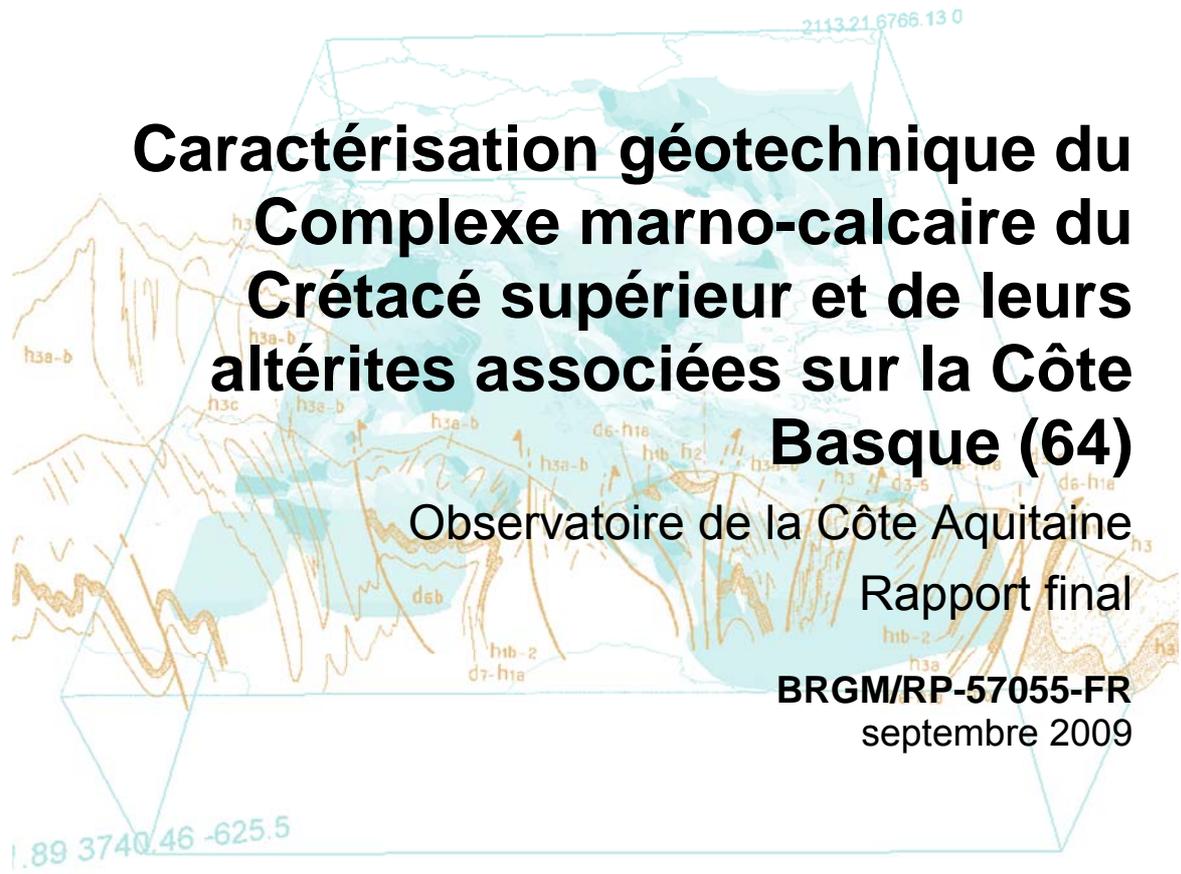


Document public



Caractérisation géotechnique du Complexe marno-calcaire du Crétacé supérieur et de leurs altérites associées sur la Côte Basque (64)

Observatoire de la Côte Aquitaine
Rapport final

BRGM/RP-57055-FR
septembre 2009



Caractérisation géotechnique du Complexe marno-calcaire du Crétacé supérieur et de leurs altérites associées sur la Côte Basque (64).

Observatoire de la Côte Aquitaine
Rapport final

BRGM/RP-57055-FR
Septembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2008 08LITA01

Peter-Borie M., Aubié S.



Vérificateur :

Nom : Jean-Pierre Platel

Date : 15/09/2009

Approbateur :

Nom : Philippe Dutartre

Date : 05/10/2009

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

Mots clés : pétrographie, altérite, Pays Basque, littoral, altération, calcimétrie, composition chimique, lames minces

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

PETER-BORIE M., AUBIE S. (2009) – Caractérisation du complexe marno-calcaire du Crétacé Supérieur et altérites associées sur la Côte Basque (64) – Observatoire de la Côte Aquitaine – Rapport BRGM/RP-57055-FR, 49 p, 28 illus, 4 ann.

Synthèse

La présente étude a été réalisée dans le cadre des missions de service public qui ont été confiées au Service Géologique Régional Aquitaine du BRGM. Elle est cofinancée par l'Europe, l'Etat, la Région Aquitaine, le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques et le BRGM. Ces travaux entrent dans le cadre de la convention de partenariat de l'Observatoire de la Côte Aquitaine s'inscrivant dans le CPER 2007-2013.

Elle fait suite aux études pluri-disciplinaires réalisées sur le littoral de la Côte Basque qui ont permis de mettre en évidence la nécessité d'améliorer les connaissances sur ses processus d'érosion et notamment sur la caractérisation des mouvements de terrain. Dans ce contexte, une thèse a été lancée en janvier 2006 et s'est achevée en décembre 2008 en collaboration avec le laboratoire GHYMAC de l'Université Bordeaux I.

Le présent document est extrait des travaux réalisés au cours de la thèse de Mariane Peter-Borie, soutenue le 19 décembre 2008, intitulée : « Les massifs rocheux crétacés supérieurs du Labourd occidental : processus d'altération et instabilités littorales ».

La connaissance des caractéristiques mécaniques des formations géologiques est une étape indispensable dans l'évaluation de la stabilité des versants. Les mouvements de terrain identifiés sur le littoral de la Côte Basque se produisent majoritairement au sein de l'altérite du Flysch à silex de Guéthary. La présente étude se focalise sur la caractérisation pétrographique et géotechnique de cette altérite. Le glissement de terrain d'Harotzen Costa (commune de Guéthary) instrumenté et suivi par le BRGM se situe dans ces formations géologiques (rapport BRGM/RP-56876-FR).

Les cartographies de terrain ainsi que les analyses pétrographiques ont permis de caractériser ces altérites. Il apparaît ainsi que les altérites sont **des argiles silteuses, hétérogènes**, au sein desquelles sont intercalés des bancs fracturés de chailles. Elles ont conservé la structure de la roche-mère, bien qu'elles se soient tassées de plus de 50% par rapport à leur volume initial. La comparaison de l'altérite du Flysch à silex de Guéthary avec la nature lithologique de sa roche-mère a permis de démontrer que l'altération est un processus relativement peu évolué, qui a uniquement consisté en une oxydation et une dissolution des carbonates de la roche-mère, laissant en place les minéraux les moins solubles et les moins altérables.

Les archives de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sont riches en résultats d'essais et d'analyses géotechniques. Héritée de leur roche-mère, l'hétérogénéité multi-échelle des altérites a pour conséquence la fluctuation des paramètres géotechniques. Cependant, l'ensemble des résultats est caractéristique de **matériaux de faible résistance, sensibles aux variations de teneur en eau**. Dans le cadre des études de stabilité des versants, lorsque de nombreuses valeurs d'un paramètre seront disponibles, nous retiendrons les plus défavorables dans les calculs de stabilité.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 9 |
| 2. CONTEXTE GEOLOGIQUE | 11 |
| 2.1. GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE | 11 |
| 2.1.1. <i>Ecorché géologique</i> | 11 |
| 2.1.2. <i>Formations superficielles</i> | 11 |
| 3. LE COMPLEXE ROCHE-MERE / ALTERITE DU FLYSCH A SILEX DE GUETHARY | 15 |
| 3.1. CARACTERISATION DES DEPOTS DE TYPE FLYSCH..... | 16 |
| 3.2. DESCRIPTION MACROSCOPIQUE..... | 17 |
| 3.2.1. <i>Lithologie</i> | 17 |
| 3.2.2. <i>Structure</i> | 19 |
| 3.2.3. <i>Transformation des chailles</i> | 21 |
| 3.3. ANALYSE MICROSCOPIQUE ET MINERALOGIQUE..... | 22 |
| 3.3.1. <i>La roche-mère : faciès du Flysch à silex de Guéthary</i> | 22 |
| 3.3.2. <i>L'altérite du Flysch à silex de Guéthary</i> | 24 |
| 3.3.3. <i>Analyse quantitative des lames minces</i> | 26 |
| 3.3.4. <i>Quantification des minéraux majeurs</i> | 27 |
| 3.3.5. <i>Conclusion</i> | 30 |
| 4. DONNEES GEOTECHNIQUES | 33 |
| 4.1. SOURCE DES DONNEES..... | 33 |
| 4.2. ESSAIS D'IDENTIFICATION | 35 |
| 4.2.1. <i>Paramètres d'état</i> | 35 |
| 4.2.2. <i>Granularité et limites d'Atterberg</i> | 35 |
| 4.3. ESSAIS DE CARACTERISATION MECANIQUE | 40 |
| 4.3.1. <i>Essai in situ : essai au pressiomètre Ménard</i> | 40 |
| 4.3.2. <i>Les essais triaxiaux</i> | 44 |
| 5. CONCLUSION | 47 |
| 6. BIBLIOGRAPHIE | 49 |

Liste des illustrations

| | |
|---|----|
| Illustration 1 : Ecorché géologique (d'après Razin, 1989, modifié)..... | 12 |
| Illustration 2 : Carte des formations superficielles | 13 |
| Illustration 3 : Glissement de terrain d'Harotzen Costa à Guéthary..... | 15 |

| | |
|---|----|
| Illustration 4 : a. Séquence type de Bouma (1962 ; d'après Foucault et Raoult, 2000, modifié) ; b. Séquence de Lowe | 16 |
| Illustration 5 : Flysch à silex de Guéthary | 17 |
| Illustration 6 : a. Echantillon d'altérite du Flysch à silex de Guéthary : les oxydes de fer colorent la roche dans des teintes ocres et les oxydes de manganèse en noir ; b. Bancs de chailles blanchies et fracturées | 18 |
| Illustration 7 : L'horizon karstifié | 18 |
| Illustration 8 : Passage de la roche-mère à l'altérite parallèle à la stratification : photographie (en haut) et interprétation (en bas)..... | 19 |
| Illustration 9 : Conservation de la structure des marno-calcaires dans le massif altéré : exemple des plis pyrénéens | 20 |
| Illustration 10 : Déformations engendrées par des pertes de volume différentielles consécutives à l'altération | 20 |
| Illustration 11 : a. chaille prélevée au sein des marno-calcaires ; b. et c. chailles prélevées dans l'altérite | 21 |
| Illustration 12 : Discontinuités découpant les bancs de chailles dans l'altérite | 22 |
| Illustration 13 : Section perpendiculaire à la stratification d'un terme d de la séquence de Bouma (1962 ; échantillon RSI6) vue au microscope optique | 23 |
| Illustration 14 : Section perpendiculaire à la stratification d'un terme basal (S1 ; échantillon LS1) de la séquence de Lowe vue au microscope optique | 24 |
| Illustration 15 : Section perpendiculaire à la stratification d'un niveau gréseux d'altérite (échantillon A29) vue au microscope optique | 25 |
| Illustration 16 : Section perpendiculaire à la stratification d'un niveau argileux d'altérite (échantillon A30) vue au microscope optique | 25 |
| Illustration 17 : Analyse des lames minces..... | 27 |
| Illustration 18 : Cortège minéralogique des termes Ta, Tc, Td et Te d'une séquence de Bouma dans les marno-calcaires prélevés dans l'horizon karstifié ;..... | 28 |
| Illustration 19 : a. Cortège minéralogique de cinq échantillons prélevés par carottage dans l'altérite a. cortège minéralogique total ; b. cortège argileux | 29 |
| Illustration 20 : Nombre d'essais utilisés disponibles dans la BSS et nombre de forages dont les échantillons ont été les objets des essais..... | 33 |
| Illustration 21 : Distribution du pourcentage de la fraction fine de l'ensemble des échantillons d'altérites | 36 |
| Illustration 22 : Diagramme de Casagrande (d'après Habib, 1997) | 38 |
| Illustration 23 : Répartition de la consistance des altérites (a), par roche-mère (b)..... | 39 |
| Illustration 24 : Paramètres d'état..... | 40 |
| Illustration 25 : Catégories conventionnelles de sols et pression limite associée (Philipponnat et Hubert, 2002)..... | 41 |
| Illustration 26 : Paramètres statistiques (a) et distribution (b) des modules pressiométriques (EM en MPa) par type d'altérite de la Côte Basque | 42 |

| | |
|---|----|
| Illustration 27 : Paramètres statistiques (a) et distribution (b) des pressions de fluage nettes (p_f^* , en MPa) par altérite | 43 |
| Illustration 28 : Paramètres statistiques (a) et distribution (b) des pressions limites nettes (p_l^* , en MPa) par altérite | 44 |

Liste des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Localisation des échantillons | 51 |
| Annexe 2 : Description des échantillons prélevés et résultats des analyses physico-chimiques | 55 |
| Annexe 3 : Statistiques des différents essais | 61 |
| Annexe 4 : Méthode d'imprégnation des échantillons d'altérites | 65 |

1. Introduction

La présente étude a été réalisée dans le cadre des missions de service public qui ont été confiées au Service Géologique Régional Aquitaine du BRGM. Elle est cofinancée par l'Europe, l'Etat, la Région Aquitaine, le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques et le BRGM. Ces travaux entrent dans le cadre de la convention de partenariat de l'Observatoire de la Côte Aquitaine s'inscrivant dans le CPER 2007-2013.

Elle fait suite aux études pluri-disciplinaires réalisées sur le littoral de la Côte Basque qui ont permis de mettre en évidence la nécessité d'améliorer les connaissances sur ses processus d'érosion et notamment sur la caractérisation des mouvements de terrain. Dans ce contexte, une thèse a été lancée en janvier 2006 et s'est achevée en décembre 2008 en collaboration avec le laboratoire GHYMAC de l'Université Bordeaux I.

Le présent document est extrait des travaux réalisés au cours de la thèse de Mariane Peter-Borie, soutenue le 19 décembre 2008, intitulée : « Les massifs rocheux crétacés supérieurs du Labourd occidental : processus d'altération et instabilités littorales ».

Cette étude se focalise sur la caractérisation pétrographique et géotechnique d'une formation géologique particulièrement sensible aux mouvements de terrain : l'altérite. Sur le littoral basque, cette formation résulte de l'altération *in situ* des flyschs carbonatés crétacés supérieurs (roche-mère). Les études de l'extension géographique de l'altérite (Peter-Borie *et al.*, 2007) semblent montrer que cette dernière s'est développée principalement sur le flysch à silex de Guéthary, formation sur laquelle se sont alors concentrées les analyses pétrographiques et géotechniques du BRGM. Le glissement de terrain d'Harotzen Costa (commune de Guéthary) instrumenté et suivi par le BRGM se situe dans ces formations géologiques (rapport BRGM/RP-56876-FR). La connaissance et la compréhension du phénomène d'altération et des instabilités qui en résultent, nécessite une caractérisation détaillée de l'altérite et de la roche-mère associée.

La caractérisation de ces formations géologiques s'appuie ici sur les connaissances géologiques régionales ainsi que sur l'ensemble des données disponibles dans la Banque de Données du Sous-Sol et fournies par divers bureaux d'étude. En compléments de cette synthèse bibliographique des caractéristiques pétrographiques et géotechniques, le BRGM, en collaboration avec le laboratoire GHYMAC, a réalisé des essais et analyses qui permettront de classer les formations géologiques concernées.

2. Contexte géologique

2.1. GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

Le littoral de la Côte Basque est formé par un éventail de terrains géologiques variés s'étendant du Paléozoïque au Cénozoïque. La zone d'étude (illustration 1) est limitée à l'ouest par l'Océan Atlantique, au sud par la frontière espagnole et au nord par le chevauchement de Bidart qui met en contact anormal le Crétacé supérieur sous l'Eocène. Elle concerne ainsi seulement les flyschs carbonatés crétacés supérieurs de l'unité tectonique septentrionale (Razin, 1989).

2.1.1. Ecorché géologique

Les flyschs crétacés supérieurs sont constitués d'alternances de calcaires, calcaires marneux et marnes au sein desquels peuvent s'être développés, lors de la diagenèse, des bancs de silex (illustration 1). En fonction du paléoenvironnement, du contexte tectonique et des variations eustatiques lors de la sédimentation, le faciès des flyschs est variable. Il peut être caractérisé par l'abondance de bancs calcaires et marno-calcaires avec absence d'interbancs hémipélagiques, ou bien par une forte proportion de termes hémipélagiques marneux (par exemple : les flyschs marno-calcaires de Socoa, Razin, 1989, illustration 2).

Cette variabilité dans les faciès a partiellement contrôlé la structuration des terrains. La disposition structurale a pour conséquence une répartition des niveaux stratigraphiques sub-parallèle à la ligne de rivage actuelle comme le montre l'illustration 1.

2.1.2. Formations superficielles

Les formations superficielles se regroupent en trois grandes familles (illustration 2) : les altérites des flyschs (formation argilo-gréseuse à fragments de silex), surmontées au nord de la carte par les alluvions sablo-graveleuses, très altérées, des nappes du Pliocène, elles-mêmes entaillées par les terrasses sablo-argileuses quaternaires.

