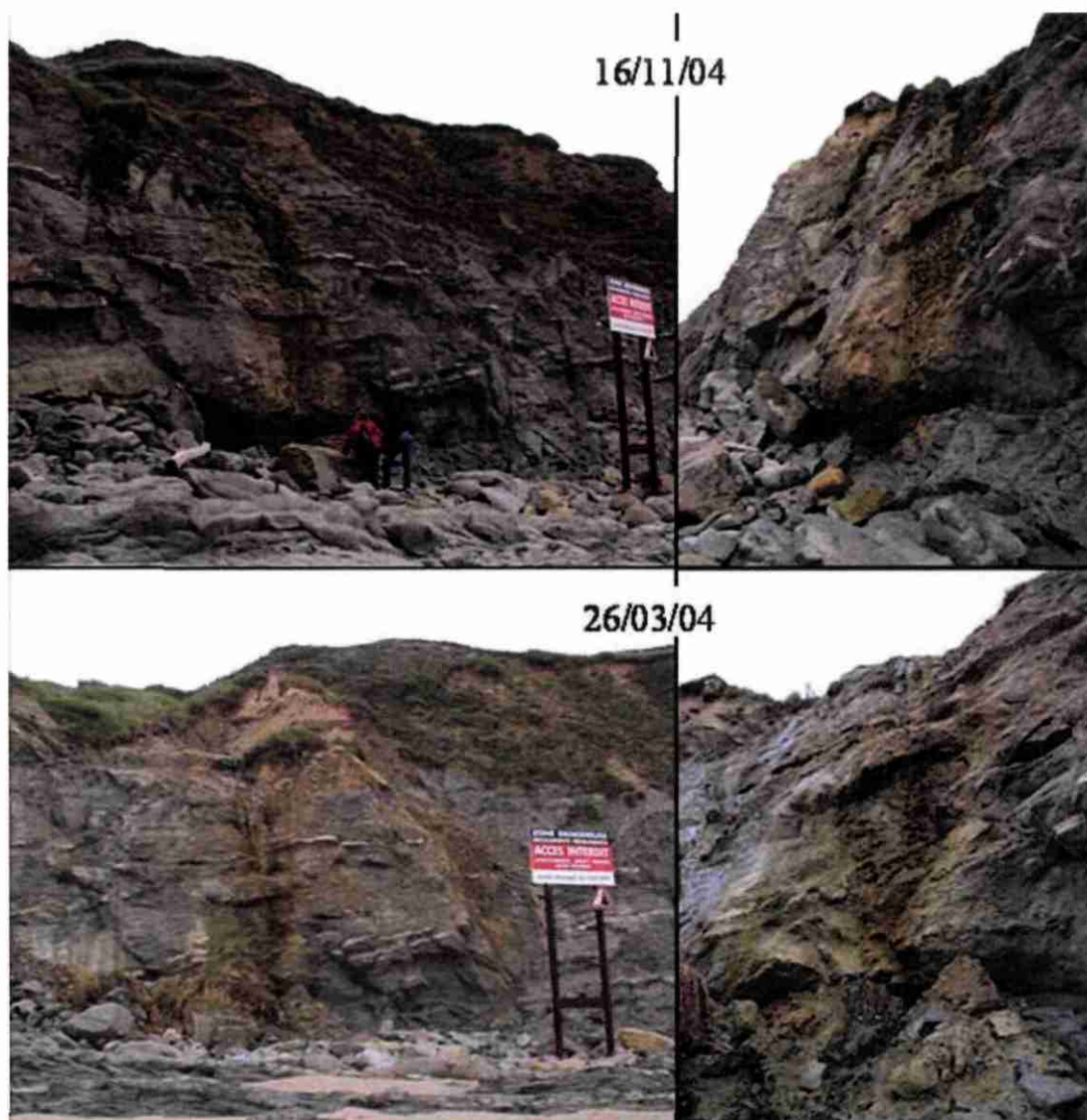


Figure 44 : Venue d'eau d'Illbarritz. Comparatif des photos de mars et novembre 2004 : un éboulement s'est produit dans cette période

L'eau est un facteur prépondérant dans les phénomènes d'altération du matériau et de mouvements de terrain. Afin de comprendre dans quelle proportion et comment l'eau de la nappe des sables au niveau du golf est susceptible d'accentuer les instabilités, un suivi hydrogéologique complet est effectué. Des mesures physico-chimiques (pH, alcalinité, température et conductivité) sont réalisées *in situ*, en moyenne toutes les trois semaines, ainsi que des prélèvements qui donnent lieu à des mesures de concentration en ions majeurs en laboratoire (laboratoire de l'EGID, Université Bordeaux 3). Les mesures ont été effectuées pour la plupart au pied de la cascade,

l'accès par le golf étant limité ; seule une mesure a été réalisée à ce jour en sommet de cascade, à proximité immédiate de l'émergence.

Afin d'évaluer d'éventuelles différences entre une eau « classique » de la nappe plio-quaternaire et celle de Is1, des analyses et mesures physico-chimiques ont été opérées sur des venues d'eau, Is2-3, provenant de la nappe des sables sous le camping d'Ilbarritz au sud immédiat de la plage étudiée, à 500 m de Is1 (Figure 45 et Figure 46). Néanmoins des pollutions anthropiques liées aux activités du camping sont inévitables, mais on peut penser quelles sont moindres en période hivernale durant laquelle le camping est fermé.

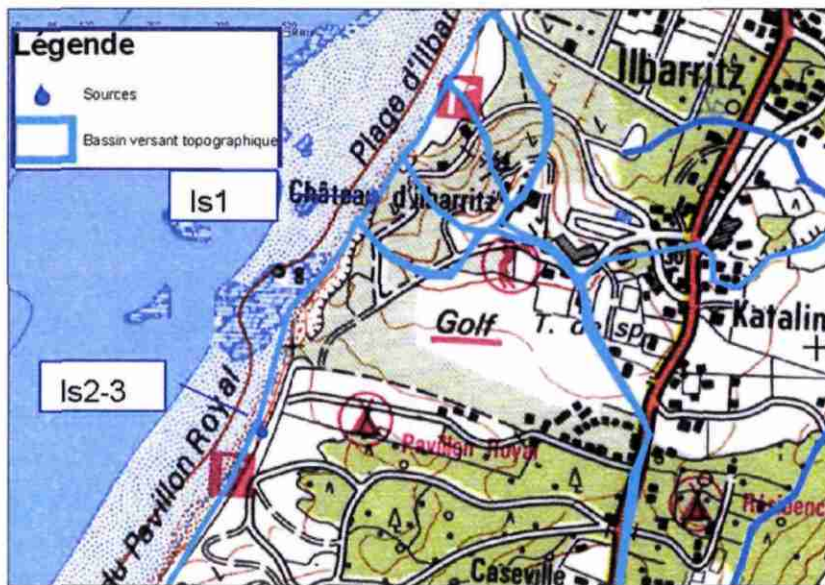


Figure 45 : Localisation des sources Is1 et Is2-3 et leur bassin versant topographique. Il est important de noter que le bassin versant topographique peut être très différent du bassin versant hydrogéologique (fond cartographique : © SCAN25 IGN BD CARTHAGE)

**Remarque :** Les deux sources Is1 et Is2-3 n'appartiennent pas au même bassin versant topographique. Mais en faisant l'hypothèse qu'elles appartiennent au même bassin versant hydrogéologique, les deux sources étant distantes de 500 m, le gradient hydraulique de Is1 vers Is2-3 est de 0,014 ( $\Delta H$  : dénivelé (en m) ;  $l$  : longueur de

parcours (m), gradient hydraulique :  $i = \frac{\Delta H}{l} = \frac{7}{500} = 14\text{‰}$  ), soit une pente de  $0,8^\circ$

vers le sud. Cette pente est très élevée pour une nappe libre (habituellement le gradient hydraulique d'une nappe libre est d'environ 4‰ ; celui d'une nappe captive est plus faible, de l'ordre de 1‰). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette pente hydraulique :

- les deux sources n'appartiennent pas au même bassin versant hydrogéologique,

- Is1 est en relation avec un autre bassin naturel, si on fait l'hypothèse que la direction de pendage des marnes est constant vers l'est-sud-est, et que celui-ci détermine la géométrie du mur de l'aquifère, Is1 appartient probablement au bassin de Mouriscot ;
  - Is1 est uniquement lié aux activités et aux arrosages fréquents du golf (peu probable étant donné que la plus grande surface du golf appartient au bassin versant topographique de Is2-3 – et étant donnée la densité de la pelouse du green, le ruissellement doit être très important, voir dominant devant l'infiltration).
- les deux sources appartiennent au même bassin et les apports en eaux liées à l'activité du golf sont suffisamment importants pour alimenter Is1 en créant un « bourrelet » au niveau du golf.



Figure 46 : Venue d'eau émergent de la nappe des sables plio-quaternaires (novembre 2004))

D'autres points d'eau à proximité de ces deux sources sont répertoriés dans la BSS, et on s'intéressera en particulier aux points notés sur la Figure 47 pour lesquels des données physico-chimiques sont disponibles.

