

Modélisation des instabilités dans les flyschs et les altérites associées sur le littoral Basque français

Rapport final

BRGM/RP-57056-FR
septembre 2009

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

Peter-Borie M., Gentier S.
en collaboration avec 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 :

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

Peter-Borie M., Gentier S. en collaboration avec Aubié S. (2009) – Modélisation des instabilités dans les flyschs et les altérites associées sur le littoral basque français (64), rapport BRGM/RP-57056-FR, 59 p, 25 illus., 1 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 dont les objectifs principaux 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.

La présente étude technique, menée conjointement par le BRGM et le GHYMAC (Université Bordeaux 1, ex-CDGA) s'inscrit dans ce contexte et est extraite 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 ».

Elle se focalise sur l'analyse des instabilités de terrain qui affectent les altérites, formation géologique issue de l'altération des flyschs crétacés supérieurs. A partir des connaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, il s'agit d'identifier et de recenser les principaux facteurs à l'origine de ces instabilités et de les modéliser.

Les instabilités de terrain sont les résultats de l'action conjuguée de différents facteurs qui prédisposent et préparent une zone à la rupture, mais un seul phénomène la provoque, c'est le facteur déclenchant. Le glissement de terrain du site d'Harotzen Costa à Guéthary et ceux, datés et localisés à proximité se sont produits au cours ou peu de temps après un événement pluvieux important. Les précipitations apparaissent, dans les cas décrits sur Harotzen Costa, comme le facteur déclenchant la rupture par l'augmentation, d'une part, de la teneur en eau dans l'altérite et, d'autre part, du niveau de la nappe contenue dans l'horizon karstifié.

L'érosion du pied de falaise par les agents marins n'apparaît pas être impliqué dans le glissement d'Harotzen Costa, de même que dans de nombreux autres glissements dont le pied de la surface de rupture est situé hors d'atteinte de la houle.

Ces analyses et observations ont permis l'élaboration d'un outil d'estimation de l'aléa dans l'altérite. Basé sur la présence des facteurs de prédispositions et déclenchants, cet outil permettra de faire évoluer la cartographie de l'aléa en fonction des nouvelles connaissances hydrogéomécaniques.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	9
2. CONTEXTE GEOLOGIQUE, GEOTECHNIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	11
2.1. GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.....	11
2.2. CONTEXTE GEOTECHNIQUE	11
2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	12
3. ANALYSE DES PROCESSUS A L'ORIGINE DES INSTABILITES	15
3.1. ETUDE DE CAS : LE GLISSEMENT D'HAROTZEN COSTA SUR LA COMMUNE DE GUETHARY.....	15
3.1.1. <i>Les faits</i>	15
3.1.2. <i>Description de la géométrie du glissement</i>	16
3.1.3. <i>Evolution</i>	19
3.1.4. <i>Historique du site</i>	23
3.1.5. <i>Synthèse : le scénario de rupture du glissement de Guéthary</i>	27
3.2. LES FACTEURS ET PROCESSUS A L'ORIGINE DES INSTABILITES DANS LES ALTERITES	27
3.2.1. <i>Facteurs de prédisposition</i>	28
a) <i>La lithologie</i>	28
b) <i>La structure du massif</i>	28
c) <i>L'état altéré</i>	29
3.2.2. <i>Facteurs de préparation</i>	29
a) <i>Les facteurs climatiques</i>	29
b) <i>La tectonique</i>	29
c) <i>Les facteurs morphologiques</i>	30
d) <i>Le facteur océanique</i>	30
3.2.3. <i>Facteurs aggravants et déclenchants</i>	30
a) <i>Les facteurs océaniques</i>	31
b) <i>Les événements climatiques exceptionnels</i>	31
c) <i>Autres</i>	32
3.2.4. <i>Facteur anthropique</i>	32
3.3. MODELISATION CONCEPTUELLE DES PROCESSUS A L'ORIGINE DE LA RUPTURE ...	33
3.3.1. <i>Processus associés à un événement pluvieux exceptionnel</i>	33
3.3.2. <i>Processus associés aux facteurs océaniques</i>	35
d) <i>Tempêtes</i>	35
3.4. MODELISATION NUMERIQUE DES PROCESSUS DE RUPTURE	35
3.4.1. <i>Objectifs et méthodes</i>	35
3.4.2. <i>Paramètres</i>	36
3.4.3. <i>Scénario 1</i>	39
3.4.4. <i>Scénario 2</i>	42
3.4.5. <i>Scénario 3</i>	46
3.4.6. <i>Etude de la stabilité du profil de versant après glissement</i>	47

4. OUTIL DE DETERMINATION PONCTUELLE DE L'ALEA LIE AUX ALTERITES..	49
4.1. PRINCIPE	49
4.1.1. Base de données « mouvements de terrain ».....	50
4.1.2. Observations de terrain.....	50
e) Observations sur documents cartographiques	50
f) Géologie	51
g) Morphologie.....	51
h) Les conditions hydrogéologiques initiales	52
i) Autres	52
4.1.3. Fiche synthétique	52
5. CONCLUSION.....	57
6. BIBLIOGRAPHIE	59