Enfin, les petits fleuves côtiers actuels, et notamment, du sud vers le nord, l'Unxin, la Nivelle, et l'Antereneko Erreka et l'Uhabia, ont déposés leurs alluvions en fond de vallée. Ces alluvions sont principalement formées par le remaniement des altérites, formation géologique majoritairement traversée par ces fleuves.

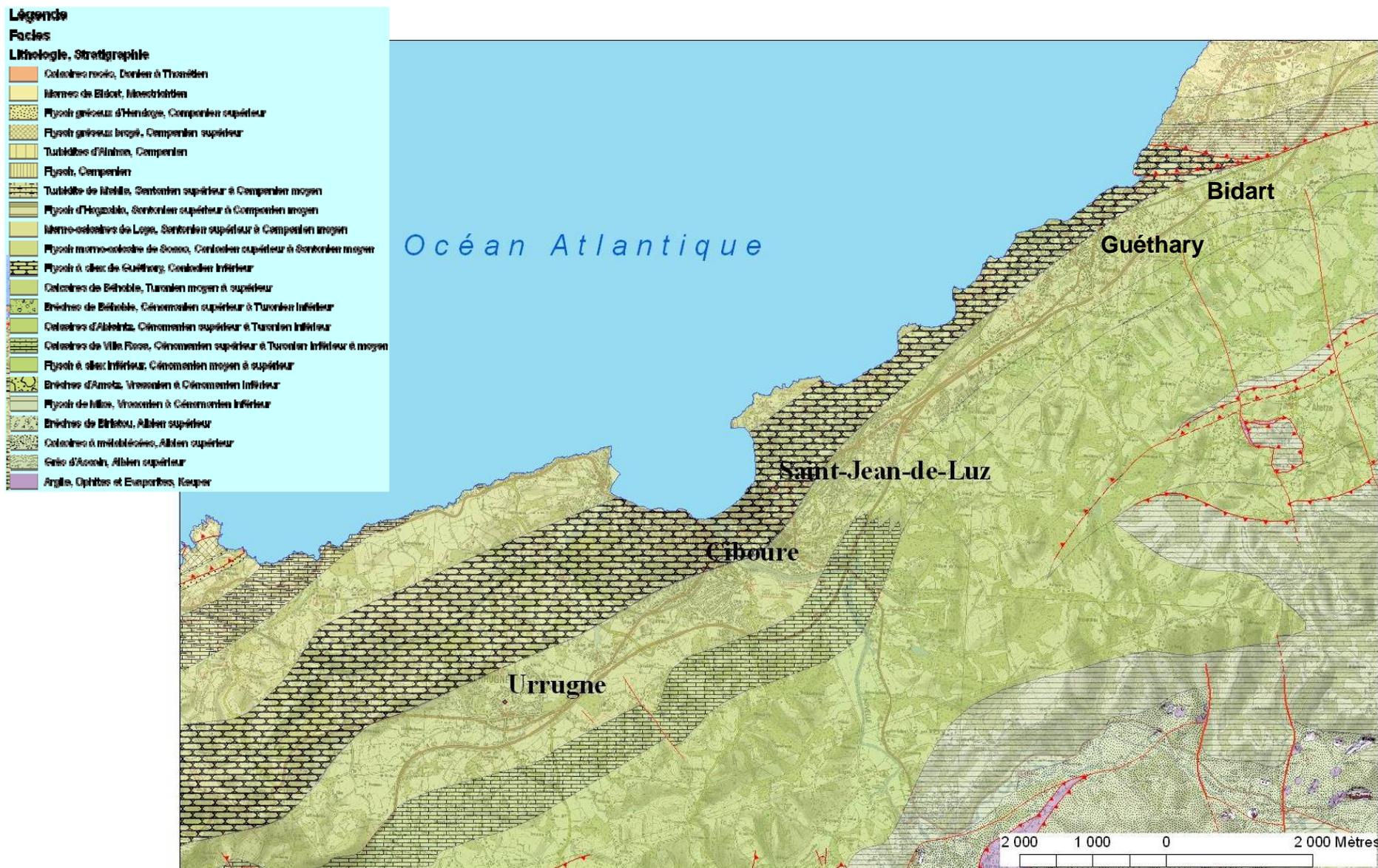


Illustration 1 : Ecorché géologique (d'après Razin, 1989, modifié)

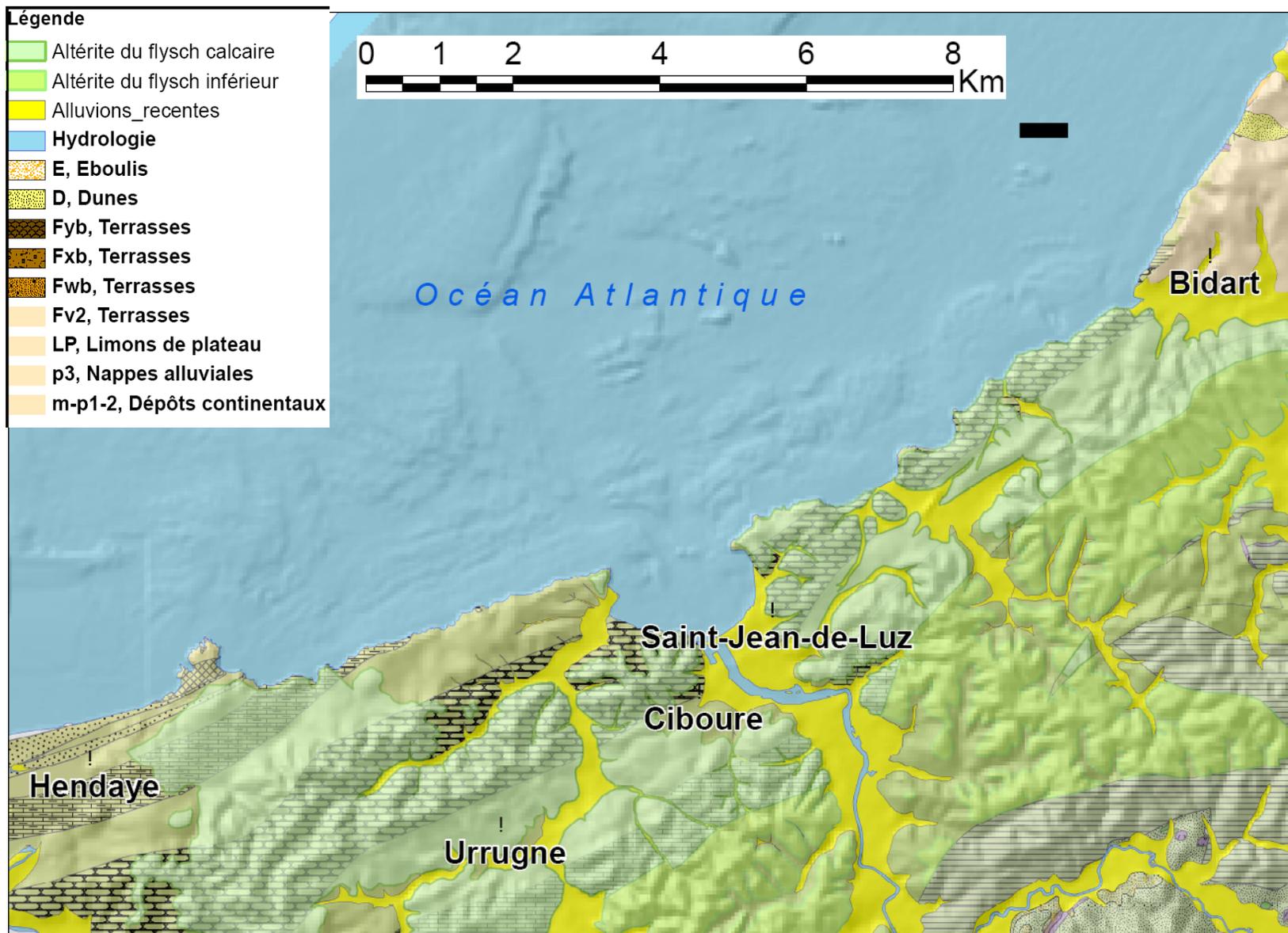
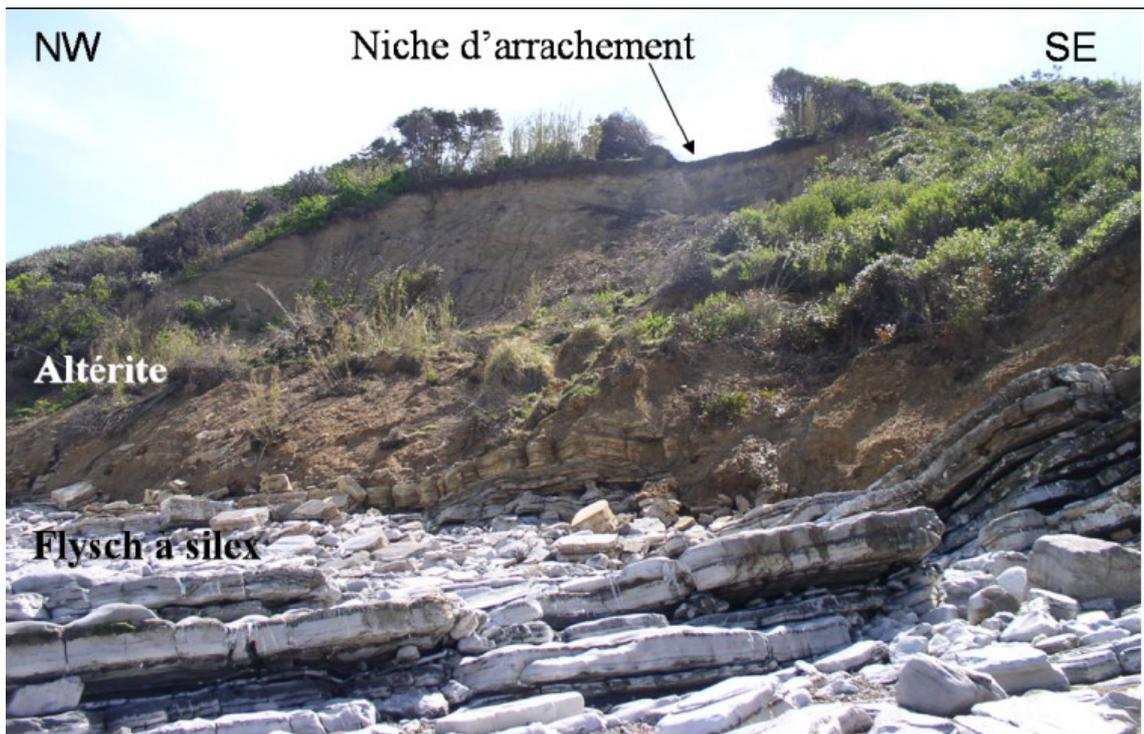


Illustration 2 : Carte des formations superficielles

3. Le complexe roche-mère / altérite du Flysch à silex de Guéthary

Les observations et analyses se sont concentrées sur le Flysch à silex de Guéthary, faciès le plus représenté sur le littoral de la Côte Basque soumis aux instabilités. Le glissement de terrain d'Harotzen Costa suivi par le BRGM depuis novembre 2005 (rapport BRGM/RP-54815-FR et rapport BRGM/RP-56876-FR) s'est produit dans les altérites du Flysch à silex de Guéthary.

La configuration du site permet d'observer et de prélever aisément l'altérite qui affleure à des altitudes proches du niveau de la mer, sur une épaisseur conséquente, 25 m environ, dont 5 m en coupe vive et nette dans la niche d'arrachement du glissement de terrain. La roche-mère affleure, par ailleurs, sur l'estran et sur 1 à 2 m en pied de falaise (illustration 3).



*Illustration 3 : Glissement de terrain d'Harotzen Costa à Guéthary.
La morphologie du littoral permet d'observer à la fois l'altérite et sa roche-mère*

3.1. CARACTERISATION DES DEPOTS DE TYPE FLYSCH

Ces formations sédimentaires détritiques sont essentiellement composées d'un empilement de turbidites, couches de sédiments déposés en une fois par un écoulement turbiditique (Foucault et Raoult, 2000).

Une turbidite peut être décrite par la séquence type de Bouma (1962), qui comprend cinq intervalles (illustration 4a), qui sont, de bas en haut :

- le terme Ta, grossier et granoclassé,
- le terme Tb, gréseux, fin et laminaire,
- le terme Tc, fin, convoluté ou ondulé,
- le terme Td, silteux, fin et laminaire,
- le terme Te, argileux, issu de la décantation lente des particules les plus fines mobilisées par le courant de turbidité.

La séquence de Bouma ne représente qu'un des phénomènes gravitaires à l'origine du faciès flysch d'un dépôt. D'autres modèles de séquences existent et notamment la séquence de Lowe qui permet de distinguer les écoulements de forte densité de ceux à faible densité. Elle est présentée sur l'illustration 4b.

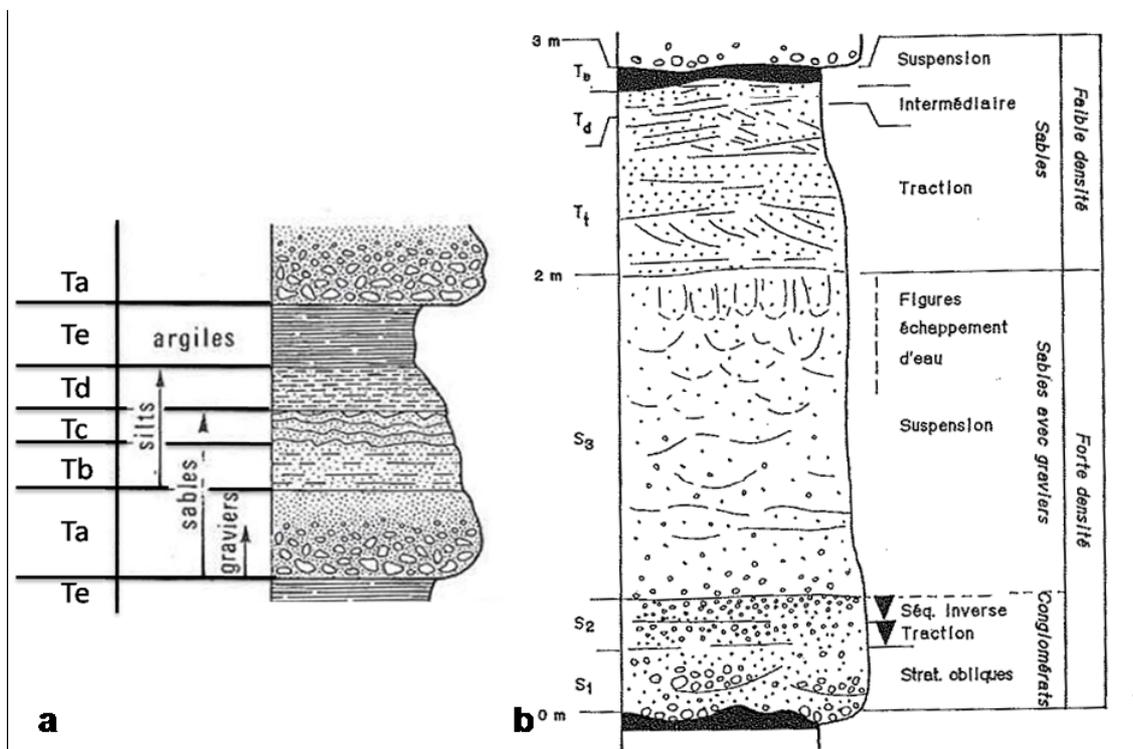


Illustration 4 : a. Séquence type de Bouma (1962 ; d'après Foucault et Raoult, 2000, modifié) ;
b. Séquence de Lowe

Ces séquences types sont rarement complètes, elles sont souvent érodées à leur sommet par un écoulement turbiditique postérieur ou peuvent être tronquées à leur base.

3.2. DESCRIPTIONS MACROSCOPIQUES

3.2.1. Lithologies

La roche-mère est le Flysch à silex de Guéthary (illustration 5), est composée d'une alternance de couches minces à massives de calcaires à nodules et bancs de chailles, et d'interbancs marneux dont l'épaisseur est généralement inférieure à 10 cm (Razin, 1989). Quelques séquences de Bouma sont complètes, mais la plupart sont tronquées à la base. En outre, trois séquences de Lowe, caractérisées par un terme basal particulièrement grossier (graviers à galets dans une matrice carbonatée), ont été observées au pied du glissement de terrain.