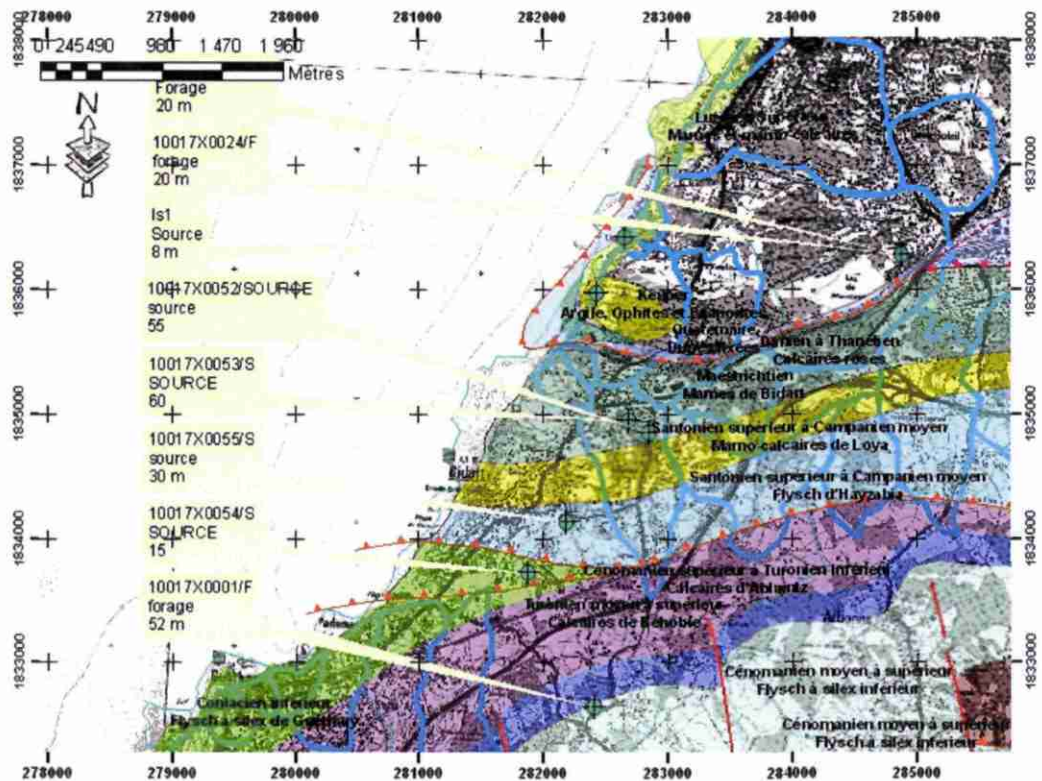


Figure 47 : Points d'eau émergeant du plio-quadernaire à proximité des sources étudiées appartenant au bassin versant de l'Adour. Dans l'ordre sont donnés l'identité du point d'eau, le type d'arrivée d'eau, et l'altitude (attention, dans le cas des forages, c'est l'altitude du terrain qui est donné et non le niveau de la nappe ; fond cartographique : ©SCAN25 IGN ; Données BSS, extraction de mars 2004 ; géologie du substratum (Razin, 1989)

Au point de vue géologique, les sources situées au sud du plateau Bellevue ont pour substratum les flyschs à silex crétacé ou les altérites qui en sont issues (Figure 47) ; au nord du plateau, ce sont les marnes et marno-calcaires de l'Oligocène et de l'Éocène qui forment le mur de l'aquifère. Par ailleurs la présence de gypse est probable : le golf est à moins d'un kilomètre au Nord d'un chevauchement à vergence Sud caractérisé par la présence de gypse qui affleure par ailleurs au niveau du Pavillon Royal.

### 3.3.2. Analyses physico-chimiques

#### a) Résultats des mesures in situ

L'eau de la source du golf d'Illbarritz Is1 se particularise par une conductivité singulièrement élevée pour une eau de nappe des sables (supérieure en général à 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ; Tableau 20). Son pH est basique (8,1 en moyenne) et son alcalinité de 442 mg/l de  $\text{HCO}_3^-$  en moyenne. La température est celle de l'air ambiant (on rappelle que la mesure est effectuée en bas de la cascade excepté pour un échantillon pour lequel la mesure a été réalisée à proximité de l'émergence).

	nombre de valeurs	moyenne	écart type	Coefficient de variation (C.V.)
Alcalinité (mg/l)	8 (7)	442,6 (428,1)	46,8 (28,7)	11% (7%)
pH	7 (6)	8,1 (8,2)	0,3 (0,2)	3% (2%)
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	8 (7)	1192,5 (1162,0)	228,6 (228,6)	19% (20%)
Température de l'eau	8 (7)	8,9 (9,0)	1,6 (1,7)	18% (19%)

Tableau 20 : Paramètres physico-chimiques moyens de l'eau de la venue d'eau Is1. Sur la première ligne sont présentés les paramètres statistiques calculés à partir de tous les échantillons; sur la seconde ligne, entre parenthèse sont présentés ceux calculés à part

On note des différences entre les paramètres physico-chimiques de l'eau selon qu'elle est prélevée en bas de la cascade ou à proximité de l'émergence (Tableau 21 et Tableau 22). De l'émergence au bas de la cascade, on constate la diminution de la concentration en bicarbonates de près de 80 mg/l, de la conductivité de 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ; la température chute de 1,2°C. D'autre part, le pH augmente de 0,8 unités.

Lieu du prélèvement	N°	Date du prélèvement	Heure du prélèvement	Alcalinité (mg/l)	pH	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Température de l'eau (°C)
Haut de cascade	8	jeudi, mars 03, 2005	15h21	544	7,6	1406	8,2
Bas de cascade	7	jeudi, mars 03, 2005	14h49	466	8,4	1325	7,0

Tableau 21 : Propriétés physico-chimiques de l'eau de la venue d'eau Is1 à deux endroits de prélèvement différents (bas et haut de la cascade) le même jour (03/03/2005) à 30 minutes d'intervalle.

L'eau de la source Is2-3 (Tableau 22), sous le camping du Pavillon Royal est moins conductrice (570  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en moyenne) que l'eau de Is1. Son pH est plus acide avec 6,5 en moyenne et sa teneur en bicarbonates plus faible avec 182 mg/l en moyenne. La

température de l'eau est élevée avec 15,5°C en moyenne de novembre 2004 à mars 2005 (6 mois) ; on remarque qu'elle décroît régulièrement sur cette période passant de 15,9°C à 14,7°C, mais la dernière mesure du 31 mars 2005 à 15,2°C semble montrer qu'une remontée de la température s'amorce (Figure 48). D'autre part, la température moyenne mensuelle atmosphérique de Biarritz calculée sur les 48 dernières années (2004 – 1956) est de 13,8°C (données Météofrance, 2004). Mais la température moyenne annuelle atmosphérique de Biarritz augmente régulièrement depuis cette date de quasiment 0,03°C par an et a atteint un maximum en 1997 avec 15,2°C (Figure 49). En 2004, la température moyenne était de 14,1°C et la moyenne sur les dix dernières années (1994-2004) est de 14,5°C.

	nombre de valeurs	de moyenne	écart type	Coefficient de variation (C.V.)
Alcalinité (mg/l)	8	181,8	27,6	15%
pH	8	6,5	0,1	2%
Conductivité (µS/cm)	8	570,0	170,0	30%
Température de l'eau	8	15,5	0,4	2%

Tableau 22 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la source Is2-3

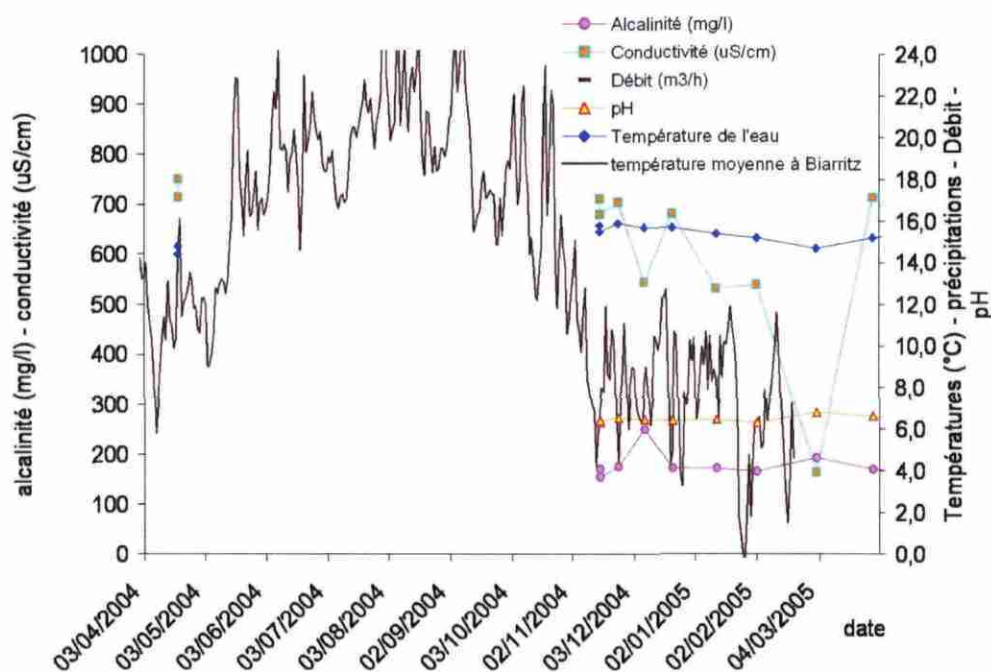


Figure 48 : Evolution des caractéristiques physico-chimiques de la source Is2-3

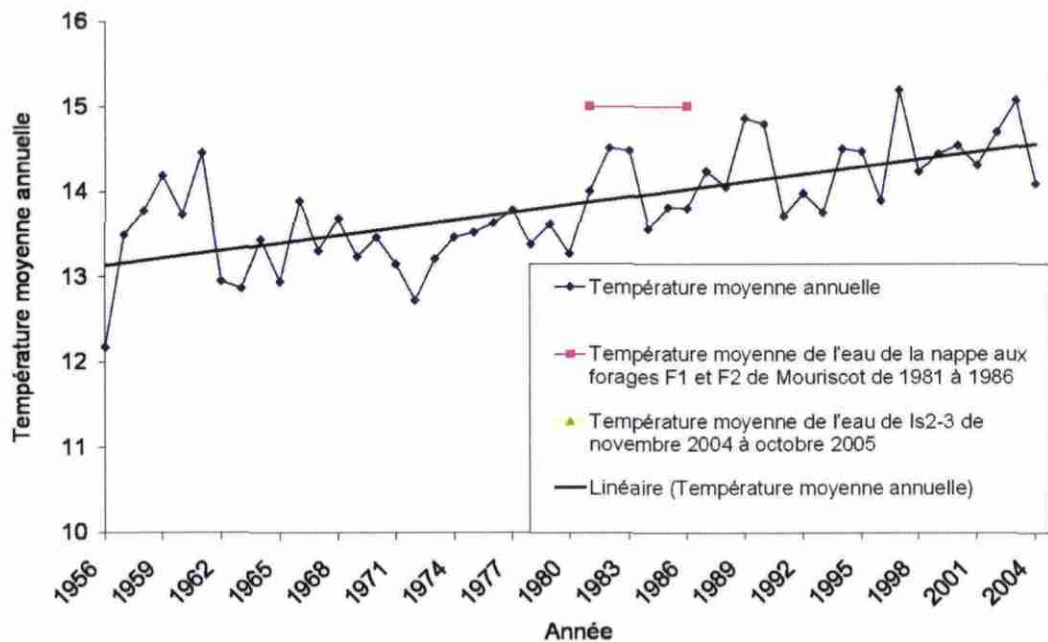


Figure 49 : Evolution de la température moyenne annuelle à Biarritz de 1956 à 2004 (données météo-france 2005)

Les forages 10017X0056/F1 et 10017X0024/F2 situés à moins de 200 m du lac Mouriscot ont été régulièrement suivis de 1981 à 1986. La température moyenne de 1981 à 1986 de l'eau est de 15°C. La température atmosphérique moyenne annuelle la plus élevée sur cette période est 14,5°C en 1982, et sur cette période la moyenne est de 14°C.