Liste des illustrations

Illustration 1 : Bloc diagramme conceptualisant les grands principes d'écoulement souterrain au sein du profil d'altération.....	14
Illustration 2 : Panorama du glissement de Guéthary (29 janvier 2004)	15
Illustration 3 : a. Précipitations mensuelles de l'année précédant le glissement de terrain et précipitations mensuelles moyennes ; b. Précipitations journalières au moment de la rupture (Source : MétéoFrance, 2008, Station de Socoa).....	16
Illustration 4 : a. Profils topographiques avant rupture (estimation à partir du profil topographique levé à l'est du glissement à l'occasion d'une campagne de mesures géophysiques au mois de juillet 2004, Gourry, 2005), après rupture (juillet 2004 ; levé effectué dans le glissement au cours de cette même campagne) et estimation de la localisation de la surface de rupture du glissement de Guéthary ; b. Vue en plan (Image satellite provenant de Google Earth).....	17
Illustration 5 : Caractéristiques de la géométrie du glissement selon la nomenclature de l'IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment, 1990 ; illustration 5) six mois après le glissement (juillet 2004)	17
Illustration 6 : Coupe et vue de dessus simplifiées d'un glissement de terrain de type rotationnel et nomenclature (IAEG, 1990)	18
Illustration 7: Evolution du glissement (1/2).....	20
Illustration 8 : Evolution du glissement (2/2).....	21
Illustration 9 : Evolution du profil du glissement de 2004 à 2008	22
Illustration 10 : Glissements de terrain recensés sur les reliefs côtiers de Guéthary à partir de l'étude des photographies aériennes (fond cartographique : © Ortholittoral, 2000).....	25

Illustration 11 : Dégâts consécutifs aux instabilités sur le secteur de Guéthary entre 1938 et 2008 (fond cartographique : photographie aérienne 1938, IGN).....	25
Illustration 12 : Indices de fluage en centre ville de Guéthary (Image satellite Google Earth 2008)	26
Illustration 13 : Précipitations mensuelles en 1959 et en 1986 et moyennes mensuelles entre 1921 et 2008 à Socoa (Source : Météo France, 2008)	26
Illustration 14 : Conduite d'eau dans un glissement observé sur le littoral luzien ; b. Escarpement principal d'un glissement sur la commune de Saint-Jean-de-Luz et (c) système de drainage des eaux de pluie du chemin littoral situé dans la zone sommitale, qui les conduit directement en haut du versant.	33
Illustration 15 : Conceptualisation des processus à l'origine de la rupture d'une pente (p : pressions induites par la masse des nappes perchées ; σ : contraintes générées par une nappe semi-captive dans les marno-calcaires)	34
Illustration 16 : a. Géométrie du modèle ; A, B, et C correspondent aux points des différents suivis (déplacement et vitesse de déplacement) ; b. maillage, conditions aux limites et localisation des différents matériaux dans le cas d'une saturation de l'altérite correspondant à la zone (1) et une surface piézométrique de la nappe à la base de l'altérite située 4 m au-dessus de l'interface.	38
Illustration 17 : Propriétés géotechniques des différents matériaux utilisés dans la modélisation	39
Illustration 18 : Définition des régions excavées au cours du scénario 3	39
Illustration 19 : Augmentation du déplacement et disposition des régions entrées en plasticité en cisaillement et en traction, avec une surface piézométrique de la nappe à une altitude supérieure de (a) 2 m et (b) 4 m à celle de la base de l'altérite	41
Illustration 20 : a. Déplacements du matériau pour l'état Z4m du scénario 1 ; b. historique des déplacements aux points A, B et C	42
Illustration 21 : Comparaison des indicateurs de plasticité et des déplacements horizontaux de l'état Z3m des scénarios 1(a) et 2 (b ; les résultats pour les scénarios 2a à 2c sont similaires, seul le scénario 2a est présenté sur la figure)	43
Illustration 22 : a. Déplacements du matériau pour l'état Z4m du scénario 2; b. historique des déplacements aux points A, B et C	44
Illustration 23 : Résultats de la saturation progressive de l'altérite (pas de nappe à la base de l'altérite) : a. scénario 2a ; b. scénario 2b ; c. scénario 2c	45
Illustration 24 : Géométrie du versant après simulation d'une excavation en pied du versant.....	46
Illustration 25 : Modèle de relief côtier avec la topographie post-glissement ; l'escarpement est instable ($F = 0,90$).....	47

Liste des annexes

Annexe 1 Caractéristiques de rupture du glissement de La Muserie à Guéthary (d'après la fiche-type définie par Laugier, 2002)	63
---	----

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 dont les objectifs principaux 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.