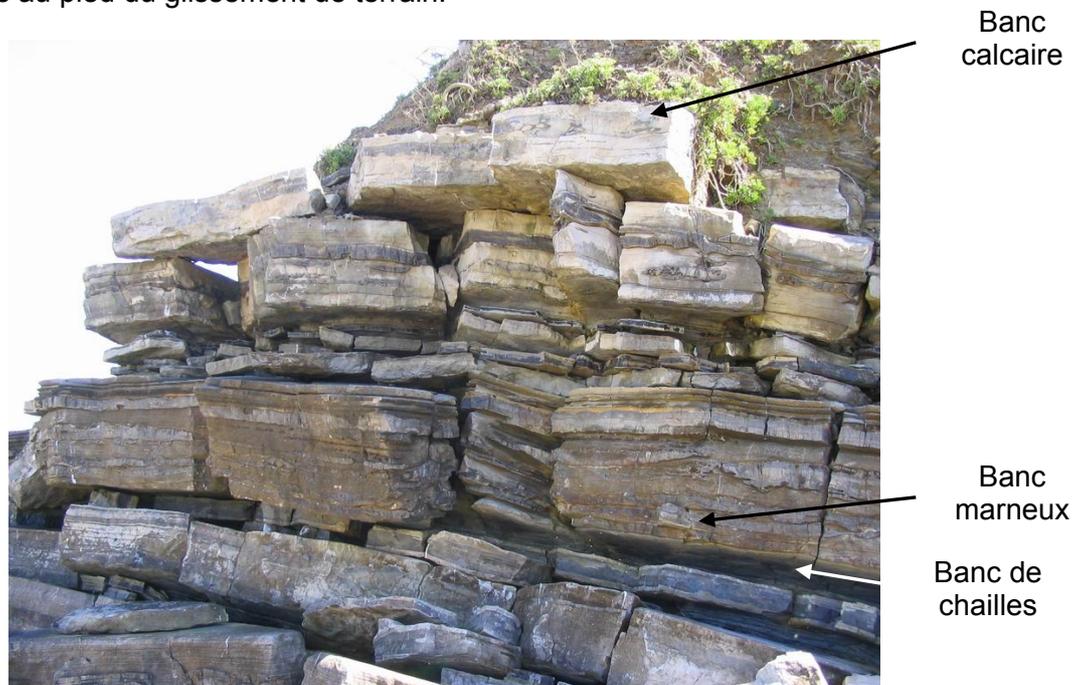


Illustration 5 : Flysch à silex de Guéthary

L'altérite est composée de niveaux millimétriques à centimétriques d'argile plus ou moins silteuse ocre-rouge (teintés par la goethite, oxyde de fer hydraté ; illustration 6a) à gris bleuté et de bancs de chailles densément fracturés (illustration 6b ; étude granulométrique présentée dans le § 5.2.2). Sur le site étudié, d'Harotzen Costa l'altérite atteint 25 m d'épaisseur à l'affleurement. Localement, des blocs marno-calcaires sont observés flottant dans la matrice argileuse. Leurs contours sont alors arrondi et leurs formes et leurs dimensions variées (de quelques décimètres à plusieurs mètres). Les variations lithologiques, la présence de chailles en bancs (accidents siliceux dans les calcaires marins, se rapprochant des silex) et de blocs

marno-calcaires préfigurent encore de potentielles fluctuations dans les propriétés géotechniques d'une même altérite.

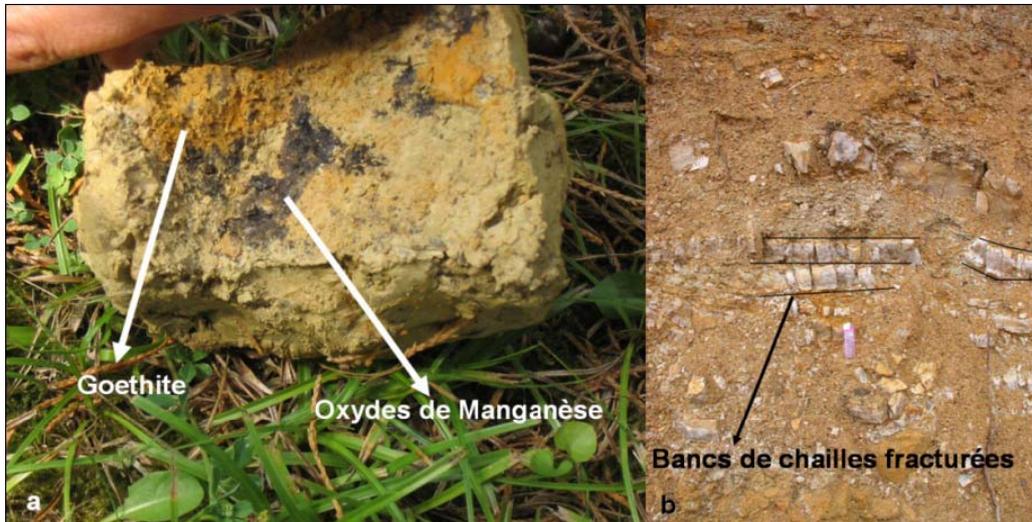


Illustration 6 : a. Echantillon d'altérite du Flysch à silex de Guéthary : les oxydes de fer colorent la roche dans des teintes ocres et les oxydes de manganèse en noir ; b. Bancs de chailles blanchies et fracturées

Le passage de l'altérite à la roche-mère saine est ici dénommé **horizon karstifié**, par analogie au terme « horizon fissuré » employé dans les roches de socle. Cet horizon karstifié est caractérisé par (1) une oxydation des parois de certaines discontinuités, (2) la présence de conduits karstiques arrondis dans les marno-calcaires et (3) le passage franc des faciès carbonatés aux faciès argileux de l'altérite (illustration 7).

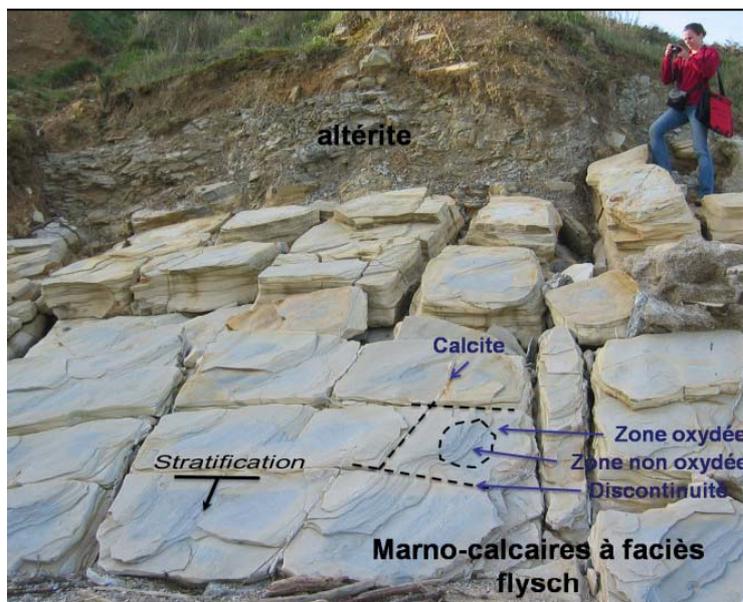


Illustration 7 : L'horizon karstifié

3.2.2. Structure

Les observations de terrain montrent une structure litée au sein des altérites, ce litage étant subparallèle à celui des marno-calcaires. Les plans de stratification de ces derniers, sur l'estran à la base du glissement, sont orientés N165°E-18°ENE, de même que ceux de l'altérite localisée à proximité. D'autres affleurements permettent l'observation de la relative conservation de la stratification et de la structure des marno-calcaires dans les altérites (illustrations 8 et 9). La présence d'une stratification et de plis dans l'altérite, hérités de la structure de la roche-mère, est avec la lithologie, un élément supplémentaire à l'origine de l'hétérogénéité spatiale de cette formation et donc, d'une variabilité spatiale des propriétés géotechniques.

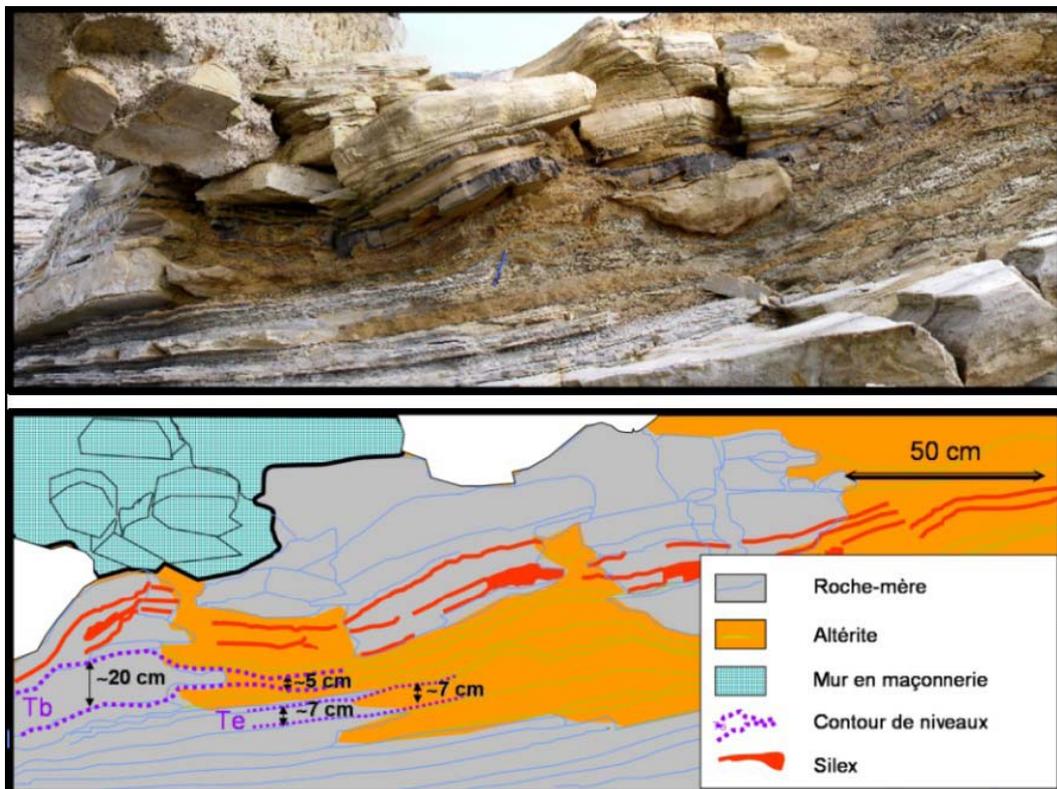


Illustration 8 : Passage de la roche-mère à l'altérite parallèle à la stratification : photographie (en haut) et interprétation (en bas).

On remarque, en plus de la conservation de la stratification, une perte de volume des termes basaux des turbidites



Illustration 9 : Conservation de la structure des marno-calcaires dans le massif altéré : exemple des plis pyrénéens



Illustration 10 : Déformations engendrées par des pertes de volume différentielles consécutives à l'altération

a : plis ; b. morphologie similaire à celle des figures de charges généralement formées en milieu aquatique (enfouissement de la couche supérieure dans la couche inférieure sous l'effet de la gravité)

Alors que l'épaisseur des bancs et interbancs des marno-calcaires oscille entre quelques centimètres et plusieurs décimètres, celle des niveaux de l'altérite est d'ordre millimétrique à centimétrique. Un affleurement singulier, localisé sur une plage de Bidart, permet de comprendre ces différences d'épaisseur, en outre déjà observées par Genna *et al.* (2004, 2005 ; illustration 8) : le passage de la roche-mère à l'altérite, qui s'effectue, ici, parallèlement à la stratification, permet de montrer l'effet, à l'échelle macroscopique, de l'altération sur les différents niveaux. On observe effectivement une variation dans l'épaisseur de certains niveaux dont la continuité est encore visible. Ceci est interprété comme résultant d'une perte de volume du matériau consécutivement à

l'altération. Par ailleurs, cette perte de volume différentielle associée aux phénomènes de tassement engendre des déformations (plissements et figures de charge) comme on peut l'observer sur l'illustration 10. Cette perte de volume sera également étudiée à l'échelle microscopique dans le paragraphe 4.3. Les conséquences de la perte de volume apparaissent, en effet, comme un élément potentiellement influant sur les propriétés géotechniques de l'altérite.

3.2.3. Transformation des chailles

La couleur, la porosité et la fracturation des chailles évoluent verticalement :

- dans les marno-calcaires, les chailles se présentent en bancs d'épaisseur comprise entre 1 et 10 cm, de couleur sombre et parfois zonées (illustration 11a). Des discontinuités d'origine tectonique, souvent remplies de calcite, découpent régulièrement les bancs de chailles et les niveaux carbonatés qui les contiennent ;
- les chailles visibles au sein de l'altérite se présentent en bancs d'épaisseur semblable à celles présentes dans les marno-calcaires, mais découpés en fragments anguleux centimétriques par un réseau dense de discontinuités (illustration 11b-c et 12). Ces discontinuités étant absentes dans les marno-calcaires, l'hypothèse proposée pour leur origine est celle d'une fracturation engendrée par des contraintes locales dues aux déformations (tassements, plis) consécutives à l'altération. Par ailleurs, les chailles blanchissent et leur porosité augmente avec la distance à la surface de la roche-mère.

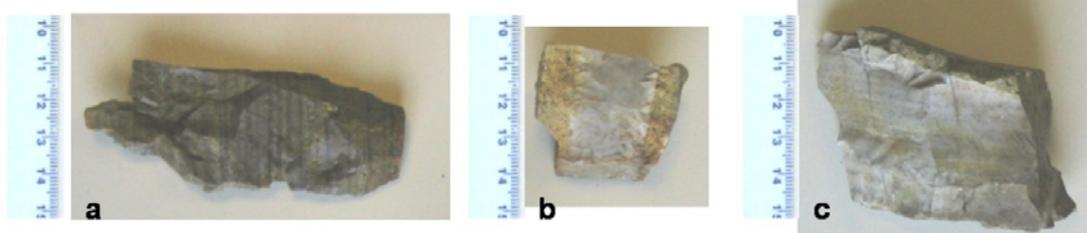


Illustration 11 : a. chaille prélevée au sein des marno-calcaires ; b. et c. chailles prélevées dans l'altérite



Illustration 12 : Discontinuités découpant les bancs de chailles dans l'altérite

3.3. ANALYSES MICROSCOPIQUES ET MINÉRALOGIQUES

Des analyses microscopiques et minéralogiques ont été effectuées dans l'objectif de déterminer l'évolution lithologique et texturale de la roche à la suite de son altération. Pour cela, la composition minéralogique et chimique des altérites et de leur roche-mère a été étudiée par l'observation de lames minces et par diverses analyses chimiques (DRX, calcimétrie et chimie globale), réalisées sur des échantillons d'altérite prélevés principalement dans la carotte d'un forage réalisé sur le site de Guéthary et sur des échantillons du Flysch à silex de Guéthary (roche-mère correspondante) prélevés à l'affleurement. La liste des échantillons analysés, leurs caractéristiques, le détail des analyses et leur localisation sont consignés en Annexe 1 et 2.

3.3.1. La roche-mère : faciès du Flysch à silex de Guéthary

La roche-mère présente une grande variété de faciès lithologiques. Afin d'estimer globalement la nature pétrographique de la roche, des lames minces ont été réalisées dans les termes principaux des séquences de Bouma (Ta à Te) et de Lowe (S1).

On observe ainsi que :

- les différents termes composant la séquence de Bouma sont des roches carbonatées : ces faciès sont principalement constituées de rares intraclastes (principalement des grains de quartz, mais aussi de glauconie, de feldspath et de muscovite) et de nombreux péloïdes et bioclastes jointifs dans une matrice de calcite (illustration 13). Les grains détritiques sont subanguleux. D'un terme de la séquence à l'autre, seul le diamètre des grains est variable, conformément à la granulométrie théorique d'une séquence de Bouma,

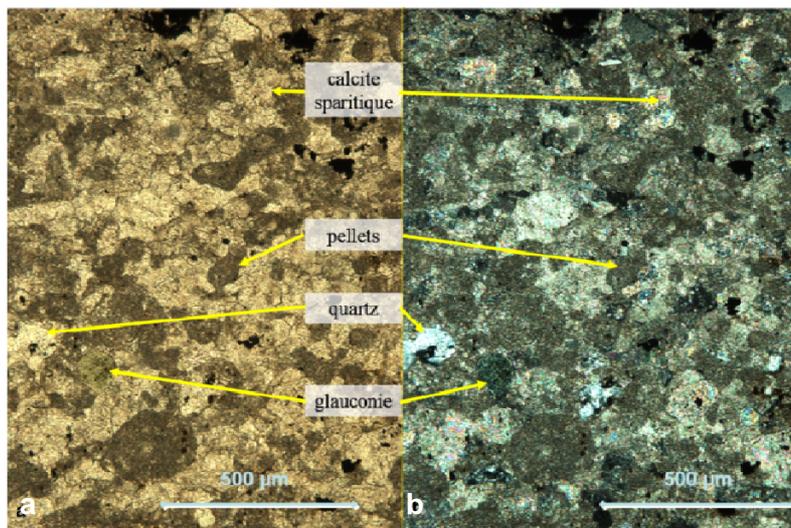


Illustration 13 : Section perpendiculaire à la stratification d'un terme d de la séquence de Bouma (1962 ; échantillon RSI6) vue au microscope optique ($\times 50$; grossissement de l'objectif : $\times 10$ et grandissement de l'oculaire : $\times 5$) ; a. en lumière polarisée non analysée (LPNA) ; b. en lumière polarisée analysée (LPA)

- la base de la séquence de Lowe (S1), caractérisée par la présence de nombreux intraclastes de diamètre apparent plurimillimétrique, est un grès calcaire constitué majoritairement de fragments rocheux (notamment grès, quartzites, micaschistes) plurimillimétriques, de grains de quartz et de micas jointifs cimentés par de la calcite (illustration 14).