La température de l'eau semble être systématique supérieure à la température atmosphérique moyenne annuelle d'au moins 1°C.

Sur cette même période (1981-1986), dans les forages près de Mouriscot, l'alcalinité moyenne était de 265 mg/l, la conductivité de 567 $\mu$ S/cm et le pH moyen de 6,9. Ces caractéristiques sont similaires à celles de l'eau de ls2-3, seule l'alcalinité est légèrement plus élevée.

### **b) Concentrations en ions majeurs**

Les concentrations en ions majeurs montrent que les sources Is1 et Is2-3 et les forages F1 et F2 ont le même faciès bicarbonaté à chloruré calcique (Figure 50, Tableau 23 et Tableau 24). La proximité de la mer peut néanmoins induire un biais en introduisant des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans l'eau prélevée à l'exutoire sans que ceux-ci ne soient représentatifs de l'eau de l'aquifère.

Néanmoins, on constate que les concentrations en ions majeurs de la source Is1 sont deux fois supérieures à celles de la source Is2-3 ou encore de l'eau des forages (Figure 50). La première a une minéralisation totale supérieure à 1000 mg/l alors que celle des secondes est proche de 600 mg/l.

La teneur en Chlorure est supérieure dans les cas de Is1 et Is2-3 à celle en sodium et potassium ; le surplus de chlorure est lié :

- à une combinaison du chlore autrement que dans la forme NaCl ou KCl, compositions classiques des sels de mer. Les chlorures peuvent être d'origine anthropique (eaux vannes, eaux ménagères, polluants agricoles – pesticides en particulier – mais aussi naturelle, libérés par l'altération de certaines roches évaporitiques,
- ce phénomène peut également être expliqué par un déficit en  $\text{Na}^+$  lié à l'absorption par les argiles (les sables plio-quaternaires présentent des niveaux argileux). Cela supposerait l'existence de minéraux à fort potentiel d'échange comme les illites ou les smectites.
- à l'erreur de mesure de l'analyseur. Afin de déterminer la barre d'erreur sur les analyses de concentration en ions majeurs, un test simple est effectué : l'eau d'une même source est prélevée en grande quantité dans différentes fioles à un temps  $t_0$ . Cette eau est par la suite analysée à chaque nouvelle série d'analyse ( $t_0+dt$  ;  $t_1$  ;  $t_2$  ; ...) afin de mesurer l'erreur liée au temps de conservation de l'échantillon avant analyse et l'erreur liée au changement d'éluant et au vieillissement de la colonne de mesure. D'autre part, à chaque passage, plusieurs échantillons de cette eau sont passés afin de mesurer l'erreur de répétabilité.

La présence de nitrates (3,34 mg/l en moyenne pour Is1 et 22,31 mg/l pour Is2-3), suggère une pollution anthropique (arrosage et engrais).

La teneur en sulfate, relativement importante dans certains prélèvements, peut être expliquée par la dissolution de gypse dont la présence ne peut être exclue à proximité du golf (c.f. 3.3.1 Présentation)

Le calcul de l'indice de saturation (Figure 51) montre que l'eau de Is1 est sursaturée en minéraux présents dans le calcaire (calcite, dolomie, aragonite), alors que l'eau des autres sources proches (Is2-3 et les forages de Mouriscot) est saturée à sous-saturée en ces minéraux. De plus l'eau de Is1 est légèrement sous-saturée en gypse et en anhydrite ce qui laisse supposer un contact de l'eau avec le gypse.

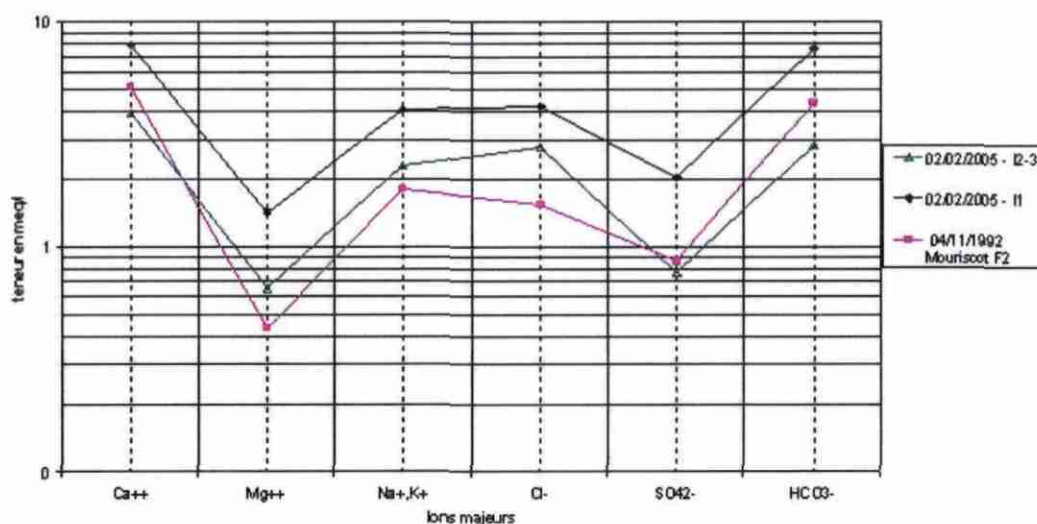


Figure 50 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff pour les sources I1, I2-3 et le forage F2 de Mouriscot. Ces sources ont un faciès bicarbonaté à chloruré alcalino-terreux.

teneur en mg/l	nombre de valeurs	moyenne	écart type	Coefficient de variation (C.V.)
Ca <sup>2+</sup>	7	182,08	13,39	7%
Mg <sup>2+</sup>	7	16,05	1,24	8%
Na <sup>+</sup>	7	93,55	11,96	13%
K <sup>+</sup>	7	11,79	0,55	5%
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7	446,00	49,11	11%
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7	103,04	14,58	14%
Cl <sup>-</sup>	7	167,00	34,73	21%
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7	3,34	1,96	58%
F <sup>-</sup>	7	1,15	2,75	238%

Tableau 23 : Concentrations moyennes en ions majeurs de la source I1

teneur en mg/l	nombre de valeurs	moyenne	écart type	Coefficient de variation (C.V.)
Ca <sup>2+</sup>	6	95,90	27,24	28%
Mg <sup>2+</sup>	6	7,72	0,60	8%
Na <sup>+</sup>	6	53,12	8,09	15%
K <sup>+</sup>	6	4,16	0,50	12%
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6	187,27	29,35	16%
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6	66,49	40,15	60%
Cl <sup>-</sup>	6	104,39	25,75	25%
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6	22,31	7,04	32%
F <sup>-</sup>	6	0,03	0,06	224%

Tableau 24 : Concentrations moyennes en ions majeurs de la source I2-3

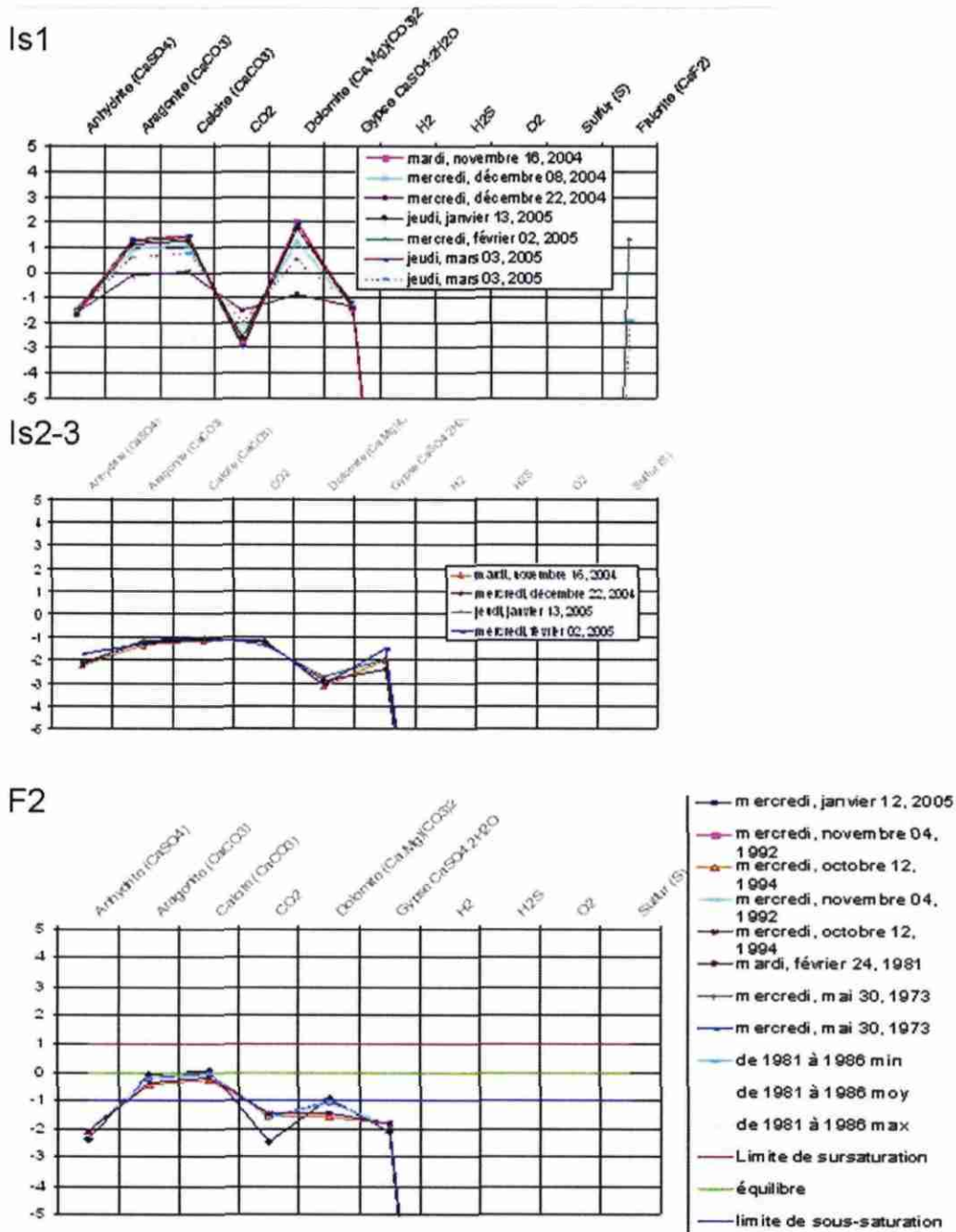


Figure 51 : Indices de saturation de l'eau des sources Is1 (en haut), Is2-3 (au milieu) et Mouriscot (lac et forages ; en bas)