La présente étude, menée conjointement par le BRGM et le GHYMAC (Université Bordeaux 1, ex-CDGA) s'inscrit dans ce contexte et est extraite 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 ».

Elle se focalise sur l'étude des instabilités de terrain qui affectent les altérites, formation géologique issue de l'altération des flyschs crétacés supérieurs. A partir des connaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, il s'agit d'identifier et de recenser les principaux facteurs à l'origine de ces instabilités et de les modéliser.

L'objectif étant de pouvoir proposer un outil de détermination systématique de l'aléa mouvement de terrain lié à l'altérite permettant de compléter et de faire évoluer régulièrement et rapidement la première estimation de l'aléa mouvements de terrain réalisée en 2005.

2. Contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique de la zone

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone d'étude 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).

Les marno-calcaires à faciès flysch du Crétacé supérieur forment les deux-tiers des reliefs littoraux actuels du Pays Basque français. Ils sont divisés en plusieurs unités lithostratigraphiques :

- le **Flysch à silex de Guéthary** (Coniacien inférieur), le **Flysch marno-calcaire de Socoa** (Coniacien supérieur à Santonien moyen) et le **Flysch d'Hayzabia**, comprenant la Turbidite de Makila et les Marno-calcaires de Loya (Santonien supérieur à Campanien moyen) qui affleurent sur le littoral,

- le **Calcaire d'Ablaintz et de Villa Rosa** (Cénomaniens supérieur à Turonien inférieur) et le **Calcaire de Béhobie** (Turonien moyen à supérieur), présents dans l'arrière-pays proche.

Ces roches ont subi, au cours du Néogène, une ou des phases d'altération à l'origine du développement d'altérites argilo-silteuses (Peter-Borie M., Aubié S, 2009). La transition de la roche-mère saine à l'altérite se fait par l'intermédiaire d'un horizon karstifié, caractérisé par la présence de conduits de type karstique dans lesquels subsiste parfois encore l'altérite en place. Cet horizon se développe entre un front de saprolitisation (au contact avec l'altérite) et un front d'altération (au contact avec la roche-mère saine). Ce dernier a pénétré le plus profondément dans les faciès les plus carbonatés ; l'épaisseur d'altérites peut alors atteindre plusieurs dizaines de mètres.

2.2. CONTEXTE GEOTECHNIQUE

Les archives de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sont riches en résultats d'essais et d'analyses géotechniques (Peter-Borie M et Aubié, 2009). Les éléments décrits dans ce paragraphe sont extraits du rapport BRGM/RP-57055-FR. Les différents types d'altérite des marno-calcaires à faciès flysch du Crétacé supérieur ont pu être pris en compte dans l'étude des paramètres géotechniques avec, cependant, des différences importantes du nombre de valeurs disponibles pour chacun des paramètres : les teneurs en eau, les limites d'Atterberg et les données pressiométriques de l'altérite du Calcaire de Béhobie sont, par exemple, nombreuses (plus de cent mesures) alors qu'aucun essai triaxial pour cette formation n'est disponible. En revanche, dans le cas de l'altérite du Flysch à silex de Guéthary, formation la plus représentée sur le littoral, les résultats de l'ensemble des essais

d'identification et de caractérisation mécanique sont présents dans la BSS. Cependant, certaines données sont en faible quantité et ont été complétées grâce à la réalisation d'essais supplémentaires (Peter-Borie M et Aubié, 2009).

Héritée de leur roche-mère, l'hétérogénéité multi-échelle des altérites a pour conséquence la fluctuation des paramètres géotechniques. L'ensemble des résultats est caractéristique de matériaux de faible résistance, sensibles aux variations de teneur en eau, en accord avec leur composition lithologique. Des fluctuations de ces caractéristiques apparaissent parfois avec la nature de la roche-mère. Les limites d'Atterberg notamment, ont permis de mettre en évidence une variation du comportement des altérites des principales formations géologiques qui affleurent sur le littoral. Cependant, cette variation des paramètres d'Atterberg avec le faciès de la roche-mère ne transparait pas dans les propriétés mécaniques. De potentielles corrélations fonctions de la nature de la roche-mère sont, en effet, la plupart du temps masquées par les fluctuations importantes des paramètres mesurés, propres à chaque altérite. Dans le cadre des études de stabilité des versants, lorsque de nombreuses valeurs d'un paramètre sont disponibles, nous retiendrons celles qui seront les plus défavorables à la stabilité ; les quartiles sont préférés aux extrema qui peuvent être dus soit à des erreurs de mesure soit à des valeurs atypiques.

Outre la détermination de paramètres pour les calculs de stabilité, l'étude de la distribution des différentes valeurs a permis de mettre en évidence un comportement particulier des altérites en présence d'eau. D'une part, certaines zones sont sous-consolidées, caractérisées par une masse volumique humide saturée très faible, inférieure à celle insaturée, et par une forte porosité. Cette sous-consolidation est interprétée comme héritée des processus d'altération. D'autre part, en d'autres endroits, le matériau saturé présente des caractéristiques plus classiques : sa masse volumique est supérieure à celle mesurée en milieu insaturé.