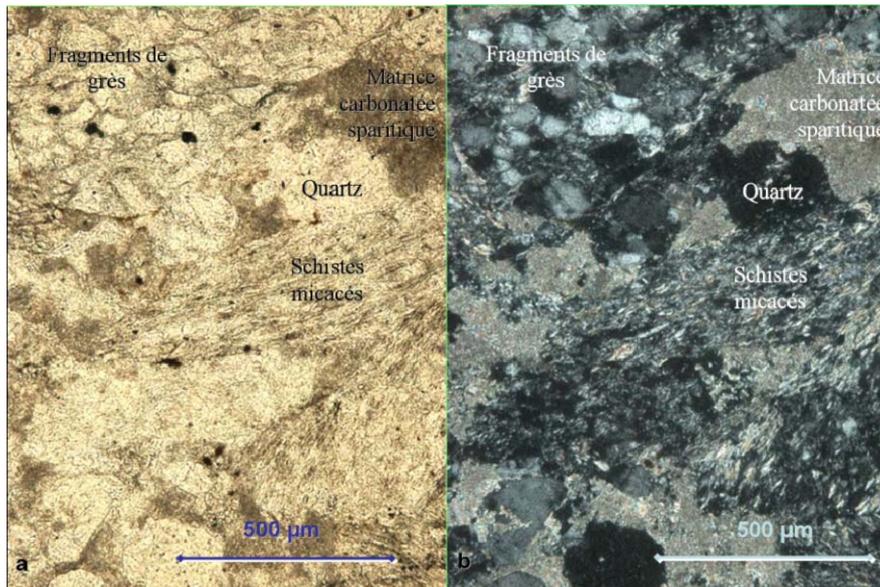


Illustration 14 : Section perpendiculaire à la stratification d'un terme basal (S1 ; échantillon LS1) de la séquence de Lowe vue au microscope optique ($\times 50$; grossissement de l'objectif : $\times 10$ et grandissement de l'oculaire : $\times 5$) ; a. en lumière polarisée non analysée (LPNA) ; b. en lumière polarisée analysée (LPA)

3.3.2. L'altérite du Flysch à silex de Guéthary

La nature argilo-silteuse de l'altérite ainsi que son hétérogénéité à grande échelle sont les causes de nombreuses difficultés rencontrées lors de la conception des lames minces (pénétration différentielle de la résine dans l'échantillon, destruction de l'échantillon, etc...). Malgré les différents protocoles testés, peu de lames minces exploitables sont disponibles. Cependant, les quelques sections observables montrent une grande diversité de faciès depuis les grès argileux (illustration 15) jusqu'à l'argile (illustration 16).

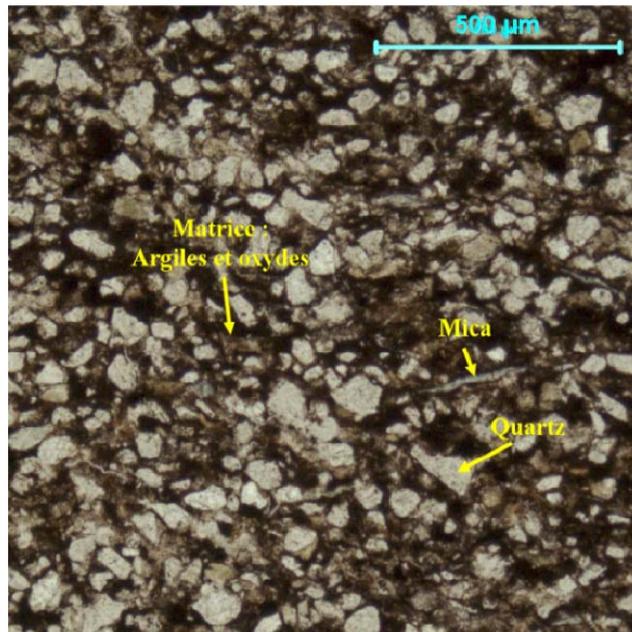


Illustration 15 : Section perpendiculaire à la stratification d'un niveau gréseux d'altérite (échantillon A29) vue au microscope optique en lumière polarisée non analysée (LPNA ; $\times 50$; grossissement de l'objectif : $\times 10$ et grandissement de l'oculaire : $\times 5$)

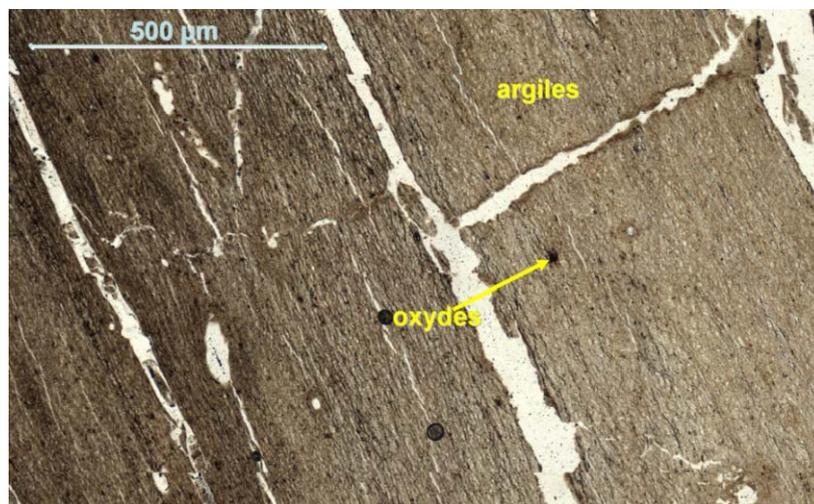


Illustration 16 : Section perpendiculaire à la stratification d'un niveau argileux d'altérite (échantillon A30) vue au microscope optique en lumière polarisée non analysée (LPNA, $\times 50$; grossissement de l'objectif : $\times 10$ et grandissement de l'oculaire : $\times 5$) ; les discontinuités ont été créées par le retrait des argiles lors du remplacement de l'eau interfoliaire par le catalyseur et la résine utilisés pour indurer la roche

3.3.3. Analyse quantitative des lames minces

L'analyse quantitative des lames minces a été effectuée par analyse d'image. L'algorithme développé ainsi que les résultats détaillés ont fait l'objet de diverses publications (Peter-Borie *et al.*, 2006b, 2006c, en cours de soumission^a).

L'analyse des lames minces a consisté en l'étude de la répartition spatiale des grains de quartz, considérés comme non altérés, dans l'altérite et dans la roche-mère. Grâce à l'algorithme développé, les sections de grains de quartz en lames minces sont automatiquement sélectionnées. Cette analyse n'a porté que sur une seule lame mince d'altérite, à cause des difficultés d'obtention de lames intègres dans ce matériau. Cependant, étendue à plusieurs lames minces, cette méthode automatisée permettrait d'estimer la perte de volume et la conservation ou non de la stratification pour chacun des niveaux lithologiques présents dans les marno-calcaires à faciès flysch. Dans le cas de la lame mince disponible, l'analyse d'image (illustration 17) a permis de :

- de faire correspondre le terme de la roche-mère au niveau de l'altérite étudiée à partir des mesures de granulométrie (illustration 17d),
- de confronter la densité des grains de quartz, minéraux résiduels de l'altération. Sur une lame mince de la roche-mère, les sections de grains de quartz représentent une densité aréale de 0,75 % (illustration 17c). Dans l'altérite, elles représentent une densité aréale de 12 % (illustration 17b). On en déduit que l'altération a ici engendré une importante perte de volume de 94 %,
- d'analyser la forme de l'alignement des grains par l'étude de la covariance. Ceci a permis de mettre en évidence la rémanence de la stratification dans l'altérite à grande échelle. Ce qui a été observé à l'échelle macroscopique, perte de volume et conservation de la structure, est également vrai à l'échelle microscopique.

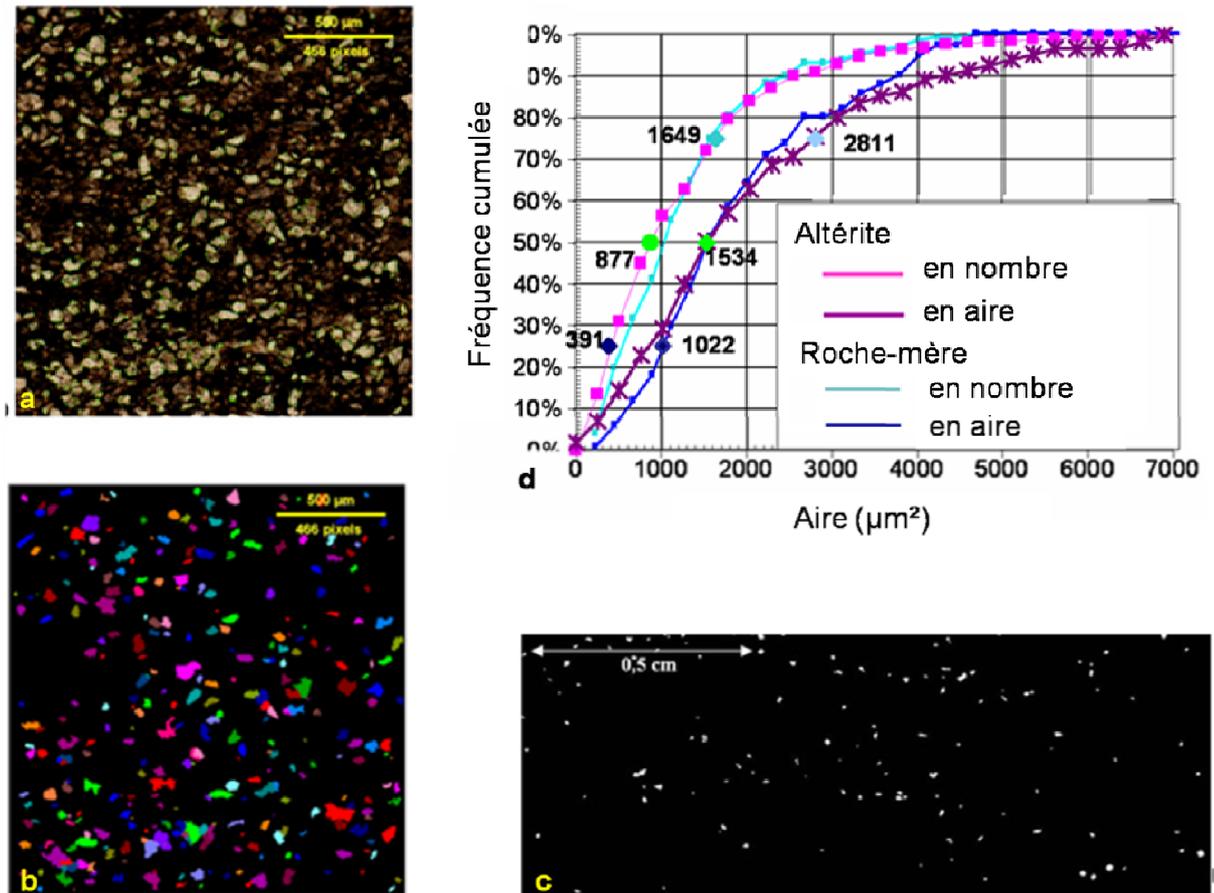


Illustration 17 : Analyse des lames minces

a. Lame mince d'altérite (échantillon A29 ; LPNA ; $\times 50$; grossissement de l'objectif : $\times 10$ et grandissement de l'oculaire : $\times 5$) ; b. image binaire des grains de quartz de l'altérite (chaque grain et représenté par une couleur différente) ; c. image binaire des grains de quartz dans la roche-mère correspondant à l'altérite ; d. Courbes granulométriques des grains de quartz (en nombre et en aire)

3.3.4. Quantification des minéraux majeurs

La caractérisation et la quantification des minéraux majeurs ont été réalisées à partir de la synthèse des résultats obtenus par analyse chimique globale (quantification des oxydes présents) et de la fraction argileuse menée par diffraction des rayons X, ainsi que par des mesures calcimétriques. Les cortèges minéralogiques obtenus pour les marno-calcaires de l'horizon karstifié et pour les altérites ont été reconstitués pour respectivement cinq et quatre échantillons. Les résultats de ces analyses sont présentés en annexe 1.

✓ Analyses calcimétriques

Selon sa teneur en carbonate de calcium, la classification géotechnique de la formation géologique évolue d'un sol pour les teneurs inférieures à 60-70% à une roche, avec des dénominations évoluant avec le pourcentage de CaCO₃. Les altérites sont des argiles (sol) au sens géotechnique du terme. Selon le banc analysé, le flysch est un calcaire à calcaire marneux (roche) pour les termes basaux avec des interbanes marneux (sol) qui correspondent aux termes Te de la séquence.

✓ **Analyses chimiques**

Pour définir une espèce minérale, il est nécessaire de connaître sa composition chimique. Ainsi, dans le but d'identifier les espèces minérales des différentes formations géologiques étudiées, l'analyse chimique par spectrométrie de fluorescence X a été réalisée selon les modes opératoires MO010 et MO011 du BRGM.

✓ **Diffractomètre aux rayons X**

La diffractométrie des rayons X a été utilisée sur la fraction fine des altérites et du flysch afin d'identifier les différents types d'argiles présentes. Dans un premier temps des analyses qualitatives ont été effectuées, complétées par la suite par des analyses quantitatives.

a) Résultats et interprétations

Les marno-calcaires de l'horizon karstifié

Comme on a pu l'observer en lames minces, les marno-calcaires sont principalement constitués de calcite, de quartz et d'argiles. Les différents termes les plus grossiers de la séquence de Bouma (Ta à Td) sont composés à plus de 70% de calcite (illustration 18) ; seul le terme fin, le terme Te, est constitué d'une proportion moindre en carbonate avec seulement 24%.

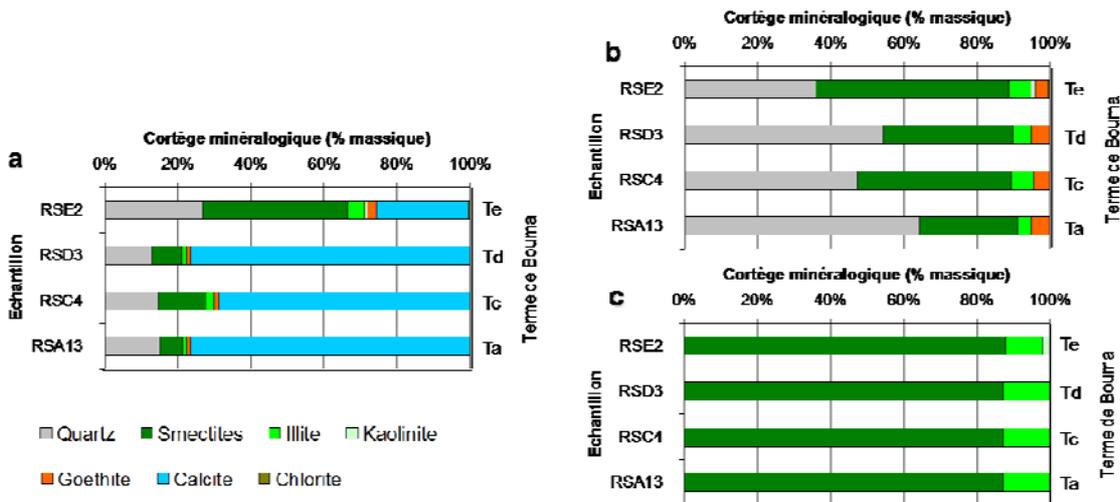


Illustration 18 : Cortège minéralogique des termes Ta, Tc, Td et Te d'une séquence de Bouma dans les marno-calcaires prélevés dans l'horizon karstifié ;

a. cortège minéralogique de la roche dans sa totalité ; b. cortège de la fraction non carbonatée ;
c : cortège argileux

La fraction siliceuse des marno-calcaires est formée par des grains de quartz et de l'argile en proportion variable (illustration 18b) : la fraction siliceuse du terme Ta, le plus grossier, est composée majoritairement de quartz (65%), celle des termes Tc et Td est représentée à près de 50% par ce minéral. Des oxydes de fer, sous forme de goéthite, apparaissent : les échantillons ayant été prélevés au sein de l'horizon karstifié, ils ont subi les prémices de l'altération qui se traduit par une oxydation.

La fraction argileuse des marno-calcaires est majoritairement composée par des argiles de la famille des smectites (plus de 80%) et de l'illite (illustration 18c). Dans le terme le plus fin (Te), la kaolinite apparaît en trace. Il est difficile de savoir ici si son origine est détritique ou si elle provient de la transformation de minéraux préexistants lors des premiers stades de l'altération.

Les altérites

L'argile est la phase minérale toujours présente dans l'altérite. Dans les niveaux les plus gréseux, de nombreux grains de quartz sont visibles sur les lames minces. L'analyse de l'altérite au diffractomètre à rayons X permet, d'une part de conforter ces observations et, d'autre part, de déterminer la nature des argiles.