### 3.3.3. Interprétation - discussion

#### a) Evolution de l'eau de la source I1 de l'émergence au pied de la cascade

Dans le sens de l'écoulement de l'eau, du haut vers le bas de la falaise, l'alcalinité diminue de 78 mg/l de  $\text{HCO}_3^-$ , ce qui s'explique par le dégazage de l'eau lors de sa chute ; ce phénomène s'accompagne et explique également l'augmentation du pH. La conductivité diminue alors qu'on pourrait penser *a priori* que le lessivage du chlorure de sodium déposé par les embruns sur la falaise l'aurait fait augmenter, mais la dissolution des sels marins est compensée d'une part par la précipitation de minéraux liée au changement des caractéristiques physiques de l'eau (on rappelle que des dépôts sont observés le long de la cascade) et d'autre part par la dilution de l'eau de la nappe par les eaux météoriques (de fortes averses de grêles ont été observées le 03 mars 2005, jour de la mesure). On observe en effet sur la Figure 52 que la concentration en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  augmente du haut vers le bas de la falaise alors que celle en sulfate en bicarbonate et en calcium diminue, expliquant les dépôts de calcite  $\text{CaCO}_3$  voir de  $\text{CaSO}_4$ . La température diminue lors de la progression de l'eau, s'équilibrant avec la température atmosphérique.

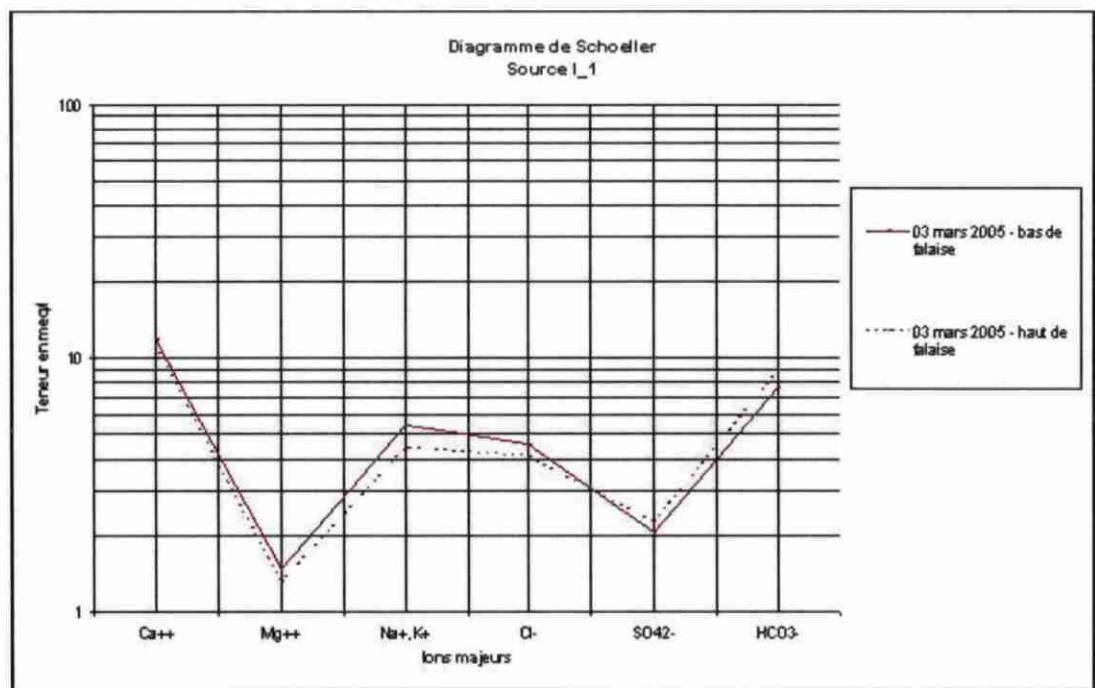


Figure 52 : Diagramme de Schoeller - Comparatif des concentrations en ions majeurs en eau et en bas de la falaise le 03 mars 2005

**b) Comparatif avec les données recueillies sur l'ensemble de la nappe plio-quadernaire ou alluviale à Bidart**

Le système d'information pour la gestion des eaux souterraines (SIGES<sup>5</sup>) situe Ilbarritz dans le système hydrogéologique de l'Adour (système 348). Ce système correspond aux alluvions de l'Adour et de ses affluents (Figure 53). Il intègre les terrasses alluviales les plus récentes (Würm et Riss : Fw, Fx, Fy, Fz) en continuité hydraulique. Ses limites coïncident grossièrement à l'axe de la vallée en général inondable. Classiquement, cette eau est bicarbonatée calcique, mais localement elle présente un faciès chloruré sodique lié à un substratum salifère (région de Dax). Dans le secteur de Biarritz et Anglet, on observe parfois une salinisation excessive suggérant soit la présence d'un massif d'évaporite, ou un captage dans le biseau salé (SIGES, 2005).

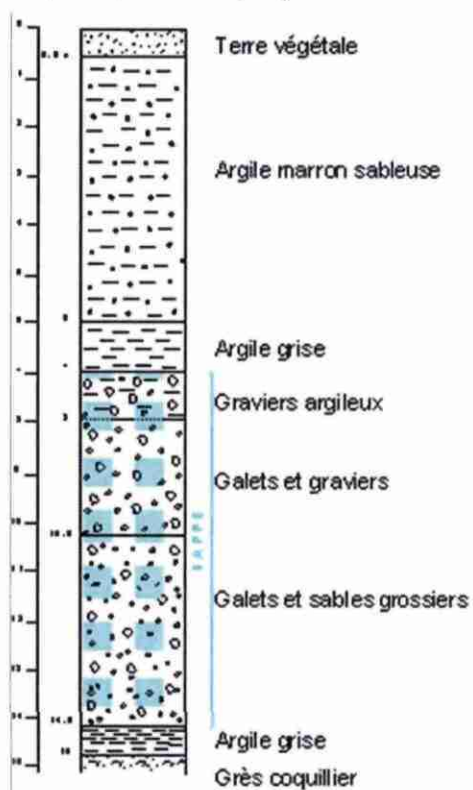


Figure 53 : Coupe géologique de l'aquifère alluvial de l'Adour à Bidart (SIGES, 2005)

Les caractéristiques générales de l'eau de la source Is1 sont peu conformes à celles obtenues grâce aux mesures effectuées sur les eaux de l'aquifère plio-quadernaire (Figure 50) en particulier par sa conductivité et sa minéralisation particulièrement

<sup>5</sup> Serveur couplé à une base de données dont le but est de diffuser et de gérer les informations sur les eaux souterraines ; réalisé et hébergé par le BRGM

élevée, dénotant une forte concentration en ions, particulièrement en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{HCO}_3^-$ .

La proximité de l'océan peut être à l'origine de la forte concentration en NaCl ; en effet, les embruns déposent du NaCl et du KCl sur la falaise et en arrière, sur la pelouse du golf ou encore sur celle du camping. Ces ions peuvent ensuite pénétrer dans la nappe des sables par percolation de l'eau météorique à travers la végétation recouverte de sel. De plus, au niveau du golf notamment, l'entretien du green doit nécessiter un arrosage important, ce qui accentue le phénomène. L'augmentation en sels de mer se fait également lors du ruissellement le long de la falaise dans une moindre mesure, la hauteur de la falaise étant relativement faible (environ 7 m au droit de la cascade Is1). On notera que la présence de sel NaCl augmente la solubilité du sulfate et du calcium.

La concentration plus élevée en bicarbonates et en calcium dénote une dissolution plus importante de minéraux  $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$ . Le pouvoir dissolutif d'une eau augmente avec la diminution de son pH ou avec l'augmentation de son temps de séjour ; or ici, le pH de Is2-3 est plus acide que celui de Is1, mais la mesure n'étant pas faite à l'exutoire de Is1, l'eau a le temps de dégazer et le pH d'augmenter. Le temps de séjour de l'eau émergent à Is1 est peut être plus long que celui de Is2-3, ce qui irait dans le sens de deux bassins versants hydrogéologiques différents. Mais la forte teneur en  $\text{Ca}^{++}$  peut également être expliquée par la présence de gypse.

De plus, les sables plio-quadernaires sont caractérisés par des niveaux à tourbes (anciennes tourbières) et on en observe un en particulier au niveau de Is2-3 et le Lac Mouriscot est une tourbière. L'exposition à l'air de la tourbe entraîne sa décomposition qui contribue à l'émission de  $\text{CO}_2$ . L'eau de Is2-3 est ainsi probablement plus acide que celle émergent à Is1 (la tourbe n'apparaissant que dans les bassins – Is1 est sur une butte topographique). Ceci va dans le sens de l'hypothèse de deux bassins versants distincts.

### 3.3.4. Perspectives

En premier lieu, le suivi hydrogéologique sera continué afin de déterminer les caractéristiques de la nappe sur au moins une saison complète. Le pas de temps des mesures de 3 semaines est adapté aux faibles variations des paramètres physico-chimiques observées jusqu'alors. Cependant un suivi journalier sur une courte période (1 semaine), en saison pluvieuse de préférence, permettrait de déterminer un temps de réponse aux précipitations.

En complément de l'étude en cours, une analyse du taux de  $\text{CO}_2$  dans le sol à l'aide d'une sonde est envisagée. Elle permettra d'évaluer le potentiel agressif de l'eau.

Enfin, la détermination de l'écoulement pourrait être obtenue par un réseau de piézomètres.

### 3.4. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

#### 3.4.1. Principaux types

D'après Chauvin et Largillier (2000a), la falaise d'Ilbarritz semble reculer de façon parallèle à la pente, c'est-à-dire qu'un même recul est observé en pied qu'en tête ; d'autre part, le recul se fait de façon parallèle au trait de côte. Divers phénomènes naturels sont à l'origine de cette érosion :

- **les éboulements** : des blocs centimétriques à décimétriques se détachent fréquemment de la falaise et sont ensuite évacués par la mer (Figure 54),



Figure 54 : Eboulements à Ilbarritz (novembre 2004, photo J. Riss)

- **les glissements-coulées** : des pans de la falaise de marnes glissent et, selon la teneur en eau du matériau mobilisé, ils peuvent évoluer en coulées de boue dont la propagation est limitée par la topographie sub-horizontale de la plage (Figure 55 et point E, Figure 37). Ces glissements, une fois produits, sont réactivés après chaque marée haute suite au sapement du pied de glissement par la mer et/ou par l'augmentation de la teneur en eau liée à l'immersion du pied (Figure 56). Les

sables plio-quaternaires sus-jacents sont emportés par le glissement. Les matériaux fins sont remobilisés ultérieurement par l'érosion hydrique (Figure 57).