2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Deux types de nappes d'eau ont été mis en évidence dans la zone étudiée : des nappes perchées au sein des altérites et une ou des nappes localisées dans l'horizon karstifié, semi-captives sous les altérites (Peter-Borie M et al, 2009). L'illustration 1 est une représentation schématique conceptuelle de la position de ces nappes dans le contexte géologique.

Les quelques mesures et analyses effectuées ont permis d'obtenir des résultats dont la dispersion importante préfigure de la complexité des systèmes aquifères :

- d'une part, au sein des altérites, les données de la sonde Humitub ont mis en évidence des circulations d'eau hétérogènes et anisotropes. Ces hétérogénéités sont interprétées comme les conséquences de la structure hétérogène des altérites qui est à l'origine d'une chenalisation des flux hydriques par les niveaux les plus perméables de l'altérite : bancs de chailles fracturés et niveaux les plus silteux d'échelle centimétrique. Au cours de la période d'étude, on observe une période caractérisée par une faible humidité du massif d'altérite, l'été et l'automne, et, une période caractérisée par une humidité du massif élevée, le printemps. Au cours de telles périodes, des variations locales d'humidité peuvent être observées,

▪ d'autre part, au sein de l'horizon karstifié, des circulations d'eau ont été mises en évidence par un dispositif de tomographie électrique et par un réseau piézométrique. Elles sont chenalisées par des conduits, là où les nappes associées sont le plus souvent semi-captives sous les altérites. Les niveaux piézométriques et débits associés de la ou des nappes de l'horizon karstifié apparaissent reliés aux précipitations dans un délai très court ; les zones de lapiez où affleure l'horizon karstique peuvent alors former les zones d'infiltration. En outre, les falaises littorales, qui, par leur géométrie, peuvent être à l'origine d'un fort gradient hydraulique, drainent une partie de cet aquifère.

Ces premiers résultats nécessitent cependant d'être complétés par des suivis au cours de périodes plus longues et la mise en place d'un réseau d'ouvrages plus dense et plus homogène, de façon à être en mesure, in fine, de quantifier les apports d'eau aux reliefs côtiers. Dans le cadre de l'étude des instabilités littorales, ces circulations hydrogéologiques sont, en effet, potentiellement déstabilisatrices. Leurs effets sur les instabilités littorales sont étudiés dans le chapitre suivant, à partir de la rétro-analyse du glissement de terrain qui s'est produit à Harotzen Costa (Guéthary) en janvier 2004.