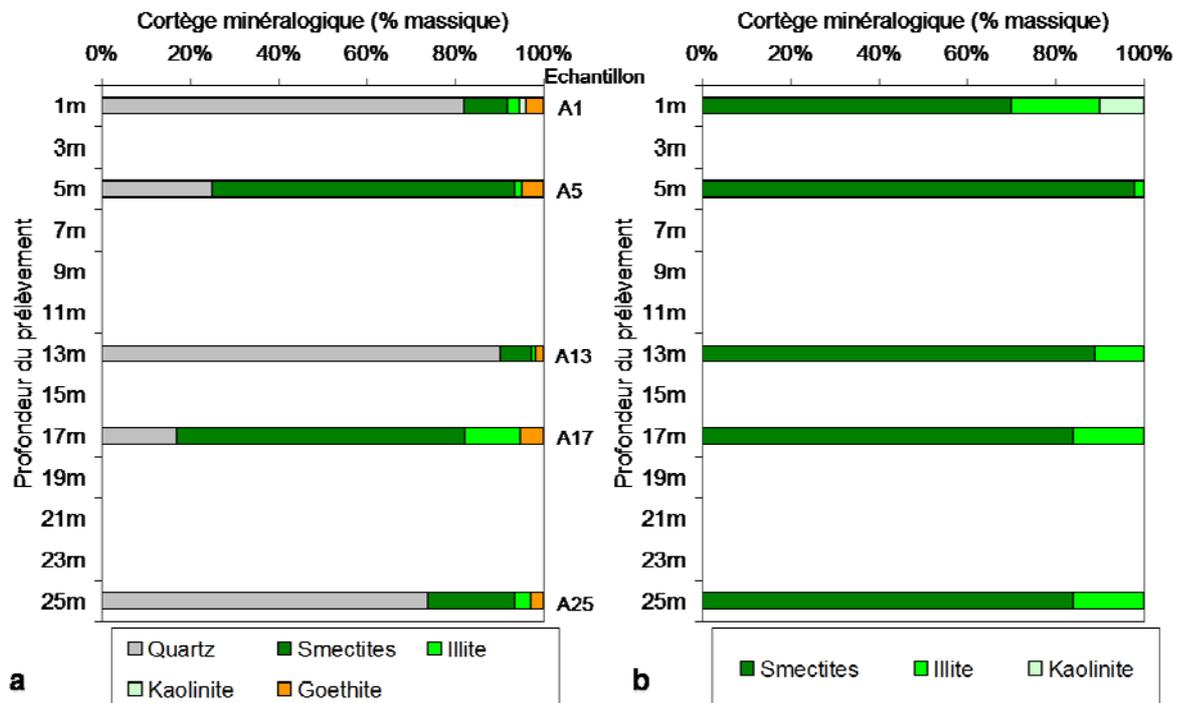


Illustration 19 : a. Cortège minéralogique de cinq échantillons prélevés par carottage dans l'altérite a. cortège minéralogique total ; b. cortège argileux

Ainsi, l'altérite est composée de trois fractions (illustration 19) :

- une fraction siliceuse : les échantillons d'altérite prélevés à différentes profondeurs le long d'une même verticale ont cependant des proportions en quartz très variables,
- une fraction formée par les hydroxydes de fer (exprimés sous une de leur forme hydratée : la goethite),
- une fraction argileuse : le cortège argileux est composé en majorité de smectites (à plus de 80%) et, en proportion beaucoup plus faible, d'illite. De la kaolinite a été détectée dans l'échantillon prélevé à 1 m de profondeur.

Aucun gradient minéralogique vertical ne transparait à travers ces analyses effectuées sur des échantillons d'altérite prélevés dans un même forage carotté, ni au point de vue de l'évolution du cortège argileux, ni en ce qui a trait à la teneur en oxydes. Les variations de teneur en quartz sont héritées de celles observées dans la roche-mère ; la dispersion plus importante des teneurs en quartz de l'altérite par rapport à celles de la roche-mère est attribuée au tassement post-altération qui a engendré la concentration de quartz selon certains niveaux.

Outre ces échantillons d'altérite et de marno-calcaires sur lesquels l'ensemble des analyses effectuées a permis de reconstituer leur cortège minéralogique complet, la fraction argileuse d'autres échantillons d'altérite a été analysée par diffraction des rayons X. Il apparait que les variations dans la nature de la roche-mère engendrent des variations dans le profil d'altération. Ces dissimilitudes peuvent avoir pour origine des processus et un degré d'altération distincts et/ou des différences dans le cortège argileux des roches-mères. Dans tous les cas, elles ont des conséquences sur le comportement des massifs altérés en présence d'eau : en effet, certaines argiles sont plus sensibles à l'eau que d'autres (*c.f.* : § 4.2.2), et cela peut influencer sur la stabilité des terrains.

3.3.5. Conclusion

Les analyses et observations microscopiques ont permis de mettre en évidence l'évolution lithologique et texturale liée à l'altération du Flysch à silex de Guéthary.

Comme cela a été évoqué par Genna *et al.* (2004, 2005), l'altération du Flysch à silex de Guéthary a principalement consisté en une décarbonatation et une oxydation. En effet, que ce soit par l'étude des lames minces ou par la chimie globale, on démontre ici que la nature de la roche a évolué à partir d'un calcaire, qui peut présenter divers faciès fonction de l'hétérogénéité lithologique liée au faciès flysch, en une argile plus ou moins gréseuse. Ces analyses apportent, d'une part la preuve de la conservation de la stratification à l'échelle microscopique et, d'autre part mettent en évidence de la constance du cortège argileux. Ce dernier est composé majoritairement de smectites et d'illite ; la diagénèse récente est peu évoluée.

Toutefois, les analyses chimiques réalisées sur un faciès de flysch plus terrigène montre que les observations réalisées sur un type de flysch ne sont pas valables pour

l'ensemble des marno-calcaires à faciès flysch. Dans le cadre des analyses de stabilité, l'étude des caractéristiques géotechniques des altérites doit nécessairement prendre en compte cette variabilité : en effet, elle peut être à l'origine de comportements différents des massifs altérés lors de leur saturation en eau.

4. Données géotechniques

Comprendre les processus de rupture au sein des roches altérées nécessite la connaissance de leurs caractéristiques géotechniques, notamment à l'échelle des instabilités.

4.1. SOURCE DES DONNEES

Le code minier (Titre VIII, Articles 131 à 136) rend obligatoire la déclaration des ouvrages d'une profondeur supérieure à 10 m. Le BRGM est chargé de gérer ces données et de les mettre à disposition du public ; il le fait par le biais de la Banque de Données du Sous-Sol (BSS). Les dossiers relatifs aux forages fournis par les bureaux d'étude contiennent parfois, en plus des descriptions géologiques obligatoires, des données géotechniques. Ce type d'information est relativement abondant sur le littoral basque ; en effet, l'urbanisation importante nécessite la réalisation de nombreux forages, dont l'objectif est la caractérisation des matériaux sur lesquels habitations, routes et autoroutes sont construites.

Les dossiers relatifs à 80 forages répertoriés dans la BSS ont fourni les résultats de **709 essais** (illustration 20).

| Type d'essai | Nombre de | Identification | | | | | | | | Caractérisation mécanique | | Nombre total d'essais |
|---|---------------|------------------------|-----------------------|----------|---------------------|------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------------|----------------|-----------------------|
| | | Masse volumique humide | Masse volumique sèche | Porosité | Degré de saturation | Indice des vides | Granulométrie | Limites d'Atterberg | Teneur en eau | Essai pressiométrique | Essai triaxial | |
| Marno-calcaires de Loya | essais | | | | | | 1 | 5 | 22 | 14 | | 42 |
| | sites/forages | | | | | | 1 | 3 | 3 | 1 | | |
| Turbidite de Makila | essais | | | | | | | | | 11 | | 11 |
| | sites/forages | | | | | | | | | 1 | | |
| Flysch marno-calcaire de Socoa | essais | | | | | | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 | 10 |
| | sites/forages | | | | | | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | |
| Flysch à silex de Guéthary | essais | 15 | 11 | 11 | 11 | 11 | 5 | 14 | 31 | 32 | 8 | 149 |
| | sites/forages | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 5 | 3 | |
| Calcaires de Béhobie | essais | | | | | | 109 | 125 | 132 | 101 | | 467 |
| | sites/forages | | | | | | 31 | 61 | 33 | 13 | | |
| Calcaires d'Ablaintz et de Villa Rosa | essais | | | | | | 1 | 1 | 1 | 27 | | 30 |
| | sites/forages | | | | | | 1 | 1 | 1 | 5 | | |
| Nombre total d'essais | | 15 | 11 | 11 | 11 | 11 | 117 | 148 | 190 | 186 | 9 | 709 |
| Nombre total de forages exploités par essai | | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 35 | 69 | 41 | 26 | 4 | |

Illustration 20 : Nombre d'essais utilisés disponibles dans la BSS et nombre de forages dont les échantillons ont été les objets des essais

Ces forages, et les essais qu'ils ont permis de réaliser concernent les altérites des marno-calcaires à faciès flysch du Cénomanién supérieur au Campanien supérieur (Flysch d'Hayzabia – composé de la Turbidite de Makila et des Marno-calcaires de Loya – Flysch marno-calcaire de Socoa, Flysch à silex de Guéthary, Calcaire de Béhobie et Calcaires d'Ablaintz et de Villa Rosa). Cependant, aucune de ces formations géologiques n'a été l'objet du même nombre et du même type d'essai et d'analyse :

- la plupart des informations sont relatives à l'altérite du Calcaire de Béhobie, formation géologique sur laquelle l'autoroute A63 est principalement construite (467 essais),
- peu d'essais ont été réalisés pour les altérites des Marno-calcaires de Loya (42 essais), de la Turbidite de Makila (11 essais), du Flysch marno-calcaire de Socoa (10 essais) et des Calcaires d'Ablaintz et de Villa Rosa (30 essais),
- peu de données sur la granulométrie et sur les limites d'Atterberg sont disponibles pour l'altérite du Flysch à silex de Guéthary (149 essais au total, mais seulement 5 analyses granulométriques et 14 déterminations de limites d'Atterberg réalisées sur deux sites) qui affleure sur une grande partie du littoral, c'est pourquoi des essais complémentaires ont été réalisés sur des échantillons prélevés à l'affleurement.

Malgré l'importante quantité de données, deux limites à l'exploitation des résultats apparaissent :

- la première est la conséquence de la concentration des forages dans des zones particulières. Les forages qui ont permis la réalisation des essais géotechniques sont localisés principalement sur le linéaire du tracé de l'autoroute A63. Les autres ouvrages sont très dispersés sur la zone couverte par les altérites des formations crétacées étudiées. La faible densité des forages exploités (2,3 forages par kilomètres carrés) et la quantité de données pour chaque paramètre d'état et caractéristique, comparativement aux échelles des hétérogénéités, ne permet pas l'estimation des caractéristiques géotechniques en tout point du littoral,
- la seconde est un biais lié probablement à un échantillonnage sélectif : on remarque, en effet, que nombre des résultats présentés dans les paragraphes suivants ne sont pas représentatifs de l'ensemble des matériaux qui composent les altérites des marno-calcaires à faciès flysch : les descriptions lithologiques des échantillons montrent que ceux-ci ne contiennent pas de fragments de chailles.

4.2. ESSAIS D'IDENTIFICATION

4.2.1. Paramètres d'état

Les paramètres d'état répertoriés dans les archives de la BSS sont la masse volumique sèche, la masse volumique humide, l'indice des vides, le degré de saturation (fonction de la teneur en eau massique) et la porosité. Les statistiques des paramètres d'état sont présentées en annexe 3. Ces données ne sont disponibles dans leur totalité que pour seulement deux forages, l'un dans l'altérite du Flysch à Silex de Guéthary (10 échantillons entre 1,1 et 5,4 m de profondeur) et le second dans l'altérite du Flysch marno-calcaire de Socoa (un échantillon prélevé à 2,5 m de profondeur).

4.2.2. Granularité et limites d'Atterberg

D'autres paramètres caractérisent classiquement les matériaux fins. Il s'agit de :

- la *granulométrie*, qui mesure notamment la quantité d'argile dans le matériau,
- les *limites d'Atterberg*, qui permettent une estimation du comportement de la fraction la plus fine en présence d'eau.

Afin de compléter les données issues de la BSS et notamment d'obtenir des données sur la distribution de la fraction inférieure à 80 μm , absentes de la BSS, des analyses granulométriques ont été réalisées à partir de prélèvements effectués sur le site de Harotzen Costa à Guéthary. La distribution des particules de diamètre supérieur à 80 μm a été déterminée par tamisage, celle des particules de taille inférieure, par sédimentométrie ou par granulométrie laser.

L'illustration 21 présente la distribution de la fraction fine de l'ensemble des échantillons d'altérites des marno-calcaires disponibles dans la BSS. On observe une grande hétérogénéité : l'étendue sur laquelle se répartit la fraction fine est de 59% (de 35% à 94%), la valeur modale est de 51%. Aucune évolution fonction de la roche-mère n'apparaît.

Ces fluctuations dans les résultats des analyses granulométriques s'expliquent par le fait que le volume élémentaire représentatif est de dimension supérieure à celle des échantillons utilisés pour les analyses (un échantillon comportant des éléments de taille centimétrique nécessite environ 1 kg de matériau, soit 600 cm^3 pour une masse volumique de 1670 kg.m^{-3} selon la norme française NF P94-040). Elles masquent de potentielles variations de granulométrie liées aux évolutions lithologiques des altérites avec le faciès de leur roche-mère.

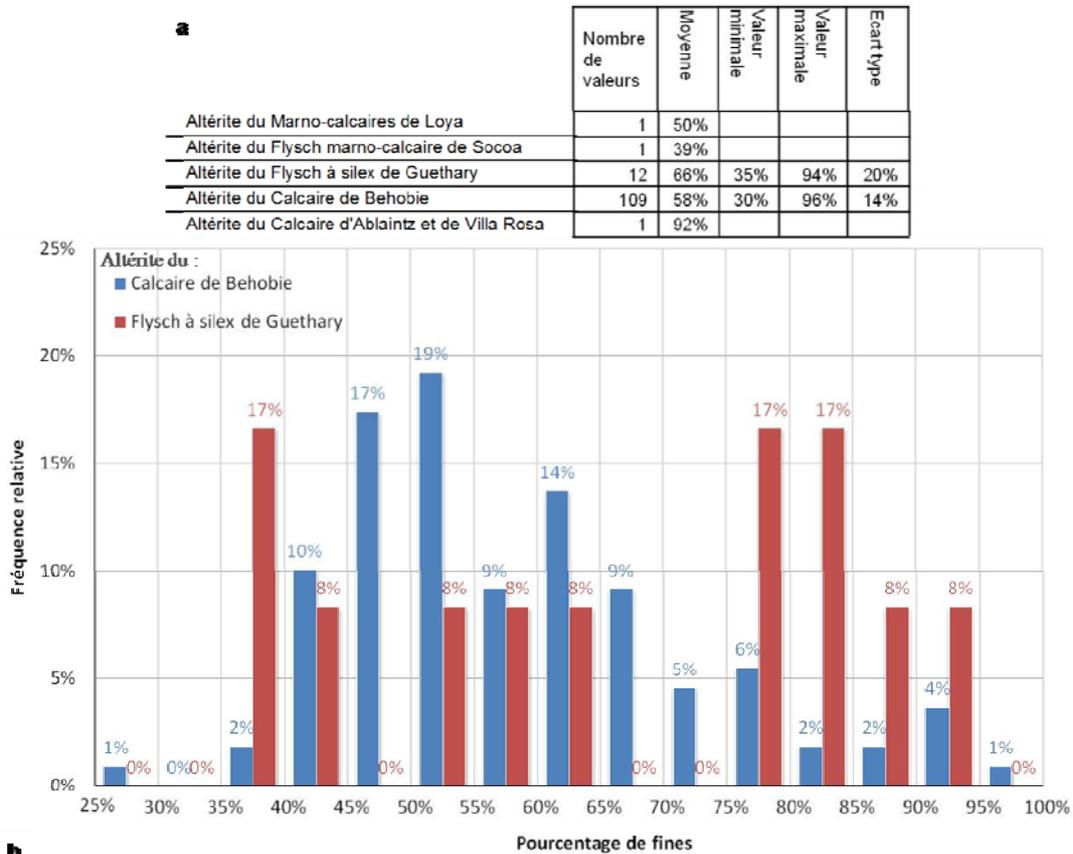


Illustration 21 : Distribution du pourcentage de la fraction fine de l'ensemble des échantillons d'altérites

a. Paramètres statistiques du pourcentage de la fraction fine (<80 μm) dans les altérites des marno-calcaires à faciès flysch du Cénomanién supérieur au Campanien supérieur ; b.

Distribution du pourcentage de la fraction fine des altérites du Calcaire de Béhobie et du Flysch à silex de Guéthary

Les fractions fines et argileuses sont potentiellement importantes dans les altérites. Or l'abondance des argiles dans les matériaux a des répercussions sur la stabilité des pentes : en effet, l'augmentation de la teneur en eau des sols fins s'accompagne de la diminution de la résistance du matériau, celui-ci passant d'un état solide à un état plastique puis à un état liquide (Le Roux, 1972). L'étude des limites d'Atterberg permet une estimation de la sensibilité du matériau aux variations de teneur en eau.

Atterberg a proposé trois définitions des états que peuvent présenter les argiles en fonction de leur teneur en eau :

- l'état solide, pour des teneurs en eau inférieures à la limite de plasticité (wp),
- l'état plastique, pour des teneurs en eau comprises entre la limite de plasticité (wp) et la limite de liquidité (wL),

- l'état liquide, pour des teneurs en eau supérieures à la limite de liquidité (w_L).