Figure 55 : Glissement-coulée (08/12/04)



Figure 56 : Submersion du pied du glissement situé au sud du panneau 3 (glissement visible sur la Figure 55 ; 12 janvier 2005, coefficient de marée : 100 ; hauteur : 4,27 m [données SHOM 2005])

- **les ravinements** : ils s'observent sur les marnes et en particulier au niveau d'anciens glissements (Figure 57, glissement D, Figure 37), ainsi que dans les sables plio-quadernaires où ils sont à l'origine d'une forte érosion régressive.

### 3.4.2. Facteurs d'érosion et d'altération

Dans ce paragraphe, l'altération liée au contexte hydrogéologique ne sera pas traitée ; ce sujet est en effet traité dans le chapitre hydrogéologie.

#### a) L'érosion hydrique

Sous ce terme sont regroupées les formes d'érosion par détachement puis transport des particules du sol par action de l'eau. L'érosion océanique en fait partie mais sera traitée dans un paragraphe à part entière.

Sur le site d'Ilbarritz, les apports d'eau sont générés par les précipitations, la nappe plio-quadernaire, l'exploitation anthropique des terrains en amont de la falaise (en particulier le golf d'Ilbarritz dont le green nécessite un entretien et un arrosage régulier) et la mer en pied de falaise principalement, mais dont l'action peut s'étendre dans des conditions météorologiques et de marnages extrêmes. L'action de la mer est traitée dans un paragraphe à part entière.

En amont d'un versant se développent principalement le ruissellement<sup>6</sup> et la battance<sup>7</sup>. Le long de la pente, des ravines<sup>8</sup> apparaissent et l'érosion est importante. Les particules sont transportées jusqu'au pied de la falaise où la mer vient les déblayer à chaque marée haute.

L'importance du ruissellement est gouvernée par la hauteur ou l'intensité des pluies, l'humidité du sol préalable à l'averse, la surface du bassin versant drainé par un même

---

<sup>6</sup> Le ruissellement est expliqué par trois théories :

- Lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration des sols (Horton, 1945)
- Lorsque l'espace poreux est saturé
- Lorsque la surface du sol est saturée au fond de la vallée est suffisant

<sup>7</sup> Lorsque les gouttes de pluies tombent sur le sol, le choc génère la projection des particules les plus fines. Celles-ci s'agglomèrent ainsi sur la surface et forment une croûte superficielle imperméable en séchant. Ce phénomène est appelé battance. Il favorise le ruissellement.

<sup>8</sup> Lorsque la pente augmente, le ruissellement a tendance à s'accumuler et s'organiser. Si le débit augmente, les particules sont arrachées et transportées par l'eau créant une entaille à la surface du sol. Une ravine s'est formée. Elle évolue alors de façon régressive par frottement des particules au fond de la rigole (abrasion) et effondrement des berges.

chenal, l'état de surface du sol (végétation, structure : organisation pelliculaire, fissuration, orifices d'origine biologique, rugosité), l'inclinaison et la longueur de la pente (Eimberk, 1990 ; Poesen et Bryan, 2004).

### ***b) Erosion océanique***

Les falaises de la plage interdite d'Ilbarritz sont des falaises vives (battues par l'océan). L'action érosive des vagues sur une côte résulte des facteurs suivants :

- corrosion par le sable et graviers transportés,
- pression de l'eau contre les parois (elle peut atteindre 30 t/m<sup>2</sup>),
- succion lorsque les vagues se retirent (déplacement de blocs de plusieurs milliers de tonnes),
- vibrations par suite de chocs successifs (phénomènes de résonance).

La puissance des vagues contre la falaise dépend en partie de la morphologie du platier, ce dernier agit comme un brisant car les vagues déferlent dès qu'elles le rencontrent. De nature rocheuse, il présente une topographie irrégulière sur laquelle la force des vagues se dissipe. A l'inverse, un platier sablonneux forme une topographie lisse et les vagues ne sont que peu atténuées. Lors des forts coefficients, la dissipation de la houle est moindre sur le platier.

La plage d'Ilbarritz est souvent dégraissée en période hivernale à la suite de forts coefficients de marée, l'action de la houle sur la falaise est alors moindre. Par contre, lors de l'engraissage des plages, la force de la houle est entière en arrivant au pied des falaises.

### **3.4.3. Evènements remarquables depuis le début de l'étude**

Deux glissements majeurs font l'objet d'observations régulières :

Le premier correspond à la zone D de la Figure 37. Lors de la visite de terrain du 26 mars 2004 (Figure 57), le matériau glissé n'était pas ou peu compacté – le glissement semblait récent. A l'automne 2004, le matériau glissé semble compacté et sensible au ravinement<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Les ravinements, liés à un coefficient de ruissellement, se développent dans la mesure où l'eau des averses ne s'infiltré pas ou peu : la pente dans certaines conditions (de raideur, de longueur, de couverture végétale...), la faible entrave de la couverture végétale à la concentration des filets d'eau, les averses intenses et la faible perméabilité favorisent ce ruissellement.

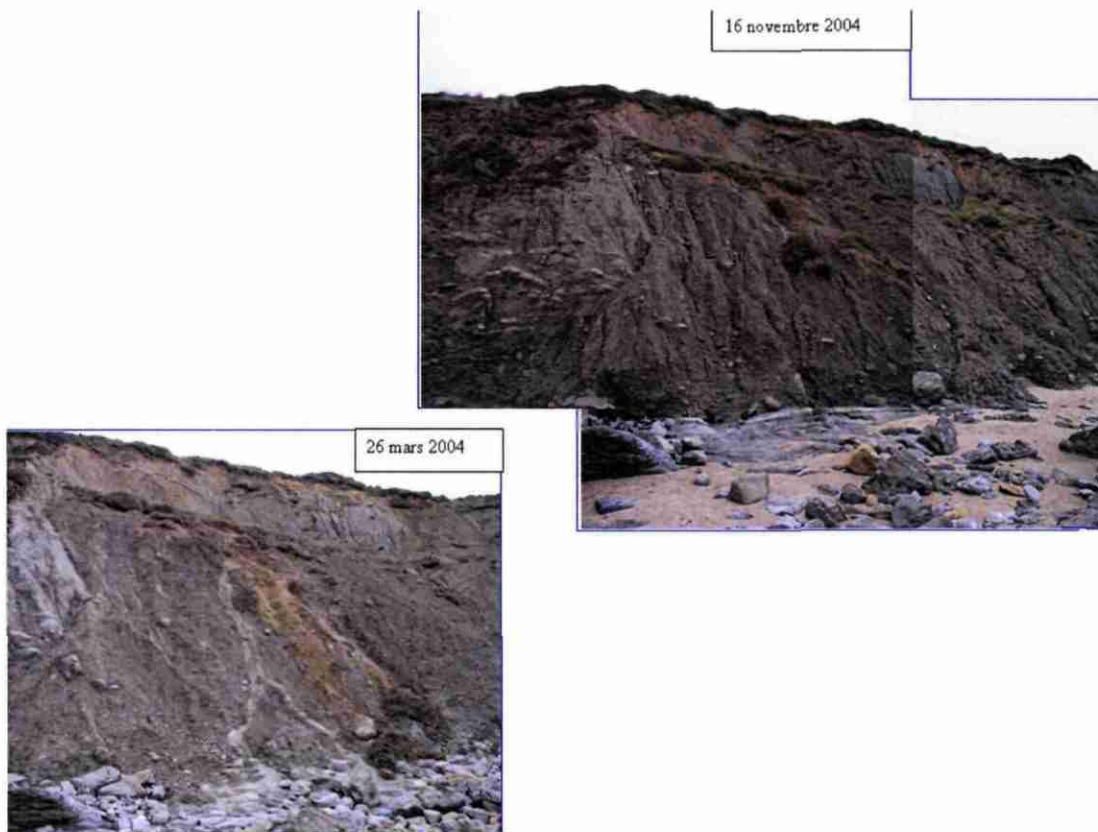


Figure 57 : Glissement D (c.f. Figure 37)

Le second glissement s'est produit entre le 16 et le 25 novembre 2004 (point E sur la Figure 37, Figure 55 et Figure 56). Les conditions climatiques durant cette période sont résumées dans la Figure 58. Cette période a été relativement humide (8 jours de pluies sur 11), mais les précipitations étaient relativement faibles (moins de 1 mm par jour) excepté le 19 novembre 2004 avec 11 mm. Les coefficients de marée ont été relativement faibles. En effet, en période de vives-eaux, les 16 et 26 novembre 2005, les coefficients maximaux étaient de 90 et 80 respectivement, la période intermédiaire étant une période de mortes-eaux, avec un coefficient minimum de 50 (Tableau 25).