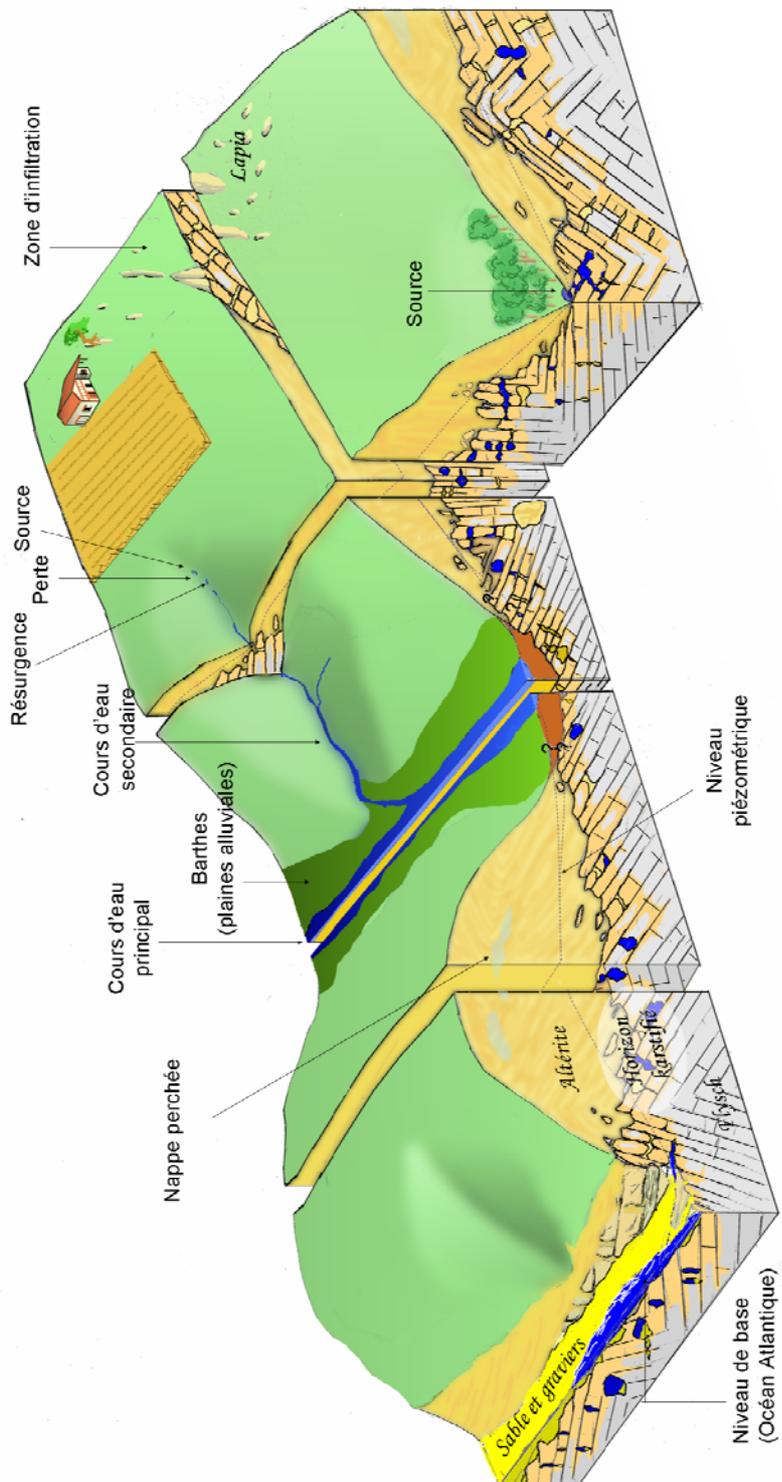


Illustration 1 : Bloc diagramme conceptualisant les grands principes d'écoulement souterrain au sein du profil d'altération

3. Analyse des processus à l'origine des instabilités

L'objectif de ce chapitre est de comprendre par quels processus, au regard des nouvelles connaissances géologiques, géotechniques et hydrogéologiques, les reliefs formés par les altérites, siège de 63 % des instabilités recensées sur le littoral, sont déstabilisés. Pour cela, nous proposons ici l'étude détaillée du glissement qui s'est produit sur le site d'Harotzen Costa sur la commune de Guéthary. Ce glissement, est similaire à la majorité des instabilités recensées : comme 90% des instabilités dans les altérites, c'est un glissement circulaire, et, la base de la surface de rupture est situé, comme dans 85 % de ces mouvements, à une altitude proche du niveau de la mer. A partir de cette étude, les facteurs et processus potentiellement à l'origine de la rupture sont recensés, puis, leurs effets et le mode de rupture sont étudiés à partir de la rétro-analyse du glissement du site d'Harotzen Costa par modélisation numérique.

3.1. ETUDE DE CAS : LE GLISSEMENT D'HAROTZEN COSTA SUR LA COMMUNE DE GUETHARY

3.1.1. Les faits

Le 24 janvier 2004, un glissement de terrain emporte une partie de la propriété de La Muserie située sur les reliefs côtiers d'Harotzen Costa de la commune de Guéthary (illustration 2). C'est l'un des nombreux glissements qui mobilisent généralement l'altérite sur le littoral de Guéthary. Celui-ci s'est produit consécutivement à une journée particulièrement pluvieuse (plus de 50 mm en 24 h, illustration 3b). Ces fortes précipitations font suite à un été très sec, puis à un automne et un hiver au cours desquels il y a eu un cumul des précipitations supérieur de 140 mm aux valeurs moyennes mesurées depuis 1921 (illustration 3a).



Illustration 2 : Panorama du glissement de Guéthary (29 janvier 2004)

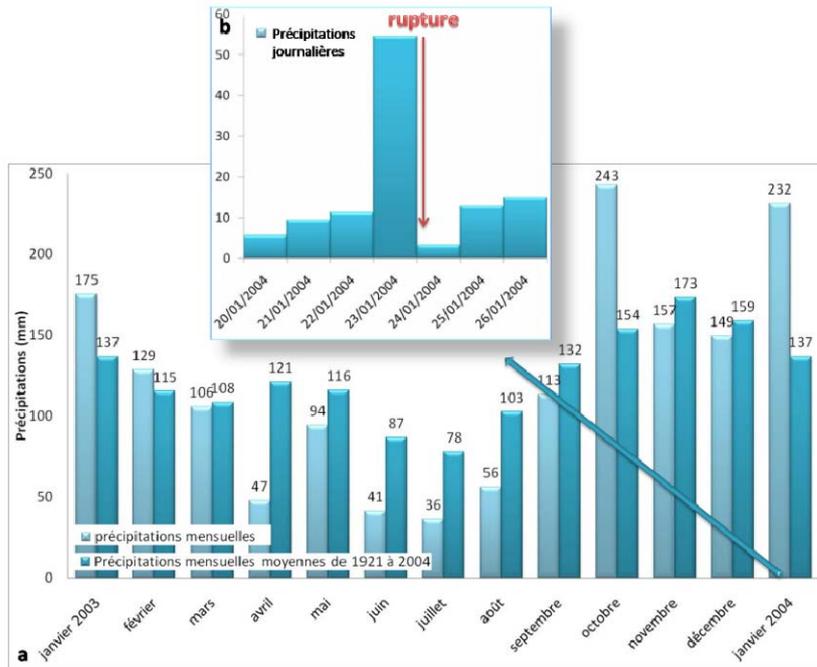


Illustration 3 : a. Précipitations mensuelles de l'année précédant le glissement de terrain et précipitations mensuelles moyennes ; b. Précipitations journalières au moment de la rupture (Source : MétéoFrance, 2008, Station de Socoa)