En outre, deux indices sont classiquement définis :

- l'indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de liquidité (w_L) et la limite de plasticité (w_p). Il donne l'étendue du domaine plastique et est caractéristique du type d'argile. Le couple (I_p , w_L) permet d'apprécier la faculté d'un matériau à devenir très déformable en absorbant de l'eau, c'est-à-dire, sa plasticité. Il est ainsi utilisé dans la classification des sols fins à travers le diagramme de Casagrande : cette représentation de l'indice de plasticité (I_p) en fonction de la limite de liquidité (w_L) permet de placer l'échantillon analysé parmi les différents types de matériaux fins (limons peu plastiques (L_p), argiles peu plastiques (A_p), limons très plastiques (L_t), argiles très plastiques (A_t), et les grandes familles d'argiles (kaolinite, illite, montmorillonite de la famille des smectites),
- l'indice de consistance (I_c) est la différence entre la limite de liquidité (w_L) et la teneur en eau (w), rapportée à l'indice de plasticité (I_p) : Comme l'indique son nom, cet indice définit la consistance du matériau :
 - si la teneur en eau de ce dernier est égale à la limite de liquidité, la consistance est nulle (le matériau est liquide), $I_c = 0$ puisque $w = w_L$;
 - si la teneur en eau de ce dernier est égale à la limite de plasticité, le matériau est très consistant, $I_c = 1$ puisque $w = w_p$ et $w_L - w_p = I_p$.

Cent-quarante-huit mesures de limites d'Atterberg sont disponibles dans la BSS, et onze analyses supplémentaires ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans le glissement de Harotzen Costa à Guéthary. La synthèse statistique des limites d'Atterberg est présentée en annexe 3. La valeur de limite de liquidité (w_L) moyenne des altérites est élevée (57%) et l'indice de plasticité (I_p) moyen est de 30%, ce qui place, en moyenne, les altérites dans le domaine des **argiles très plastiques**.

La grande majorité (85%) des échantillons des altérites du Calcaire de Béhobie se place dans le domaine des argiles peu plastiques (illustration 22). Ceux des altérites du Flysch à silex de Guéthary sont dispersés entre les domaines très plastiques de l'illite et des montmorillonites. Ceux du Flysch marno-calcaire de Socoa appartiennent au domaine de l'illite et, enfin, ceux des Marno-calcaires de Loya, au domaine de l'illite et de la kaolinite. Il semble que les flyschs à silex de Guéthary ont un produit d'altération dont le comportement est plus proche de celui des argiles gonflantes (type smectites et mélanges illites/smectites) que les flyschs marno-calcaire de Socoa.

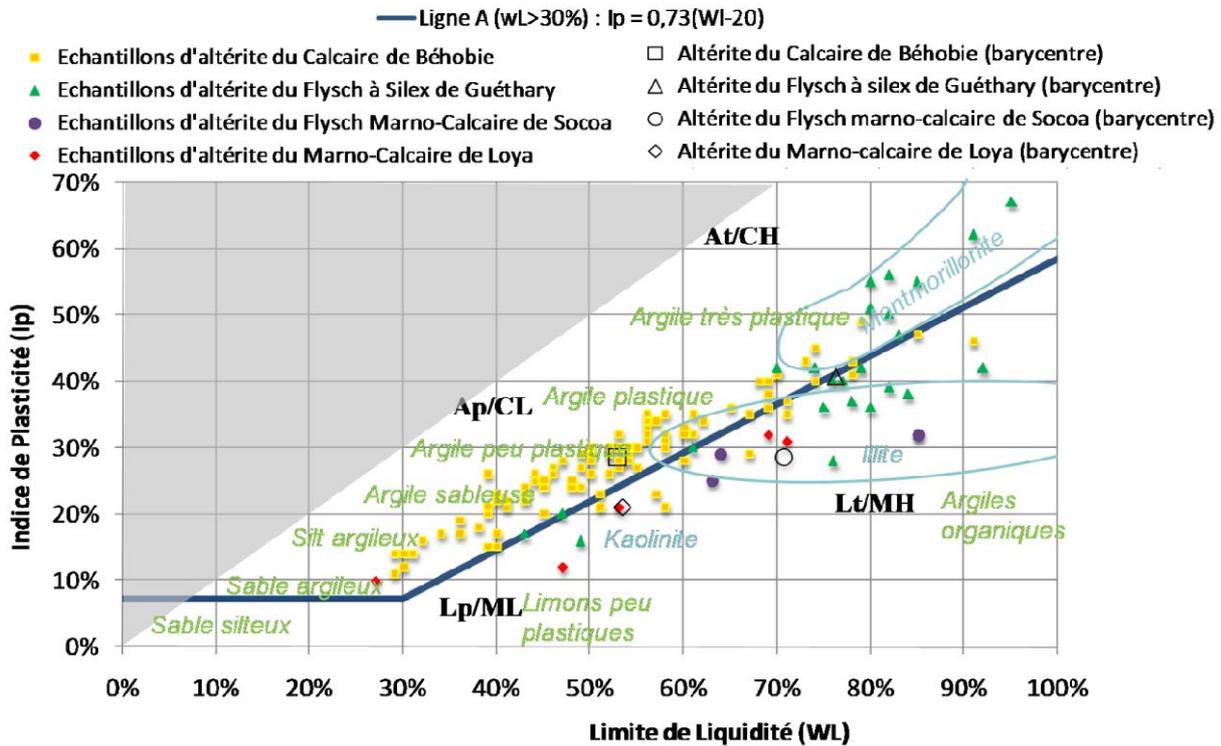


Illustration 22 : Diagramme de Casagrande (d'après Habib, 1997)
 Symboles français/ international : Lp/ML : Limons peu plastiques ; Ap/CL : Argiles peu plastiques ; Lt/MH : Limons très plastiques ; At/CH : Argiles très plastiques

La consistance moyenne de toutes les altérites, au moment de leur prélèvement, est inférieure à 1, le matériau étant dans un état plastique (annexe 3). Cependant, ces valeurs sont très dispersées entre -1,60 et 2,02. La répartition des consistances des différents échantillons est présentée illustration 23. La majorité des échantillons prélevés (59%) est dans un état plastique ($0 < I_c < 1$) et 6% dans un état liquide ($I_c < 0$).

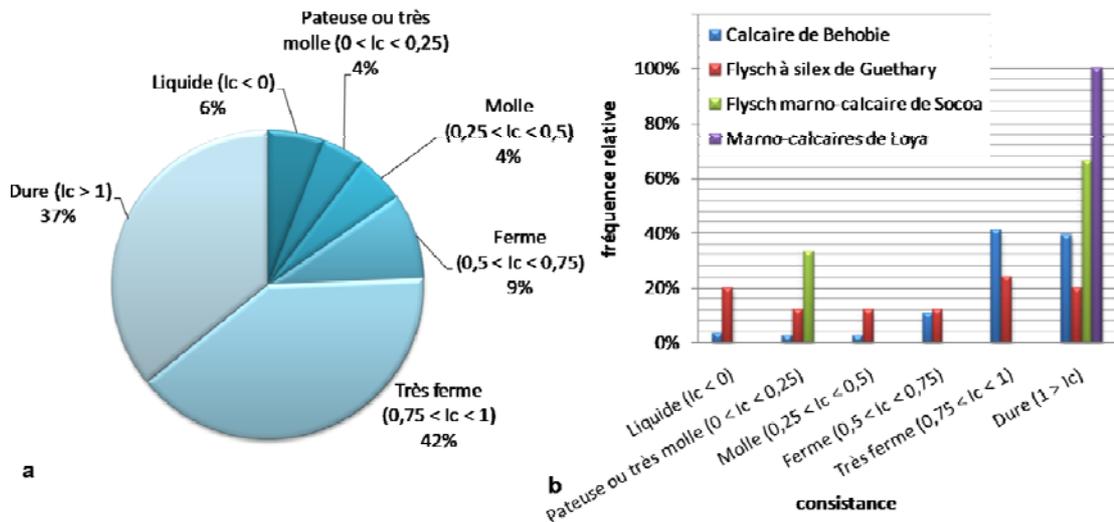


Illustration 23 : Répartition de la consistance des altérites (a), par roche-mère (b)

Là encore, des disparités apparaissent selon la roche-mère. Le Flysch à silex de Guéthary présente des valeurs d'indice de consistance très dispersées, 20% des échantillons correspondent à l'état liquide et 22% à l'état très ferme. Or, tous les échantillons ont été prélevés dans des zones instables, après des délais plus ou moins importants suivant un glissement de terrain. Ceux prélevés au sein des masses glissés peu de temps après l'événement ont des consistances liquides à molles, ce qui n'est pas surprenant puisqu'il est connu que l'augmentation de teneur en eau, à l'origine de la diminution de l'indice de consistance, est un facteur d'instabilité. A l'inverse lorsque le délai entre l'événement et le prélèvement est important ou lorsque le prélèvement n'est pas localisé dans la masse glissée, la consistance des échantillons est ferme à dure.

Comme celle de tout matériau au comportement majoritairement plastique, la teneur en eau des altérites a une importance sur leur résistance (Le Roux, 1972). Il a été recensé dans la BSS, 194 mesures de teneur en eau pondérale au sein des altérites.

Les résultats sont très variables (illustration 24a), un mode apparaissant cependant pour une teneur en eau de 20% à 30% (illustration 24b). Il apparaît, en outre, que l'altérite du Flysch à silex de Guéthary a une teneur en eau moyenne et modale supérieure à celles des autres altérites, et cela pour les raisons évoquées ci-dessus dans le cas des faibles valeurs d'indice de consistance.

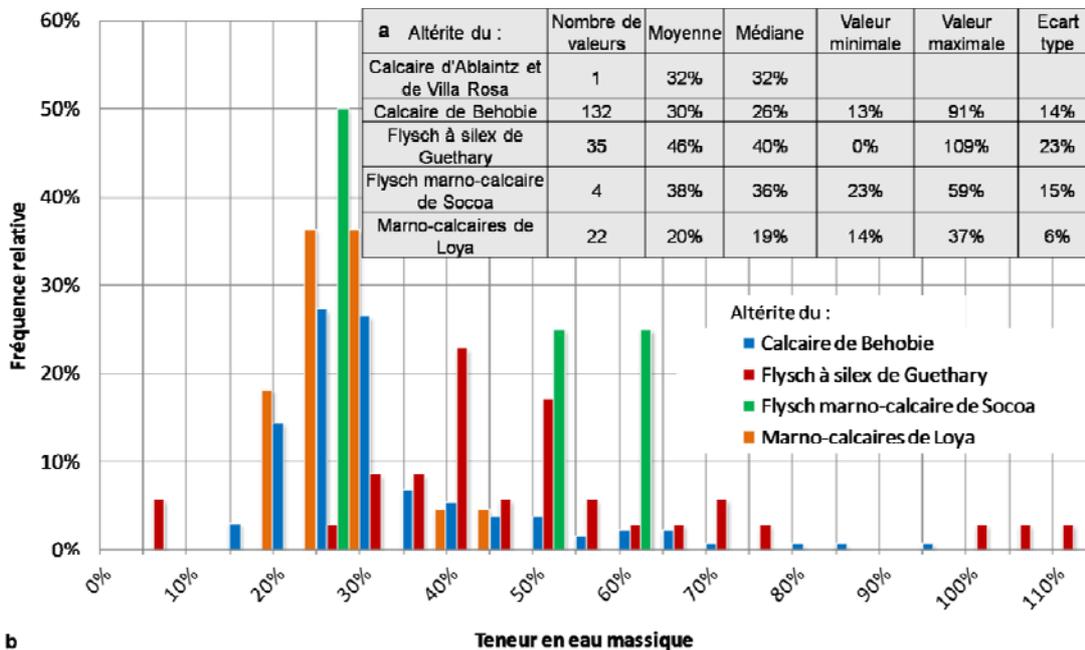


Illustration 24 : Paramètres d'état

a. Paramètres statistiques de la teneur en eau dans les altérites des marno-calcaires à faciès flysch du Cénomanién supérieur au Campanien supérieur ; b. Distribution du pourcentage de la fraction fine des altérites du Calcaire de Béhobie et du Flysch à silex de Guéthary

4.3. ESSAIS DE CARACTERISATION MECANIQUE

L'objet de ce paragraphe est l'estimation des propriétés mécaniques du matériau : le module de déformation obtenu par un essai *in situ*, l'essai pressiométrique et la cohésion et l'angle de frottement effectifs (c' et φ'), obtenus par des essais en laboratoire (essais triaxiaux).

4.3.1. Essai *in situ* : essai au pressiomètre Ménard

En France, le Pressiomètre Ménard est l'outil de base utilisé pour le dimensionnement des fondations. C'est pourquoi, de nombreux résultats d'essais pressiométriques sont archivés dans la BSS.

L'essai consiste à descendre, dans un forage, à une profondeur donnée, une sonde cylindrique gonflable. Une fois la sonde positionnée, on applique une pression horizontale radiale sur les parois du forage en augmentant la pression dans la sonde. Cet essai est un essai de cisaillement pur, non drainé dans les sols argileux (Philipponnat et Hubert, 2002) ; il fournit les valeurs de trois paramètres principaux :

- le module pressiométrique (E_M), qui est un module d'élasticité (non drainé dans les sols argileux),

- la pression de fluage nette (p_f) qui est la pression au-delà de laquelle le matériau a un comportement plastique,
- la pression limite nette (p_l) qui est la pression au-delà de laquelle le sol est en rupture. Les valeurs de rupture conventionnellement mesurées dans les différents matériaux sont présentées sur l'illustration 25.

| Classe de sol | | Description | Pression limite nette (p_l^* , MPa) |
|--|---|-----------------------------|--|
| Argiles, limons | A | Argile et limons mous | < 0,7 |
| | B | Argiles et limons fermes | 1,2 – 2,0 |
| | C | Argiles très fermes à dures | > 2,5 |
| Sables graves | A | Lâches | < 0,5 |
| | B | Moyennement compacts | 1,0 – 2,0 |
| | C | Compacts | > 2,5 |
| Marnes et Marno-calcaires | A | Tendres | 1,5 – 4,0 |
| | B | Compactes | > 4,5 |
| Roches (calcaires, schistes, granites, etc...) | A | Altérées | 2,5 – 4,0 |
| | B | Fragmentées | > 4,5 |

Illustration 25 : Catégories conventionnelles de sols et pression limite associée (Philipponnat et Hubert, 2002)

Pour les terrains concernés par l'étude, 143 valeurs de module pressiométrique (E_M), 180 valeurs de pression de fluage nette (p_f^*) et 53 valeurs de pression limite nette (p_l^*) sont disponibles dans la BSS. Les valeurs de ces paramètres de résistance mécanique sont globalement faibles et dispersées :

- pour l'ensemble des altérites, la moyenne des valeurs du module pressiométrique E_M , est située entre 7 et 13 MPa (illustration 26). Dans le cas de l'altérite du Flysch à silex de Guéthary un maximum de 110 MPa est atteint ; il est probablement la conséquence de la présence d'un reliquat de roche-mère, comme cela peut parfois être observé, au sein de l'altérite mobilisée par l'essai. Néanmoins, à l'exception du cas particulier décrit précédemment, l'ensemble des valeurs de modules pressiométriques (E_M) sont faibles, caractéristiques de matériaux à faible résistance mécanique,
- les valeurs de pression de fluage nette moyennes p_f^* (illustration 27) sont comprises entre 0,45 et 0,61 MPa,
- les valeurs de pression limite nette moyennes p_l^* , illustration 28) moyenne sont comprises entre 0,51 et 0,97 MPa. Conventionnellement, les matériaux caractérisés par une pression limite nette (p_l^*) inférieure à 0,7 MPa sont classés parmi les argiles et limons mous (illustration 25). 41,5 % des échantillons d'altérites caractérisées par un essai pressiométrique présentent de telles valeurs. Seulement 3,8 % des valeurs de pression limite nette (p_l^*) sont supérieures à 2,5 MPa, classant le matériau dans le domaine des argiles très fermes à dures. On remarque, en outre, des différences de comportement entre l'altérite du Flysch à silex de Guéthary et celle du Calcaire de

Béhobie. L'altérite du Flysch à silex est globalement plus résistante que celle du Calcaire de Béhobie.

Les différents paramètres obtenus à partir de l'essai pressiométrique caractérisent des matériaux dont la résistance est variable, mais cependant, globalement faible. La taille des hétérogénéités lithologiques (centimétriques à millimétriques) ne peut expliquer ces fluctuations : la longueur de la sonde utilisée classiquement pour cet essai est au minimum égale à 70 cm. Par contre, les variations métriques à décimétriques d'orientation des plans de stratification, liées à l'héritage de la structuration pyrénéenne dans les altérites, peuvent être la cause de l'hétérogénéité des résultats.