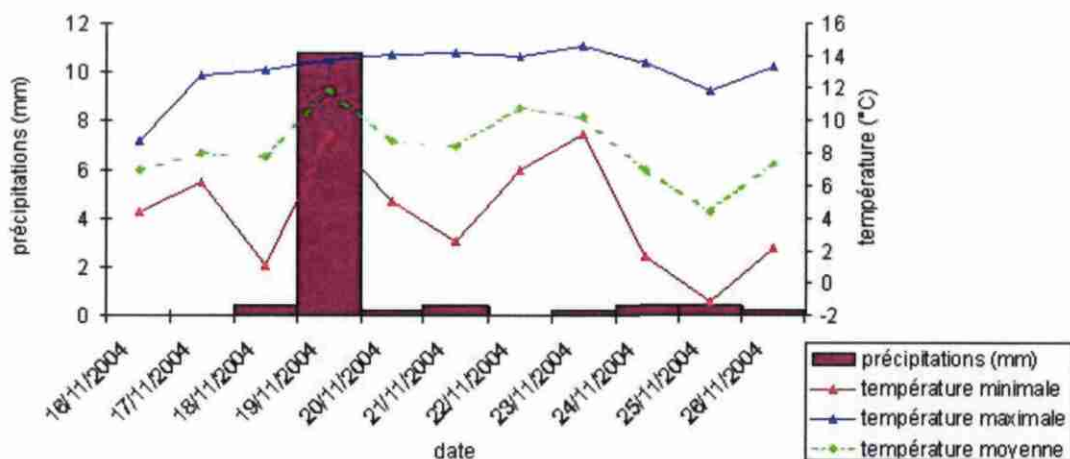


Figure 58 : Précipitations, températures maximales moyennes et minimales à Biarritz du 16 au 26 novembre 2004 (données météoFrance 2004)

		nov-04									
Date		Matin					Après-midi				
		Coeff.	Pleine mer		Basse mer		Coef.	Pleine mer		Basse mer	
heure	hauteur		heure	hauteur	heure	hauteur		heure	hauteur		
mar	16	90	6h35	4,24m	0h19	0,85m	85	19h06	3,91m	12h48	0,74m
mer	17	79	7h31	4,03m	1h11	1,10m	72	20h11	3,62m	13h47	0,98m
jeu	18	66	8h38	3,81m	2h13	1,35m	60	21h31	3,42m	14h55	1,20m
ven	19	55	9h57	3,67m	3h25	1,54m	51	22h57	3,36m	16h13	1,34m
sam	20	50	11h17	3,65m	4h45	1,58m				17h32	1,34m
dim	21	50	0h04	3,43m	6h00	1,49m	52	12h26	3,73m	18h39	1,25m
lun	22	55	1h11	3,57m	7h02	1,34m	59	13h24	3,84m	19h33	1,13m
mar	23	63	1h58	3,73m	7h53	1,17m	67	14h12	3,94m	20h18	1,03m
mer	24	71	2h39	3,87m	8h38	1,03m	74	14h53	4,01m	20h58	0,96m
jeu	25	76	3h15	3,97m	9h19	0,94m	78	15h30	4,04m	21h34	0,93m
ven	26	80	3h48	4,04m	9h57	0,90m	80	16h05	4,04m	22h09	0,94m

Tableau 25 : Coefficients des marées et hauteur d'eau correspondante à Saint-Jean-de-Luz du 16 au 26 novembre 2004 (données SHOM, 2005)

A chaque visite de terrain, le glissement de la falaise d'Illbarritz évolue (Figure 61) : pied de glissement plus ou moins avancé, apparition ou disparition des fentes de tensions (Figure 59), variation de la teneur en eau du matériau, nouvelles coulées, etc... On observe de l'eau (origine inconnue : eau de formation / de mer / de pluie ou

encore d'origine anthropique, Figure 60) qui s'écoule sur les bords du glissement. Il semblerait que ce glissement-coulée soit réactivé après chaque marée suffisamment haute pour immerger son pied (et ainsi ré-augmenter la teneur en eau) ou le déblayer (suppression de la butée ; Figure 56).

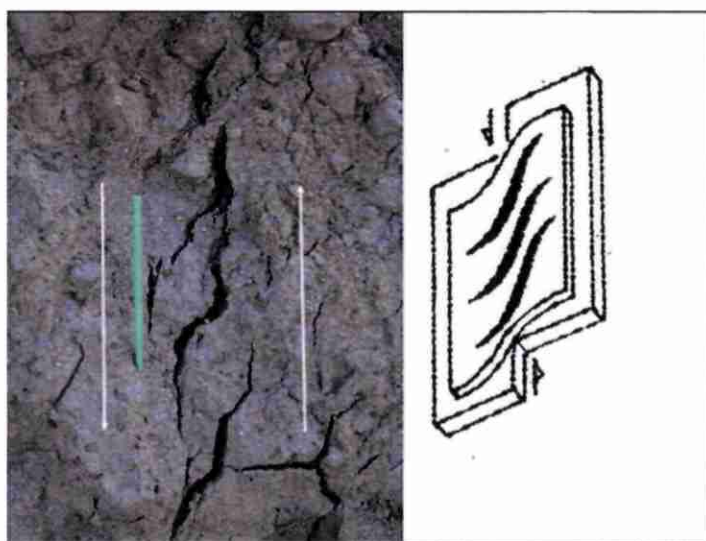


Figure 59 : (a) Sigmoïdes ou fentes de tensions sur le corps de la coulée active (photo J.Riss, novembre 2004) ; (b) : Schéma de principe



Figure 60 : Vue d'eau observée au pied du glissement ( décembre 2004)

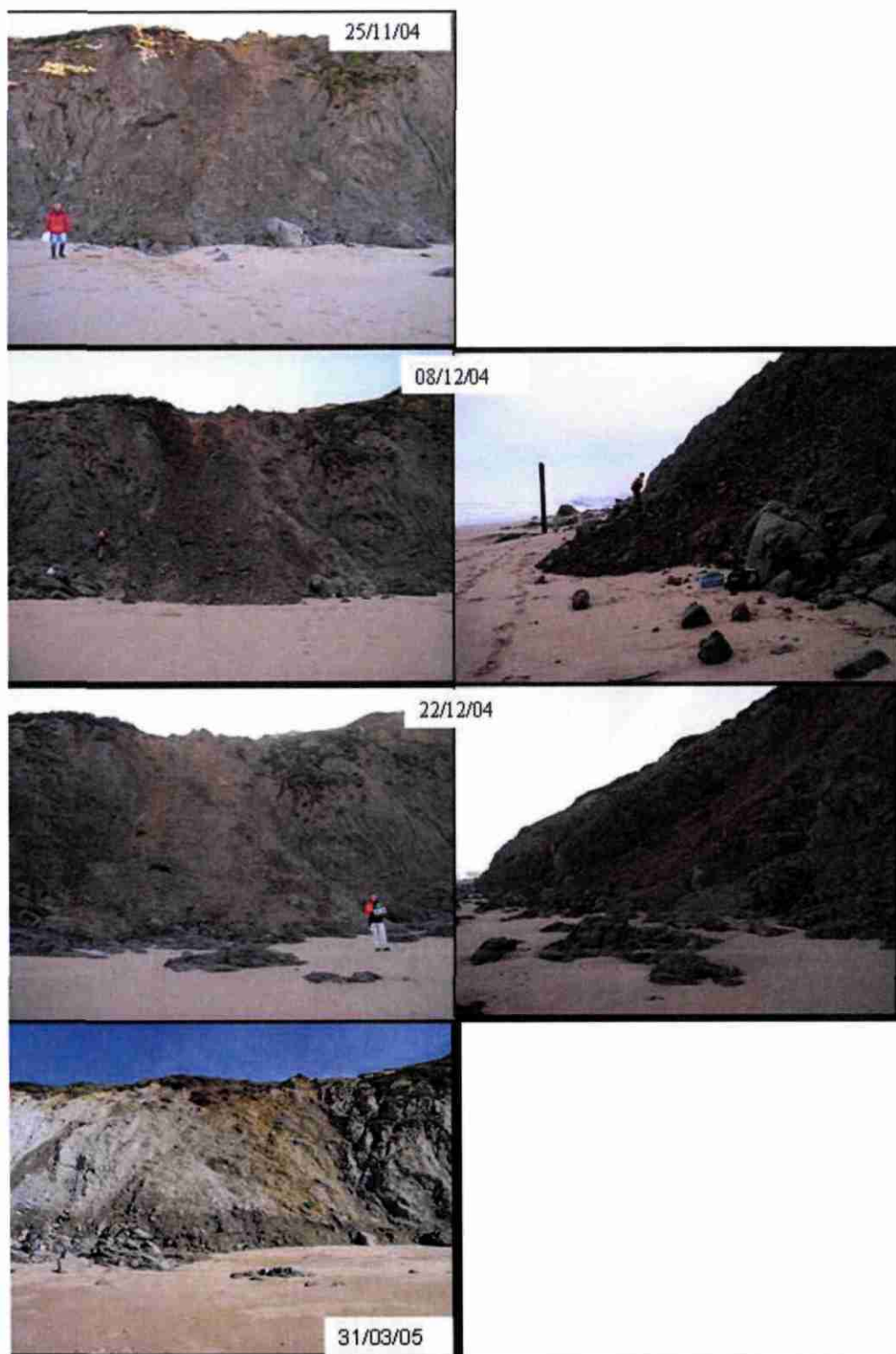


Figure 61 : Vues du glissement-coulée le 26 novembre, le 08 et le 22 décembre 2004

### 3.4.4. Scénarios préliminaires de rupture

Les marnes formant le mur de l'aquifère sableux sont particulièrement vulnérables à l'altération (c.f. paragraphe 3.2.3). L'acidité-alcalinité et le degré d'oxydoréduction des eaux sont des paramètres importants contrôlant l'altération chimique. L'eau pluviale est légèrement acide, tout comme les sols. Ce sont donc deux environnements où dissolution et hydrolyse vont jouer un rôle dominant. Dans le cas de(s) nappe(s) plio-quaternelles :

- si l'on considère l'aspect cinétique des réactions chimiques, une température élevée va les favoriser : l'eau de la nappe superficielle des sables est relativement chaude, ce qui augmente dans un certain sens son pouvoir dissolutif sur les carbonates des marnes,
- d'autre part, la solubilité des gaz diminue avec l'augmentation de la température,
- la création de CO<sub>2</sub> par la dégradation de la tourbe acidifie l'eau et augmente son pouvoir dissolutif,
- le pH de l'eau de mer est de l'ordre de 8 : peu de réactions d'hydrolyse ont donc lieu en milieu sous-marin,
- la proximité de la mer est à l'origine d'une forte concentration en sel qui va augmenter la solubilité d'autres éléments.

Le toit de la falaise marneuse est attaqué par les eaux de la nappe qui agissent par dissolution de la calcite. Une des conséquences probables de ce phénomène est l'éboulement visible sur la Figure 44 au niveau de la cascade (point A, Figure 37) ; le matériau a perdu de la cohérence par dissolution des carbonates. On ne peut négliger de plus l'effet de l'eau qui s'infiltrerait dans les diaclases observées dans les bancs les plus compétents des marnes ; elle dissout le matériau et le fragilise « de l'intérieur ». De plus la dissolution probable de massifs de gypse peut être à l'origine d'effondrement (dolines) et engendrer des infiltrations supplémentaires.

Par son acidité et son pouvoir d'altération, l'eau de la nappe plio-quaternelle est ici un facteur d'altération chimique important. Il est probable qu'elle entraîne la dégradation des propriétés mécaniques des marnes à leur sommet et qu'elle accentue la faiblesse de plans affaiblis par les contraintes tectoniques par dissolution et infiltration rongant le matériau de l'intérieur (Figure 62).