3.1.2. Description de la géométrie du glissement

Le glissement s'est produit dans le versant, mobilisant uniquement l'altérite, le long d'une surface quasi-circulaire, dont la morphologie et la position ont été estimées à partir des observations et mesures de terrain (illustrations 2 et 4).

La pente du versant antérieurement au glissement était divisée en trois parties :

- en pied, une microfalaise sub-verticale de marno-calcaires de l'horizon karstifié de 2 à 3 m de hauteur ;
- le versant formé dans l'altérite, jusqu'à l'altitude sommitale de 30 m, qui présentait préalablement au glissement une pente d'environ 35° vers le nord-nord-ouest,
- la zone sommitale, qui présente une faible pente ; elle est de 5° environ à proximité du versant, et diminue en s'éloignant de la côte jusqu'à atteindre l'horizontalité.

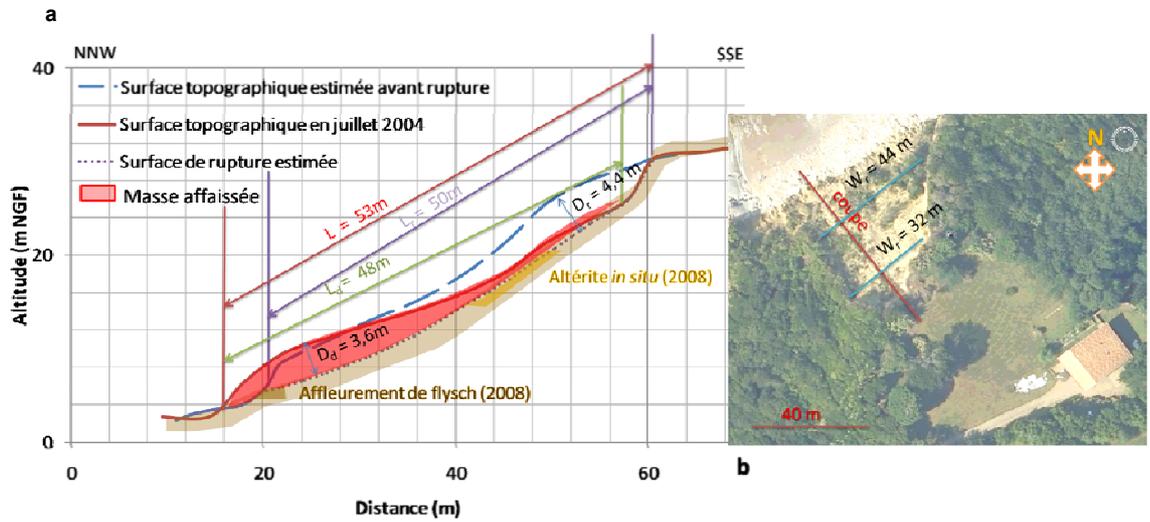


Illustration 4 : a. Profils topographiques avant rupture (estimation à partir du profil topographique levé à l'est du glissement à l'occasion d'une campagne de mesures géophysiques au mois de juillet 2004, Gourry, 2005), après rupture (juillet 2004 ; levé effectué dans le glissement au cours de cette même campagne) et estimation de la localisation de la surface de rupture du glissement de Guéthary ; b. Vue en plan (Image satellite provenant de Google Earth)

Paramètre	abréviation	
Longueur de la surface de rupture	Lr	50 m
Longueur de la masse glissée	Ld	48 m
Longueur totale	L	53 m
Largeur de la surface de glissement au niveau de l'escarpement principal	Wr	32 m
Largeur maximale de la surface de glissement	Wd	44 m
Profondeur estimée de la surface de rupture	Dr	4,4 m
Profondeur estimée de la masse glissée	Dd	4,4 m

Illustration 5 : Caractéristiques de la géométrie du glissement selon la nomenclature de l'IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment, 1990 ; illustration 6) six mois après le glissement (juillet 2004)