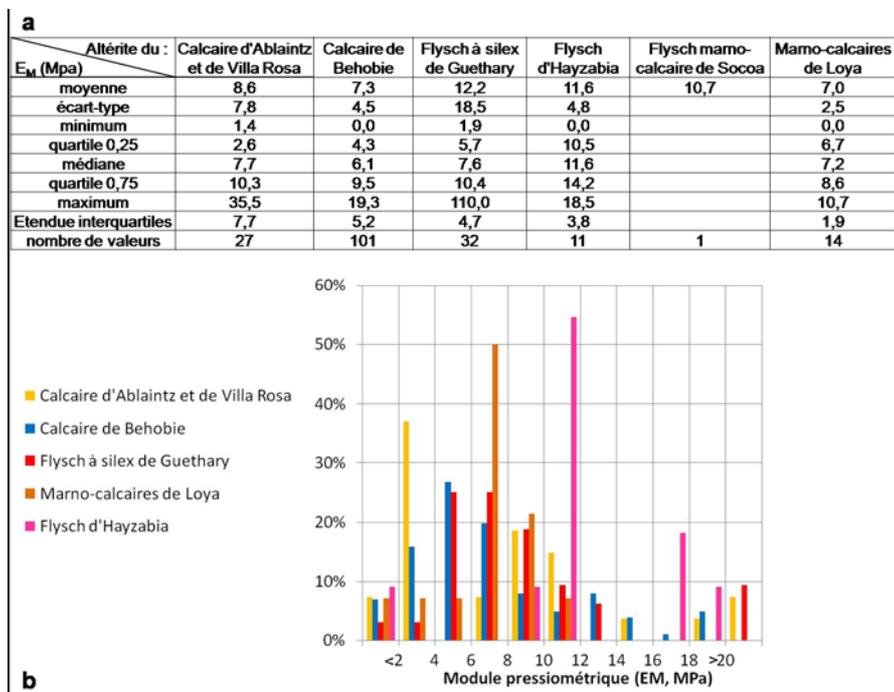


Illustration 26 : Paramètres statistiques (a) et distribution (b) des modules pressiométriques (EM en MPa) par type d'altérite de la Côte Basque

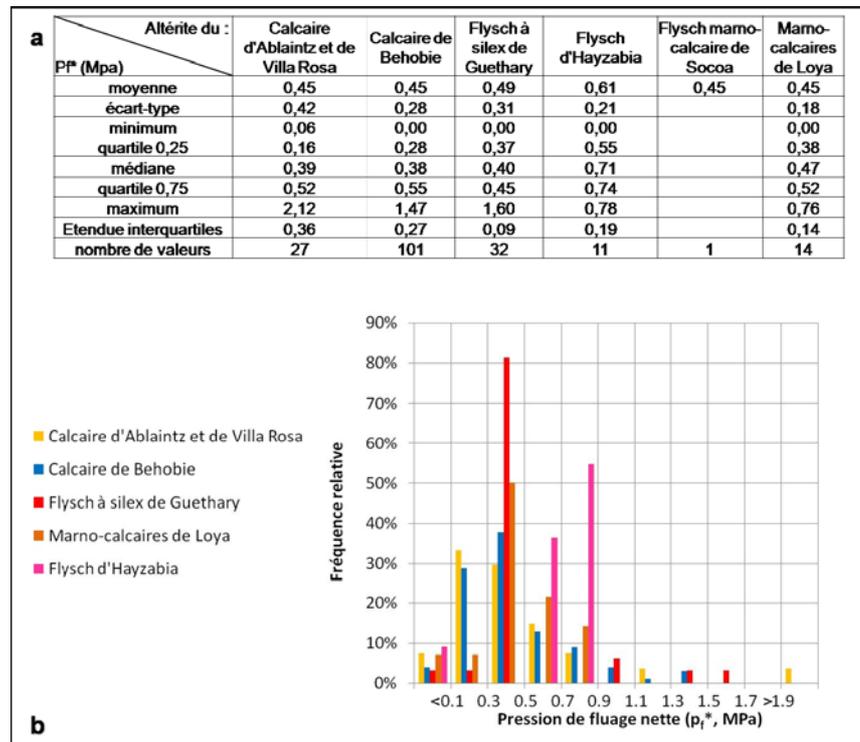


Illustration 27 : Paramètres statistiques (a) et distribution (b) des pressions de fluage nettes (p_f^* , en MPa) par altérite

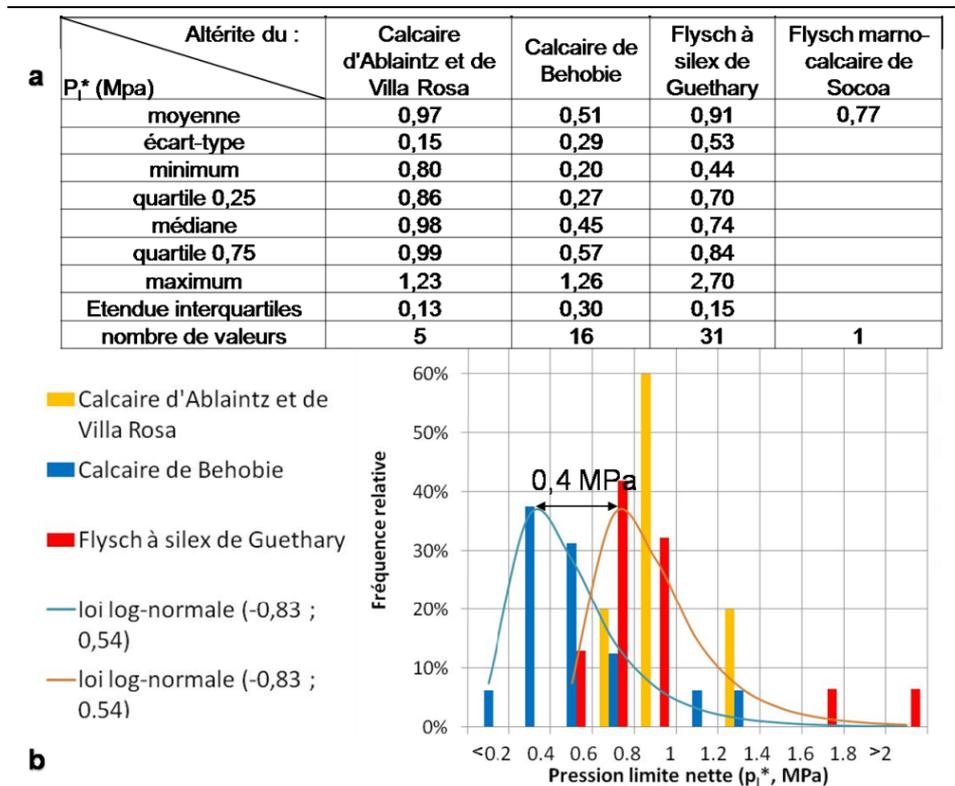


Illustration 28 : Paramètres statistiques (a) et distribution (b) des pressions limites nettes (p_l^* , en MPa) par altérite

4.3.2. Les essais triaxiaux

L'estimation des paramètres mécaniques est complétée par l'étude des résultats des essais triaxiaux (annexes 3 et 4).

L'essai triaxial est un essai en laboratoire effectué sur des échantillons non remaniés qui permet d'obtenir les caractéristiques de plasticité du matériau : l'angle de frottement interne (φ) et la cohésion (c). Il peut s'effectuer dans différentes conditions hydriques :

- essai consolidé drainé (CD), les caractéristiques obtenues sont dites effectives et notées c' et φ' , et caractérisent le comportement du matériau à long terme,
- essai consolidé non-drainé (CU),
- essai non-consolidé non-drainé (UU), les caractéristiques obtenues sont dites apparentes et notées c_{uu} et φ_{uu} , et caractérisent le comportement du matériau à court terme, alors qu'aucune consolidation n'a le temps de se produire : l'eau, considérée comme incompressible, absorbe l'ensemble des contraintes ; l'angle de frottement est par conséquent nul.

9 essais triaxiaux sont disponibles dans la BSS ; ils ont été réalisés sur les échantillons de 4 forages, 3 dans l'altérite du Flysch à silex de Guéthary et un dans l'altérite du Flysch marno-calcaire de Socoa. Ils ont permis de déterminer les caractéristiques consolidées drainées (CD) de 7 échantillons, et non consolidées non drainées (UU) de 2 échantillons (annexe 3).

Dans un matériau aussi hétérogène que l'altérite, prélever un échantillon intact sans éléments de taille supérieure à 10% du diamètre de l'éprouvette (condition nécessaire pour se préserver de l'effet d'échelle, Costet et Sanglerat, 1981), requiert d'effectuer un choix parmi les différents niveaux de l'altérite : seules les zones d'argiles ou de silts relativement compacts sans fragments de chailles sont sélectionnées. Pour des raisons techniques (notamment la taille de l'éprouvette), un biais est ainsi introduit en plus de celui habituellement créé par le choix d'un échantillon intact, dont la nature lui a déjà permis de résister aux contraintes engendrées par le forage. Il est donc indispensable d'utiliser les résultats de ces essais avec précaution.

Les essais consolidés drainés (CD) fournissent des valeurs de cohésion effectives (c') comprises entre 3 et 20 kPa et des angles de frottement effectifs (ϕ') de 20 à 32°. Les cohésions (c_u) obtenues à partir des deux essais en conditions non consolidées non drainées sont, là encore, extrêmement disparates, l'une étant égale à 79 kPa et la seconde à 23 kPa.

La variabilité dans les paramètres de résistance mécanique dans une même altérite est la conséquence de son hétérogénéité multi-échelle. Les résultats diffèrent potentiellement selon, d'une part, les niveaux lithologiques présents dans l'échantillon, et d'autre part, l'orientation de la stratification par rapport à la direction des contraintes. Ainsi, la détermination du comportement des altérites nécessiterait la réalisation d'essais sur des éprouvettes de tailles plus importantes que celle des hétérogénéités lithologiques centimétriques (la taille des éprouvettes utilisées pour les essais dont les résultats sont disponibles dans la BSS, de 3,5 cm de diamètre sur 7 cm de hauteur, est insuffisante). En outre, des cisaillements dans différentes directions seraient nécessaires à la qualification de l'anisotropie de ce matériau à l'échelle décimétrique.

Cependant, les hétérogénéités métriques à décamétriques liées aux plis, ne seraient pas estimées par ce biais et nécessiteraient des études structurales de chacune des pentes instables ainsi qu'une étude tridimensionnelle. Chaque instabilité côtière est en effet un cas particulier, qui nécessite d'une part, la détermination des paramètres et lois de comportement de l'altérite mobilisée, et d'autre part, la structure détaillée du massif.

5. Conclusion

La connaissance des caractéristiques mécaniques des formations géologiques est une étape indispensable dans l'évaluation de la stabilité des versants. Les mouvements de terrain identifiés sur le littoral de la Côte Basque se produisent majoritairement au sein de l'altérite du Flysch à silex de Guéthary.

Les cartographies de terrain ainsi que les analyses pétrographiques ont permis de caractériser ces altérites. Il apparaît ainsi que les altérites sont **des argiles silteuses, hétérogènes**, au sein desquelles sont intercalés des bancs fracturés de chailles. Elles ont conservé la structure de la roche-mère, bien qu'elles se soient tassées de plus de 50% par rapport à leur volume initial. La comparaison de l'altérite du Flysch à silex de Guéthary avec la nature lithologique de sa roche-mère a permis de démontrer que l'altération est un processus relativement peu évolué, qui a uniquement consisté en une oxydation et une dissolution des carbonates de la roche-mère, laissant en place les minéraux les moins solubles et les moins altérables.

Les archives de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sont riches en résultats d'essais et d'analyses géotechniques. Héritée de leur roche-mère, l'hétérogénéité multi-échelle des altérites a pour conséquence la fluctuation des paramètres géotechniques. Cependant, l'ensemble des résultats est caractéristique de **matériaux de faible résistance, sensibles aux variations de teneur en eau**. Dans le cadre des études de stabilité des versants, lorsque de nombreuses valeurs d'un paramètre seront disponibles, nous retiendrons les plus défavorables dans les calculs de stabilité.

6. Bibliographie

Aubié S., Peter-Borie M., en collaboration avec Sirieix C., Naudet V., Corbier P. (2008) – Suivi des conditions hydriques de la falaise d'Harotzen Costa – Commune de Guéthary (64) – Rapport BRGM/RP-56876-FR, 43 p, 20 fig.

Aubié S., Peter-Borie M. (2006) : Etude de la dynamique des mouvements de terrain à l'échelle de sites expérimentaux sur le littoral de la Côte Basque. Rapport final, BRGM/RP-54815-FR, 31 illus., 1 ann., 41 p.

Costet J. et Sanglerat G. (1981), Cours pratique de mécanique des sols, éd. Dunod, 630 p.

Foucault A. et Raoult J.-F. (2000), Dictionnaire de géologie, 5^{ème} édition, 379 p.

Genna A., Capdeville J.-P., Mallet C., Deshayes L. (2004), Observatoire de la Côte Aquitaine – Etude géologique simplifiée de la Côte Basque, BRGM-RP-53454-FR, 59 p.

Genna A., Capdeville J.-P., Dubreuilh J. et Mallet C. (2005), Evolution récente et actuelle de la Côte Basque française (analyse et perspectives), Comptes Rendus Géosciences, Géosciences de surface (Géomorphologie), Vol.337, n°16, p.1474-1483

Le Roux A. (1972). Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture, Bull. liaison Labo. des ponts et chaussées, n°61, p.155-175

Offroy B. (1984), Approche des mécanismes de sédimentation gravitaire : Exemple des dépôts carbonatés des flyschs Crétacé Supérieur des Pyrénées Atlantiques. Thèse de Doctorat, Université Paris VII, 240 p.

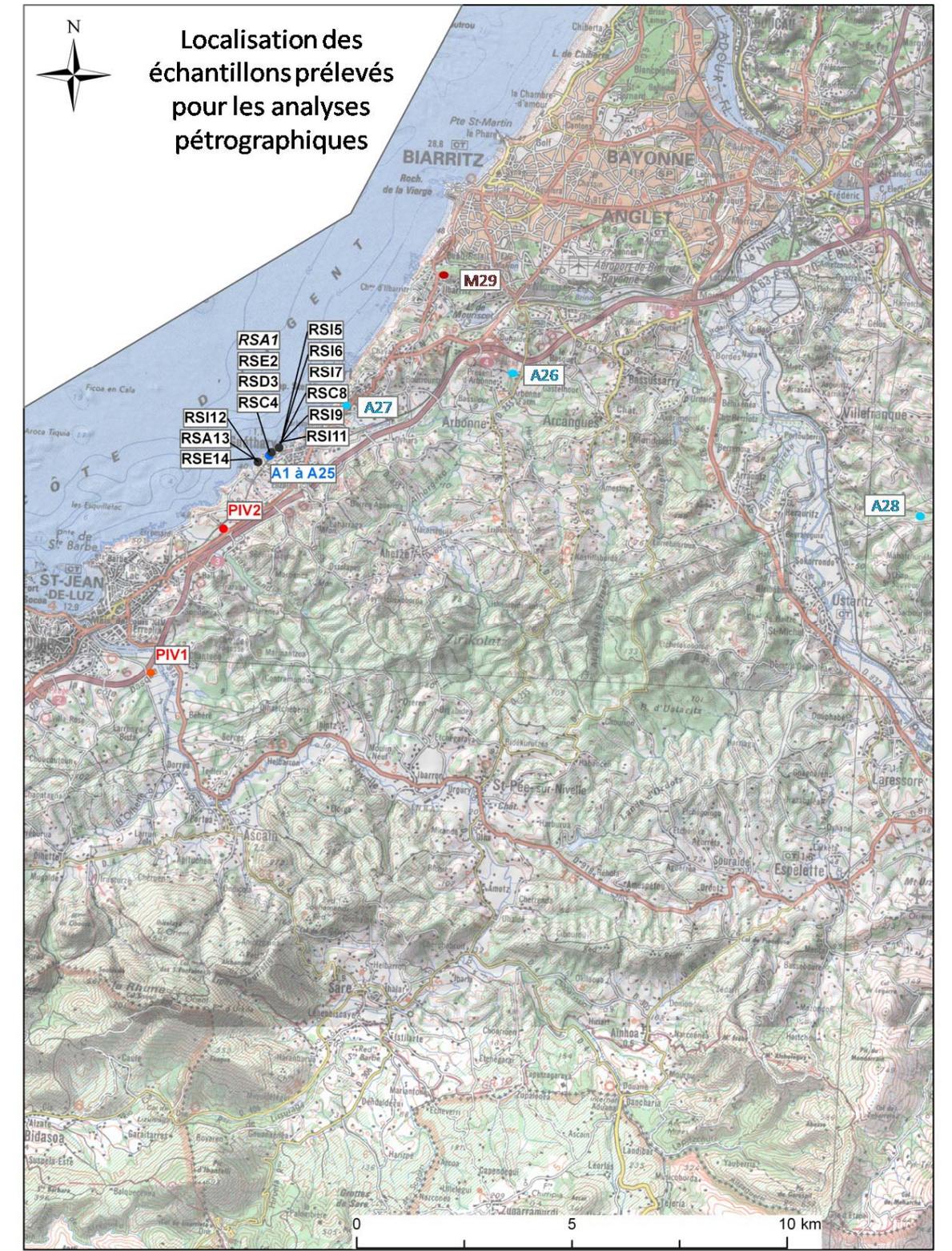
Peter-Borie M., Mallet C., Riss J., Aubié S. (2007), Evolution géomorphologique du littoral basque et conséquences sur l'érosion côtière, Résumé et communication, 23e FORUM DES JEUNES OCÉANOGRAPHERS, 13 et 14 juin 2007, Station marine d'Arcachon