Cette hypothèse d'altération par l'intérieur du massif pourrait ainsi expliquer des mouvements de versant relativement grands, comme celui se trouvant au centre de la plage interdite (glissement D, Figure 37), qui mobilisent une forte épaisseur de matériau, qui n'est pas, *a priori*, atteinte par l'altération océanique (haloclastie principalement) et météorique qui n'est que superficielle. Une fracture tectonique conduit l'eau au sein du massif rocheux, en plus des pressions interstitielles

engendrées au sein de la fracture, l'altération du matériau se développe autour de celle-ci et crée une surface de faiblesse mécanique. L'action érosive des vagues ne serait qu'un facteur accélérant les mouvements par ablation progressive du pied de la falaise (Figure 63 et Figure 64). La falaise d'Illbarritz ne présente que très peu de zones avec un sous-cavage marqué ; l'action de l'océan semble ici secondaire.

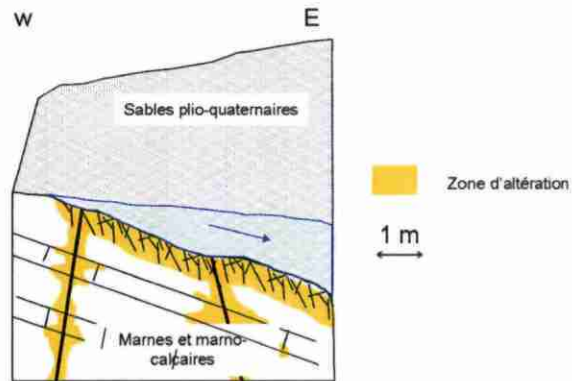


Figure 62 : Schématisation de l'altération du matériau par l'eau de la nappe plio-quaternaire agressive dans une coupe théorique E-W de la falaise

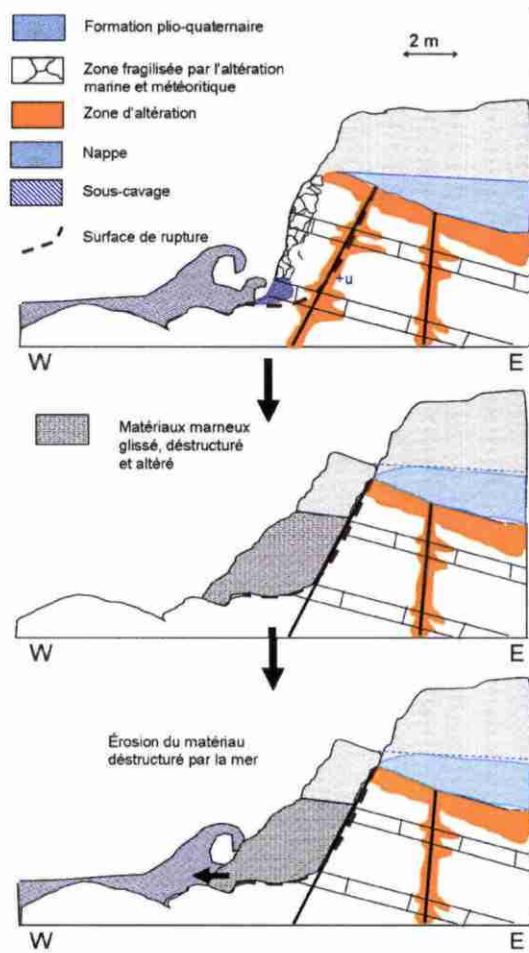


Figure 63 : Schématisation d'un glissement de "grande" ampleur sur les falaises d'Ibarritz d'après la théorie d'altération du massif marneux par les eaux de la nappe plio-quaternaire.

En cas de fortes précipitations, le niveau de la nappe augmente et les pressions interstitielles au sein des fractures connectées à l'aquifère augmentent proportionnellement déstabilisant le massif.

A la suite d'un glissement, le matériau apparaît très déstructuré et des coulées d'eau boueuse sont observables qui pourrait correspondre à la vidange de la nappe à la suite du glissement (Figure 65).

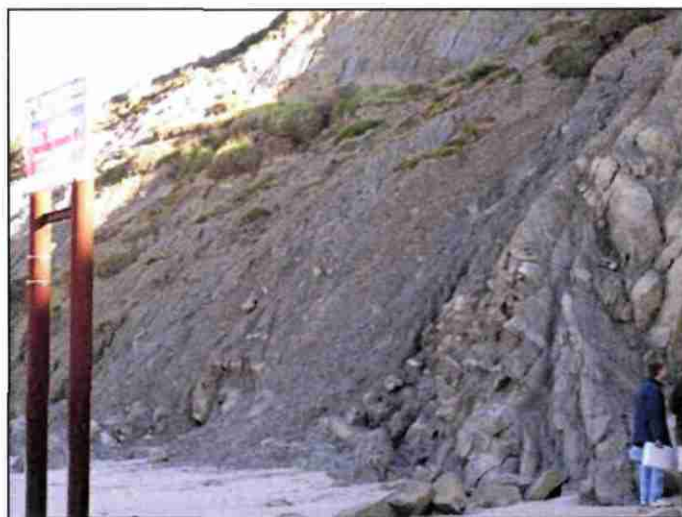


Figure 64 : Glissement de "grande ampleur" (glissement D, Figure 37) à Ibarritz (novembre 2004)

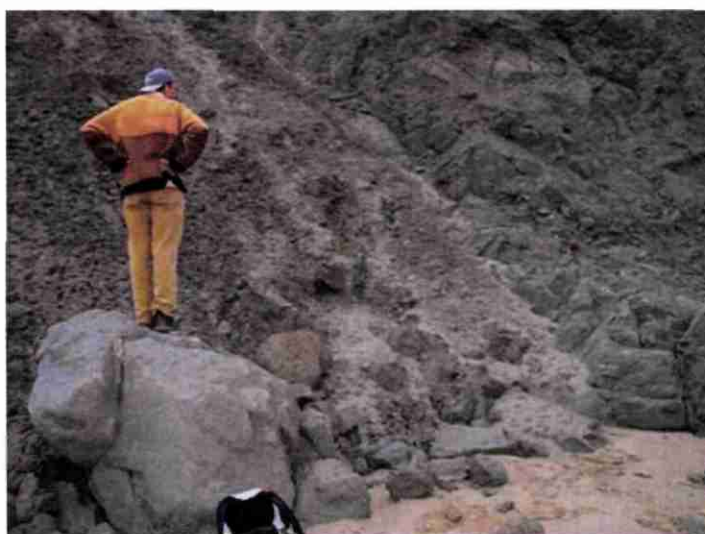


Figure 65 : Coulée de boue sur le flanc d'un glissement (janvier 2004)

Un glissement de l'ampleur de celui observé en D sur la Figure 37 a mobilisé un volume d'environ  $11\,250\text{ m}^3$  (hauteur : 30 m ; longueur : 75 m ; profondeur : 5 m). La niche d'arrachement fait actuellement 6 m de haut, le matériau érodé par la mer correspond à cette lacune, il est d'environ  $2\,250\text{ m}^3$ , soit 20% du matériau mobilisé. Le pied de ce glissement est fréquemment immergé. A chaque immersion, une partie du pied est érodée, le matériau sus-jacent le remplace suite à des mouvements de type solifluxion.

### 3.4.5. Perspectives d'étude

**La quantification de l'érosion est un des objectifs de cette étude.** Pour cela, il faudrait se donner un état initial sur un pan de falaise et déterminer le volume de roche érodée par chutes de blocs, glissements, ou encore ravinements, par unité de temps. La méthode utilisée sera l'analyse d'image : deux photographies prises depuis l'estran à un temps  $t_0$  en utilisant les propriétés de la stéréographie permettront de reconstituer la surface de la falaise et, par comparaison de différentes campagnes de photographies et des différentes surfaces obtenues, le volume de matériau érodé pourra être quantifié.

**Un second axe de recherche a pour sujet l'altération des marnes.** L'état d'altération du massif marneux est différent en fonction de la position géographique du matériau :

- en bas de falaise, le matériau est battu par la mer ;
- le sommet de la falaise est soumis à l'effet de la nappe dans les sables plio-quadernaires sus-jacent,
- La totalité de la falaise est soumise à
  - l'effet des embruns (haloclastie) ;
  - l'effet des précipitations.

A t'on des zones géographiques plus détériorées que d'autres ? En quoi ces zones influent-elles sur la stabilité des pentes ?

Pour répondre à ces questions, le prélèvement d'échantillons à diverses altitudes le long d'une verticale, et le long d'une horizontale est prévu. Sur chaque échantillon seront effectuées les mesures suivantes :

- la calcimétrie : variations de la teneur en  $\text{CaCO}_3$  en fonction de l'altitude. Une perte de  $\text{CaCO}_3$  se traduit au point de vue mécanique par une perte de cohésion du matériau,
- une mesure de porosité : que ce soit par l'augmentation des volumes des vides qui conduit à l'augmentation de la teneur en eau lors de la saturation du matériau ou par la diminution des qualités mécaniques du matériau, l'augmentation de la porosité est néfaste pour la stabilité,
- une mesure de teneur en eau,
- des mesures de caractéristiques mécaniques (soit en laboratoire, soit *in-situ*).

## 4. Conclusion et perspectives

Sur chacun des sites étudiés, la description géologique, hydrogéologique et des phénomènes observés mis en évidence une variabilité des conditions environnementales à l'origine de mouvements de terrain différents, bien que l'altération est, dans les deux cas un facteur aggravant, l'instabilité. Les paramètres mécaniques sont en effet réduits de façon très importante suite à l'altération (exemple de l'angle de frottement interne du matériau : à Guéthary :  $\varphi = 35^\circ$  dans le substratum marno-calcaire compact  $\varphi = 25^\circ$  dans l'altérite ; à Ilbarritz :  $\varphi = 31^\circ$  dans les marnes franches et  $\varphi = 16^\circ$  dans les marnes altérées).

L'altérite de Guéthary est une formation argileuse à sablo-argileuse très sensible à l'eau qui engendre des mouvements de terrain de type glissement circulaire au sein du matériau altéré. La survenue d'un glissement en janvier 2004 a permis d'effectuer des observations et des mesures permettant une meilleure compréhension du phénomène. Plus l'épaisseur de cette altérite est importante, plus l'aléa est fort, le volume disponible augmentant. L'étude des paléoréseaux qui ont occasionnés le développement de l'altération est ainsi un axe de recherche destiné à localiser les zones de plus fort aléa.