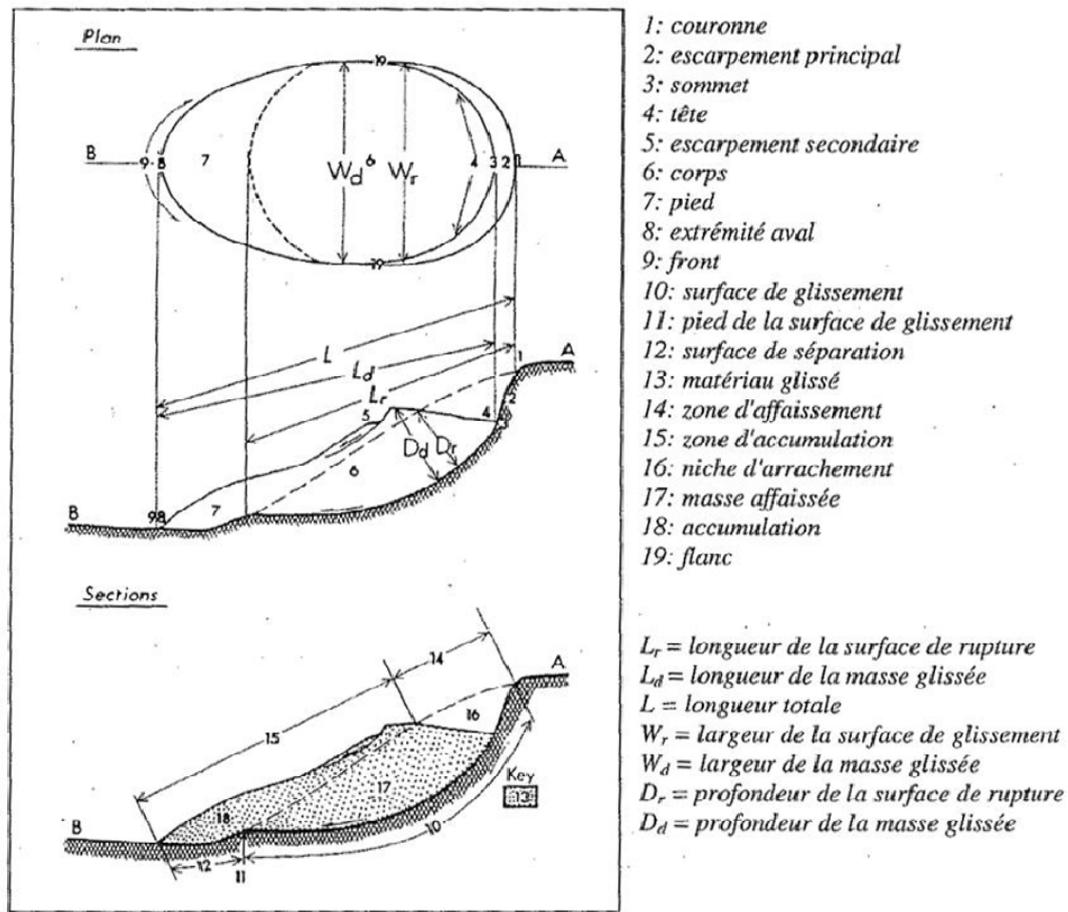


Illustration 6 : Coupe et vue de dessus simplifiées d'un glissement de terrain de type rotationnel et nomenclature (IAEG, 1990)

La partie escarpée du sommet de la surface de glissement correspond probablement à un joint de tension qui se serait développé avant le mouvement général du versant. La longueur, la largeur et la profondeur maximales de cette surface de rupture sont estimées respectivement à 50 m, 44 m et 4,4 m (illustrations 4, 5 et 6, IAEG, 1990). La largeur du glissement n'est pas constante (32 à 44 m) car les flancs présentent deux directions différentes :

- le flanc est-nord-est est quasi-rectiligne et orienté de N0°E à N5°E ;
- le flanc ouest-sud-ouest est de même direction que la ligne de plus grande pente du versant, N140°E ; il a une direction proche de celle de la stratification dans cette partie (N160°E-25°E).

Les discontinuités majeures des marno-calcaires semblent avoir délimité le glissement dans les altérites car on remarque que les directions des flancs sont subparallèles à celle de la stratification. Deux hypothèses sont proposées pour expliquer ce

phénomène : soit un rejeu des fractures tectoniques postérieures à l'altération est à l'origine de plans de fragilité dans l'altérite ; soit les discontinuités majeures ont été conservées au cours des processus d'altération. Cependant, hormis l'influence qu'elles ont pu avoir sur l'extension du glissement, les discontinuités majeures des marno-calcaires n'ont, par ailleurs, pas guidé la surface du glissement circulaire, dont la direction ne concorde avec aucune structure majeure. La direction principale du glissement, estimée être parallèle à la ligne de plus grande pente du versant, soit environ N 320°E, ne correspond pas non plus à une direction structurale des marno-calcaires.

A partir des caractéristiques géométriques du glissement, il est possible d'estimer la surface et le volume total de terrain mobilisé qui sont respectivement environ 1 700 m² et 7 000 m³. Bien que de taille peu importante, ce glissement représente un risque fort en raison de la présence proche d'une habitation au sommet et l'existence d'une plage touristique à son pied.