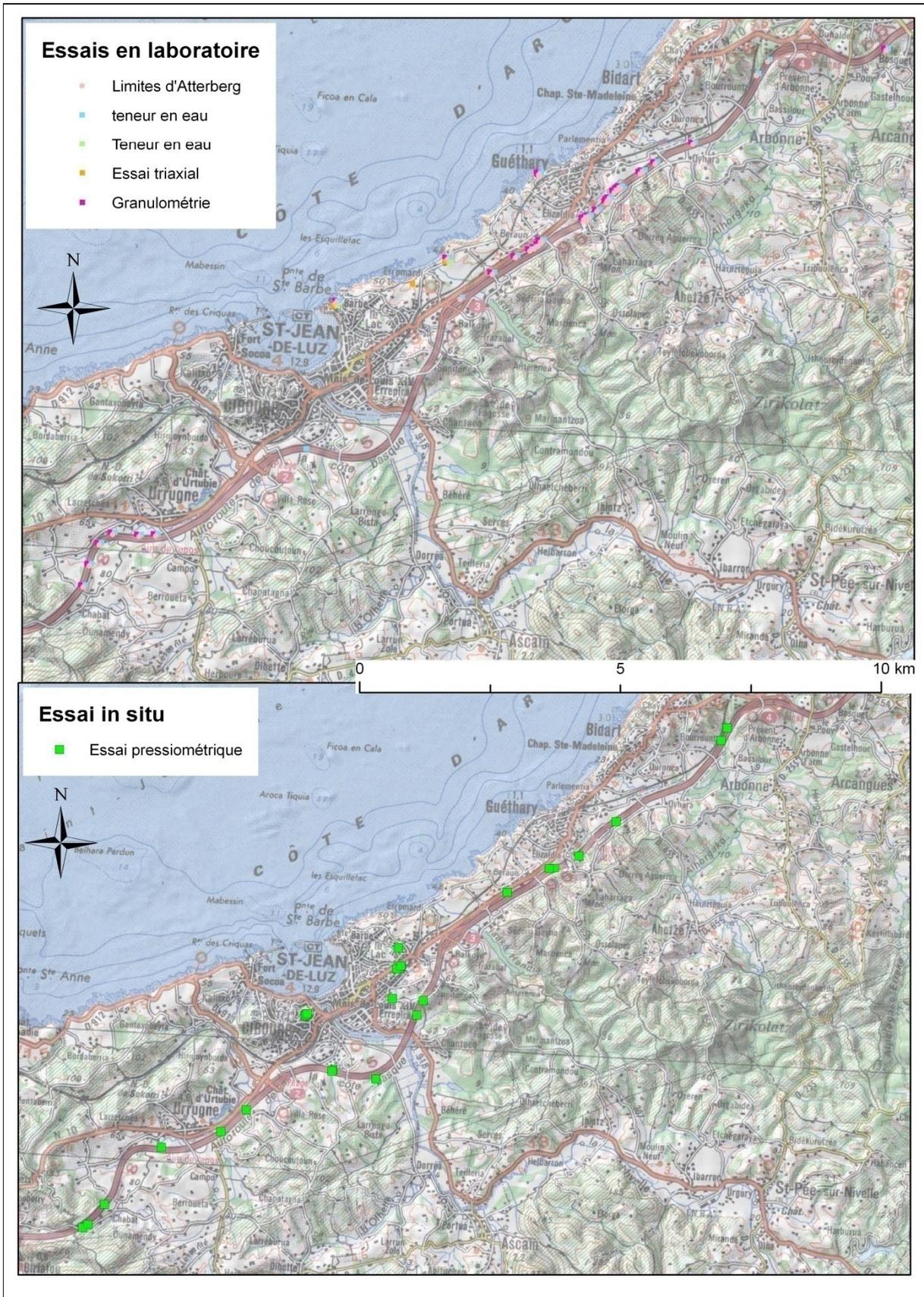
Peter-Borie M. (2008) – Caractérisation de l'altération des massifs rocheux du Pays Basque et conséquences sur l'érosion du littoral - Thèse Université de Bordeaux 1, 230 p., inédit.

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.

Annexe 1

Localisation des échantillons





Annexe 2

Description des échantillons prélevés et résultats des analyses physico-chimiques

Echantillons : description et provenance

| Altérites | | |
|-----------|--|------------------------|
| Nom | Provenance | Etat |
| A1 | Carotte de Guéthary | gréseux |
| A3 | Carotte de Guéthary | argile + silex |
| A5 | Carotte de Guéthary | très argileux, compact |
| A7 | Carotte de Guéthary | gréseux |
| A9 | Carotte de Guéthary | argileux |
| A11 | Carotte de Guéthary | Silex |
| A13 | Carotte de Guéthary | argile silteuse |
| A15 | Carotte de Guéthary | remanié - grenu |
| A17A | Carotte de Guéthary | argile |
| A17B | Carotte de Guéthary | remanié - grenu |
| A19 | Carotte de Guéthary | remanié - grenu |
| A21 | Carotte de Guéthary | argile |
| A22 | Carotte de Guéthary | argile |
| A23 | Carotte de Guéthary | gréseux |
| A24 | Carotte de Guéthary | argile |
| A25 | Carotte de Guéthary | gréseux |
| A26 | Le Pouy | argileux |
| A27 | Plage de l'Uhabia | argileux |
| A28 | Ustaritz | argileux |
| A29 | Niche d'arrachement du glissement de Guéthary | Argile sableuse |
| A30 | Affleurement au pied du glissement de Guéthary | argiles |

| Marno-calcaires | | | |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|
| Nom | Terme de Bouma (T) ou de Lowe (S) | Provenance | |
| RSA1 | Ta | Affleurement Harotzen Costa | |
| RSE2 | Te | Affleurement Harotzen Costa | |
| RSD3 | Td | Affleurement Harotzen Costa | |
| RSC4 | Tc | Affleurement Harotzen Costa | |
| LS1 | S1 | Affleurement Harotzen Costa | |
| RSI5 | Td | Affleurement Alcyons | |
| RSI6 | Td | Affleurement Alcyons | |
| RSI7 | Td | Affleurement Alcyons | |
| RSC8 | Tc | Affleurement Alcyons | |
| RSI9 | Td | Affleurement Alcyons | |
| RSI10 | Td | Affleurement Alcyons | |
| RSI11 | Te | Affleurement Senix | |
| RSI12 | Te | Affleurement Senix | |
| RSA13 | Ta | Affleurement Senix | |
| RSE14 | Te | Affleurement Senix | |
| M29 | | Pavillon royal | Marnes de Bidart |

| Alluvions récentes | |
|--------------------|--|
| Nom | Provenance |
| PIV1 | Les Barthes de St Jean de Luz ; tarière main (0,5 m) |
| PIV2 | Lavoir de Saint Jean de Luz ; tarière main (1,95 m) |

Lames minces

| Altérites | | Marno-calcaires |
|-----------|------------------|-----------------|
| A3 | Non exploitables | RSI5 |
| A9 | | RSI6 |
| A21 (x2) | | RSE14 |
| A24 (x2) | | RSI11 |
| A17a | | LS1 |
| A5 | | |
| A17b | | |
| A29 | RSC8 | |
| A30 | RSA13 | |

Diffraction des rayons X

| Minéral Echantillon | Chlorite | Smectites | Illite/mica | Kaolinite | Laboratoire d'analyse |
|---------------------|-------------------------|-----------|-------------|-----------|-----------------------|
| A1 | | 70% | 20% | 10% | Université de Lille |
| A5 | | 90% | 10% | | Université de Lille |
| A13 | | 89% | 11% | | Université de Lille |
| A17 | | 84% | 16% | | Université de Lille |
| RSE2 | 1% | 87% | 10% | 2% | Université de Lille |
| RSD3 | | 87% | 13% | | Université de Lille |
| A27 | | 90% | 9% | 1% | BRGM (MMA) |
| M29 | | 86% | 12% | 2% | BRGM (MMA) |
| A28 | 50 % (interstratifiées) | | 27% | 23% | BRGM (MMA) |
| A26 | | 37% | 63% | | BRGM (MMA) |

Calcimétrie

Réalisée au BRGM, service MMA

| Nom échantillon | Teneur en CaCo3 |
|-----------------|-----------------|
| A1 | 1.8% |
| A11 | 1.8% |
| A13 | 1.8% |
| A15 | 1.8% |
| A17A | 1.8% |
| A17B | 1.8% |
| A19 | 1.8% |
| A21 | 1.8% |
| A22 | 1.8% |
| A23 | 1.8% |
| A24 | 0.0% |
| A25 | 0.0% |
| A3 | 0.0% |
| A5 | 1.8% |
| A7 | 1.8% |

| Nom échantillon | Teneur en CaCo3 |
|-----------------|-----------------|
| A9 | 1.8% |
| RSA1 | 87.7% |
| RSA13 | 86.0% |
| RSC4 | 75.4% |
| RSC8 | 93.0% |
| RSD3 | 84.2% |
| RSE14 | 63.2% |
| RSE2 | 38.6% |
| RSI10 | 91.2% |
| RSI11 | 57.9% |
| RSI12 | 66.7% |
| RSI5 | 93.0% |
| RSI6 | 94.7% |
| RSI7 | 89.5% |
| RSI9 | 89.5% |

Chimie globale*Réalisée au BRGM, service MMA*

| | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ ¹⁷ | K ₂ O | MgO | MnO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | PF ¹⁸ | SiO ₂ | TiO ₂ |
|--------------------|--------------------------------|------|--|------------------|------|------|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Seuil de détection | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.05 | 0.2 | 0.02 | 0.2 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.05 |
| unité | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| A1 | 3.9 | 0.2 | 3.87 | 0.45 | < LQ | 0.02 | < LQ | < LQ | 3.78 | 87.7 | 0.17 |
| A5 | 16.6 | 0.2 | 3.97 | 2.29 | 2.2 | 0.09 | < LQ | 0.1 | 14.5 | 59.4 | 0.71 |
| A13 | 2.2 | < LQ | 1.73 | 0.3 | < LQ | 0.04 | < LQ | 0.05 | 2.7 | 93.1 | 0.1 |
| A17A | 17.8 | 0.2 | 4.7 | 2.7 | 2.1 | 0.1 | < LQ | 0.14 | 13.6 | 57.8 | 0.75 |
| A25 | 6 | 0.3 | 2.72 | 0.92 | 0.7 | 0.07 | < LQ | 0.05 | 5.35 | 83.4 | 0.25 |
| RSE2 | 9.5 | 19 | 2.09 | 1.59 | 1.5 | 0.02 | 0.2 | 0.05 | 22.8 | 42.4 | 0.36 |
| RSD3 | 1.6 | 46.4 | 0.75 | 0.2 | 0.5 | 0.03 | < LQ | < LQ | 37.7 | 11.6 | 0.06 |
| RSC4 | 2.6 | 43 | 0.92 | 0.26 | 0.7 | 0.02 | < LQ | 0.06 | 36.3 | 15.5 | 0.11 |
| RSA13 | 1.2 | 45.8 | 0.72 | 0.17 | 0.5 | 0.04 | < LQ | < LQ | 37.9 | 11.9 | 0.05 |
| PIV1 | 12.4 | 0.4 | 4.53 | 2.01 | 0.7 | 0.13 | < LQ | 0.11 | 7.13 | 71.2 | 0.55 |
| PIV2 | 6.5 | 0.3 | 3.86 | 0.84 | 0.3 | 0.07 | < LQ | 0.06 | 5.43 | 82.2 | 0.52 |

Cortèges minéralogiques calculés à partir des essais et analyses

| | Quartz | Smectites | Illite | Kaolinite | Goéthite | Calcite | Chlorite |
|-------|--------|-----------|--------|-----------|----------|---------|----------|
| A1 | 82% | 10% | 3% | 1% | 4% | | |
| A5 | 23% | 62% | 1% | | 4% | | |
| A13 | 90% | 7% | 1% | | 2% | | |
| A17A | 16% | 63% | 12% | | 5% | | |
| A25 | 73% | 19% | 4% | | 3% | | |
| RSE2 | 26% | 38% | 4% | 1% | 3% | 24% | |
| RSD3 | 12% | 8% | 1% | | 1% | 74% | |
| RSC4 | 14% | 13% | 2% | | 1% | 67% | |
| RSA13 | 14% | 6% | 1% | | 1% | 74% | |
| PIV1 | 46% | 32% | 9% | 5% | 5% | | 1% |
| PIV2 | 71% | 16% | 5% | 2% | 4% | | |

Annexe 3 :

Statistiques des différents essais

Les paramètres d'état des altérites

| | humide (kg,m ⁻³) | sèche (kg,m ⁻³) | | saturation | vides | massique |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|------|------------|-------|----------|
| Nombre de valeurs | 15 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| moyenne | 1718 | 1171 | 57% | 88% | 1,35 | 46% |
| Valeur minimale | 1580 | 920 | 49% | 63% | 0,95 | 26% |
| Quartile 0,25 | 1645 | 1060 | 54% | 80% | 1,14 | 34% |
| Médiane | 1680 | 1180 | 56% | 92% | 1,29 | 38% |
| Quartile 0,75 | 1790 | 1290 | 61% | 100% | 1,55 | 59% |
| Valeur maximale | 1931 | 1390 | 66% | 100% | 1,93 | 72% |
| Ecart type | 108,62 | 150,66 | 5% | 13% | 0,32 | 15% |
| Coefficient de variation | 6.3% | 12.9% | 8.8% | 14.8% | 23.7% | 32.6% |

Les limites d'Atterberg des altérites des marno-calcaires à faciès flysch du Cénomanién supérieur au Campanien supérieur et des indices associés

| Altérite du : | Paramètre : | WL | Wp | Ip | Ic |
|--------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-------|
| Calcaire d'Ablaintz et de Villa Rosa | Nombre de valeurs | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Valeurs | 51% | 30% | 21% | 0,90 |
| Calcaire de Béhobie | Nombre de valeurs | 125 | 125 | 125 | 122 |
| | Moyenne | 53% | 24% | 29% | 0,87 |
| | Ecart-type | 13% | 6% | 8% | 0,44 |
| | Minimum | 29% | 13% | 11% | -1,60 |
| | Médiane | 53% | 23% | 29% | 0,93 |
| | Maximum | 91% | 45% | 49% | 1,62 |
| Flysch à silex de Guéthary | Nombre de valeurs | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | Moyenne | 76% | 35% | 41% | 0,50 |
| | Ecart-type | 13% | 8% | 13% | 0,62 |
| | Minimum | 43% | 25% | 16% | -0,91 |
| | Médiane | 80% | 33% | 40% | 0,70 |
| | Maximum | 95% | 53% | 67% | 1,58 |
| Flysch marno-calcaire de Socoa | Nombre de valeurs | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | Moyenne | 71% | 42% | 29% | 1,18 |
| | Ecart-type | 10% | 8% | 3% | 0,73 |
| | Minimum | 63% | 35% | 25% | 0,18 |
| | Médiane | 64% | 38% | 29% | 1,45 |
| | Maximum | 85% | 53% | 32% | 1,90 |
| Marno-calcaires de Loya | Nombre de valeurs | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Moyenne | 53% | 32% | 21% | 1,49 |
| | Ecart-type | 16% | 8% | 9% | 0,37 |
| | Minimum | 27% | 17% | 10% | 1,02 |
| | Médiane | 53% | 35% | 21% | 1,36 |
| | Maximum | 71% | 40% | 32% | 2,02 |
| Toutes les altérites | Nombre de valeurs | 159 | 159 | 159 | 156 |
| | Moyenne | 57% | 27% | 30% | 0,84 |
| | Ecart-type | 16% | 8% | 10% | 0,52 |
| | Minimum | 27% | 13% | 10% | -1,60 |
| | Médiane | 55% | 25% | 30% | 0,91 |
| | Maximum | 95% | 53% | 67% | 2,02 |

Les essais triaxiaux consolidés drainés

| Type d'essai | Cohésion c (kPa) | Angle de frottement interne ϕ (°) | Roche-mère | Profondeur d'échantillonnage (m) | Commentaires/description des échantillons |
|--------------|------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|---|
| CD | 10 | 25 | Flysch à silex de Guéthary | ? | Argile silteuse compacte |
| | 20 | 20 | Flysch à silex de Guéthary | 4,80-4,95 | Argile plastique |
| | 10 | 27 | Flysch à silex de Guéthary | 4,95-5,10 | Limon consistant |
| | 12 | 27 | Flysch à silex de Guéthary | 5,20-5,50 | Limon mi-consistant |
| | 10 | 26 | Flysch à silex de Guéthary | 2,00-2,50 | Limon argileux consistant |
| | 3 | 21 | Flysch à silex de Guéthary | 6,00-6,50 | Argile limoneuse consistante, présence de fragments de chailles |
| | 10 | 32 | Flysch marno-calcaire de Socoa | 2,30-2,70 | Alternance horizontale de limons et d'argiles |
| UU | 79 | 0 | Flysch à silex de Guéthary | 4,00-4,50 | Argile limoneuse varvée et fragments rocheux |
| | 23 | 0 | Flysch à silex de Guéthary | 4,80-5,10 | Limon argileux mi-consistant |

Annexe 4 : Méthode d'imprégnation des échantillons d'altérites

Méthode élaborée à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) par Pierre Christe.

Imprégnation de roches par résine à faible viscosité.



La résine se compose de 60% d'Araldit Dy 026SP mélangée à 40% de Laromin C 260 (durcisseur). Les meilleures conditions de fluidité sont réunies si la résine est préchauffée à 50°C.

Les éléments de la cellule d'imprégnation sont illustrés ci-dessous. Ils comprennent une cellule principale dont le couvercle est cellé par 4 tiges de serrage. Le couvercle possède un raccordement pour la connection à une pompe vacuum. Un cylindre d'imprégnation vient se glisser à l'intérieur de la cellule principale. La carotte de roche est ensuite placée dans ce cylindre et baignée dans la résine.



Une fois la cellule montée, elle est placée sur une plaque préchauffée à 50°C puis connectée à une pompe à vide.

L'imprégnation se passe selon le schéma suivant:

- 1) Faire le vide (env. 1 bar).
- 2) Laisser sous vide pendant 15 min.
- 3) Libérer du vide.
- 4) Répéter une nouvelle fois les points 1-3.
- 5) Sortir l'échantillon et faire durcir au four à 50°C pendant au moins 3 heures.

Pour assurer la bonne pénétration de la résine dans tout l'échantillon, nous remplaçons la gaine de forage par un treillis métallique fin avant de plonger la carotte dans le bain de résine.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

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