L'instabilité des roches formant les falaises de Guéthary se traduit par des mouvements de type éboulement, glissement-coulée et ravinement. Ils semblent liés à une altération plus localisée du matériau – au niveau des discontinuités principalement – accentuée par les circulations de l'eau acide et chaude de la nappe plio-quadernaire sus-jacente. Les mouvements sont plus fréquents qu'à Guéthary mais mobilisent un volume moindre.

Dans les deux cas, l'océan est un facteur aggravant des instabilités : en effet, en supprimant la butée des matériaux en place ou déjà glissés par érosion marine, il participe à la déstabilisation mécanique des falaises.

Les études détaillées de ces deux sites pilotes ont permis de mettre en évidence l'importance du facteur altération dans les mouvements de terrain côtiers ainsi que celle des circulations hydrogéologiques, orientant ainsi la recherche vers ces nouveaux axes.



## 5. Valorisation scientifique

Les études réalisées depuis mars 2004 ont donné lieu à des publications, des communications orales et écrites dans des congrès.

- Octobre 2004 : Congrès de l'Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée non pétrolière (AGAP) à Lyon :

**Borie M., Marache A., Frappa M., Lataste J.-F., Riss J., Fabre Richard,** 2004, Application de la méthode électrique à l'étude de la stabilité de la falaise rocheuse des Viviers-Basques (64, Urrugne) : détermination de la structure du massif rocheux et des conditions hydrauliques, Journées AGAP Qualité, EAU ET GÉOPHYSIQUE, Ressource, environnement, risque, 27 et 28 octobre 2004, pp.34-37

- Mai 2005 : EUROCK (Brno, République Tchèque) :

**Borie M., Marache A., Riss J., Fabre R., Gentier S.,** 2005, Analysis of sliding failure of the Viviers-Basques (France) jointed rock cliff, 6 p.

**Winckel A., Petitjean J., Borie M., Mallet C., Aubié S.,** 2004, Etat des connaissances hydrologiques et hydrogéologiques de la côte basque. BRGM/RP-53372-FR, 112 p., 45 illustrations, 5 annexes.



## Bibliographie

- Alexandre A., Mallet C., Dubreuilh J., 2003, Etude de l'érosion de la Côte Basque. Synthèse bibliographique. Rapport BRGM/RP-52370-FR. 125 p., 32 fig., 4 tab., 30 photos., 3 ann.
- Atterberg A., 1911, Lerornas förhållande till vatten, deras plasticitetsgränser och plasticitetsgrader (Le comportement des argiles avec l'eau, leurs limites et degré de plasticité). K. Lantbruksakad Handl. O. Ts., vol. 50, n°2, pp.132-158
- Avenard, J.-M., 1990, Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion). *Cahiers ORSTOM Série Pédologie*, 25, 119-129.
- Beaulieu J., 1979, Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyen du bleu de méthylène. Thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 133 p.
- Benech P., 1997, Etude des falaises argileuses instables des lacets d'Itsasoan, de la jetée des alcyons, de la plage d'Harotzen Costa. OPL/97.025, Direction Départementale de l'Equipement des Pyrénées Atlantique, 10 p.
- Bodou P., 1972, Etude de la tectonique de la Côte Basque entre Hendaye et Bidart, DES : SCI.NAT. : Strasbourg I
- Borie M., 2004, Analyse des glissements rocheux des Viviers-Basques (64, Urrugne). Rapport de stage de DEA, 5 p.
- Chauvin A. et Largillier J.-F., 2000a, Confortement paysager de la falaise d'Ilbarritz entre les plages d'Ilbarritz et du Pavillon Royal. ANTEA, rapport n°A 18568, 27 p.
- Chauvin A. et Largillier J.-F., 2000b, Etude de la mise en sécurité de la falaise d'Ilbarritz entre les plages d'Ilbarritz et du Pavillon Royal. ANTEA, rapport n°A 19634, 6 p.
- Chauvin A., Largillier J.-F., 1999, Falaises de Parmentia à Bidart (64). Projet de Stabilisation. Etude réalisée par ANTEA pour les Copropriétaires. ANTEA rapport définitif n°A 17246, 8 p.
- Deshayes, L., 2003, Analyse des instabilités de la Côte basque : Recherche de sites d'étude expérimentaux. Rapport de stage de DESS. CDGA, Université Bordeaux 1 et BRGM, 56 p.
- Durand N. et Mallet C., 2004, Analyse du régime météorologique de la Côte Basque. BRGM/RP52955-FR, 57 p, 31 fig, 8 tab.
- Eimberk, M., 1990, Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux. Cahiers ORSTOM.Série Pédologie vol.XXV[1-2], pp. 81-94. INRA-SESCPF-Orleans.
- Falchi S., 1981, Etude sur les falaises de la Côte des Basques à Biarritz. Aspects géologiques et hydrogéologiques. Actions des eaux sur l'évolution de la falaise. D.E.A de Géologie appliquée. Université Bordeaux 1, 36 p.

- Foucault et Raoult, 2000, Dictionnaire de géologie, 5<sup>ème</sup> édition, éd. Dunod, 380 p.
- Genna A., Aubié S., Capdeville JP., 2004a, Synthèse des observations de terrain sur les secteurs des Viviers Basques, de Bidart et de Guéthary, Côte Basque, visite du 14 octobre 2004 – Note BRGM 04 AQI 25, 9 fig., 17 p.
- Genna A., Capdeville J.-P., Mallet C. et Deshayes, L., 2004b, Observatoire de la Côte Aquitaine. Géologie simplifiée de la Côte Basque. BRGM/RP-53258-FR, 43 p. 25 ill.
- Gourry J.C., Mathieu F. et Mathon C., 2004, Caractérisation géophysique d'instabilités de terrain sur le littoral basque. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-53532-FR, 60p, 14 ill, non diffusé.
- IAEG Commission on landslides, 1990, Suggested nomenclature for landslides. Bulletin of the international Association of Engineering Geology, 41, pp.13-16
- Ifremer, 1999, Le domaine marin côtier du Pays Basque (Pyrénées Atlantiques). Carte Morpho-bathymétrique et carte des formations superficielles. Notice explicative, 32 p.
- Kaufman O., Bini A., Tognigni P. et Quinif Y., 1999, Etude microscopique d'une altérite de type fantôme de roche, actes du colloque Karst-99, 12 p.
- Kezdi A., 1974, Handbook of soils mechanics. Vol. I : Soils Physics. Amsterdam, Elsevier Scientific Publ.Co.
- Laugier P., 2002, Contribution à l'analyse des risques naturels en montagne par l'étude géologique et géotechnique de scénarios de mouvements de versants et laves torrentielles. Application à la région de Bourg-Saint-Maurice (Savoie, France), Thèse de l'école des mines de Paris, 333 p.
- Lautrin D., 1989, Utilisation pratique des paramètres de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 160, pp.53-65
- Le Mignon G., 2004, Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France), Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, 158 p.
- Lebret P, Campy M., Coutard J.-P., Fourniguet J., Isambert M., Lautridou J.-P., Laville P., Macaire J.-J., Ménilet F. et Meyer R., 1993, Cartographie des formations superficielles. Réactualisation des principes de représentation à 1/50 000, Géologie de la France n°4, pp.39-54.
- Magnan J.-P., 2000, Cours de Mécanique des sols et des roches, Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, Volume 1, chap.4, 108 p.
- Moore D. M. et Reynolds R. C. Jr., 1997, X-Ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals. Second Edition. Oxford University Press, 378 p.
- Pardineille, F., 2000, L'érosion littorale sur la Côte Basque de la Bidassoa à Guéthary, Rapport de stage de maîtrise, Université Bordeaux III, 147 p.

- Poesen, J. W. A. et Bryan, R. B., 2004, Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation. Cahiers ORSTOM Série Pédologie, 25, 71-80.
- Pollet N., 2004, Mouvements gravitaires rapides de grandes masses rocheuses : Apports des observations de terrain à la compréhension des processus de propagation et dépôt. Application aux cas de La Madeleine (Savoie, France), Flims (Grisons, Suisse) et Köfels (Tyrol, Autriche). Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, 252 p.
- Razin P., 1989, Evolution tecto-sédimentaire alpine des Pyrénées Basques à l'ouest de la transformante de Pamplona (province du Labourd), Thèse de doctorat : Sciences de la Terre : Université Bordeaux III, 464 p.
- Riondy G., Denis A., 1992, Ville de Biarritz. Confortement de la Côte des Basques. Zone C. Partie sud. Traitement provisoire de la rue des falaises. Avant-projet détaillé. Rapport BRGM n° R 35442 AQI 4S 92
- Riondy G., Denis A., Largillier JF., Samour JP., 1991, Ville de Biarritz. Confortement de la Côte des Basques. Zone B. Partie Centrale. Avant-projet détaillé. Rapport BRGM n° R 33210 AQI 4S 91
- Schoeller H., 1951, Etude hydrogéologique de la côte Basque. Rapport pour le ministère de l'Urbanisme et de la reconstruction (Biarritz).
- Skempton A.W., 1948, A study of the geotechnical properties of some post-glacial clays. Géotechnique, vol.1, pp.111-124.
- SIGES, 2005, Système d'information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine, BRGM, site internet : <http://sigesaqi.brgm.fr>
- SOGELERG-SOGREAH, 1998, Confortement de la falaise Parlementia. Rapport n°030309, 5 p.
- Soletanche, 1978, Guéthary. Reconnaissance géotechnique, référence 3149AB, juillet 1978, 10 figures, 3 p.
- Sols et Eaux, 2001, Guéthary. Reconnaissance géotechnique – LANDA BERRIA– R089-0103-JMC/M, Mars 2001, 15 p.
- Sols et Eaux, 2002, Guéthary. Prescriptions techniques –Rapport– Propriété de Mme Thion –Landa Berria– R120-0204-Jcm/Al, Avril 2002, 9 figures, 6p.
- SORES, 1995, Stabilité des falaises de Bidart, reconnaissance géotechnique. Dossier n°MP.95.GEO.542, 17 p.
- Tourenq C. et Tran Ngoc Lan, 1989, Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène. Application aux sols, roches et granulats. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, n°159, pp. 79-92
- Winckel A., Petitjean J., Borie M., Mallet C., Aubié S., 2004, Etat des connaissances hydrologiques et hydrogéologiques de la côte basque. BRGM/RP-53372-FR, 112 p., 45 illustrations, 5 annexes.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 6009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Aquitaine**  
Parc Technologique Europarc  
24, avenue Léonard de Vinci  
33600 – Pessac - France  
Tél. : 05 57 26 52 70