3.1.3. Evolution

La masse glissée est, depuis sa mise en place, en perpétuelle évolution (illustrations 7 et 8), au point de vue de sa géométrie, de sa teneur en eau ainsi que de la végétation qui la recouvre. L'évolution de la géométrie du glissement se traduit par :

- l'érosion du corps du glissement (détaillée plus loin),
- la récession de la couronne du glissement, qui a eu pour conséquence la mise en surplomb puis la chute de deux arbres (illustration 8 D). En outre, au cours de l'hiver 2007-2008, un petit glissement de terrain a emporté une partie de l'escarpement principal engendrant le recul de la couronne d'environ 1 m. Le matériau mobilisé est encore, en juin 2008, localisé au pied de ce dernier glissement (illustration 9),
- une accumulation du matériel glissé en haut de plage, au pied du glissement, déblayé rapidement par l'érosion océanique. Le pied du glissement a été progressivement érodé jusqu'à laisser apparaître, fin 2006, les marno-calcaires en place sous la surface de rupture (illustration 8).

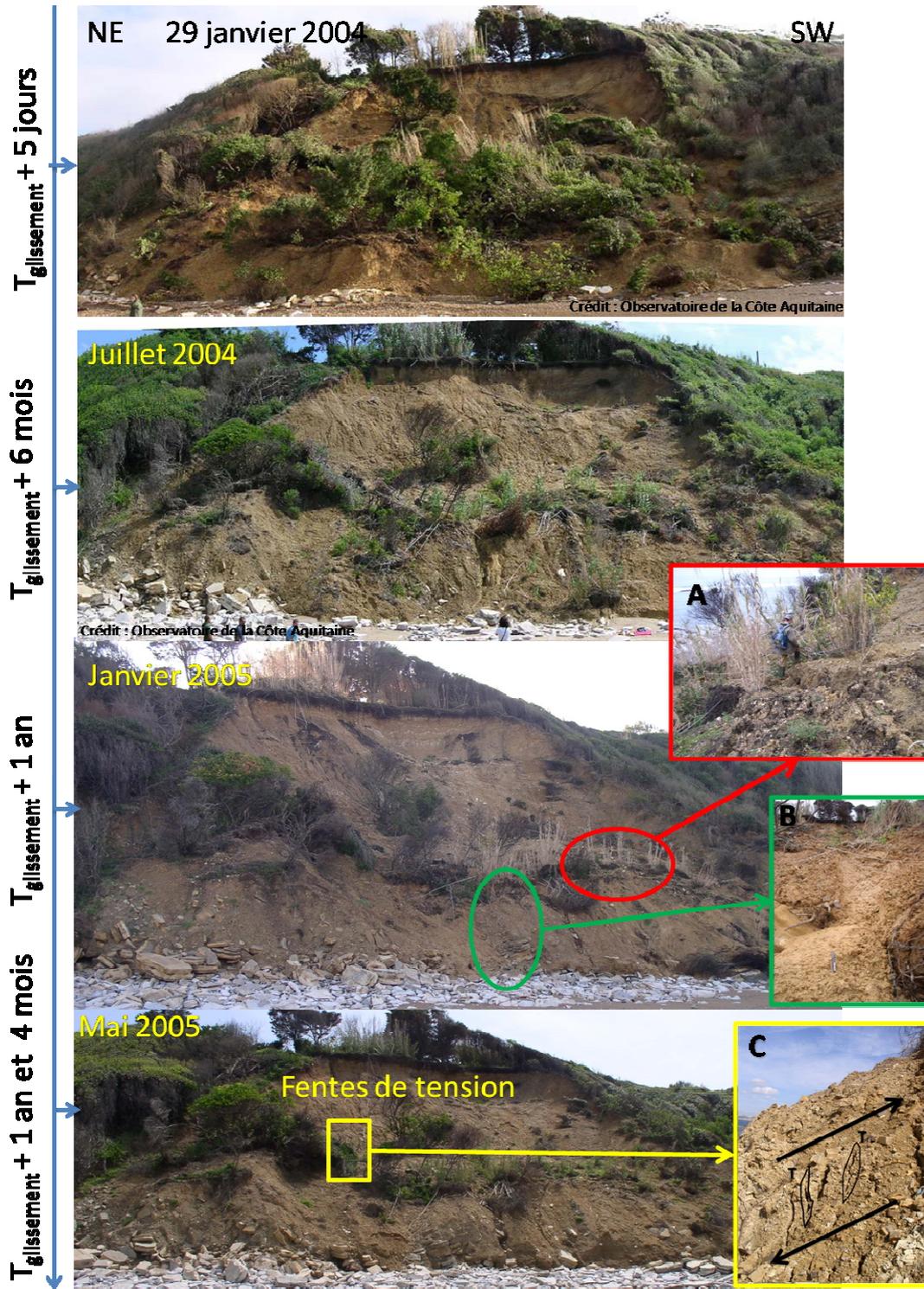


Illustration 7: Evolution du glissement (1/2)

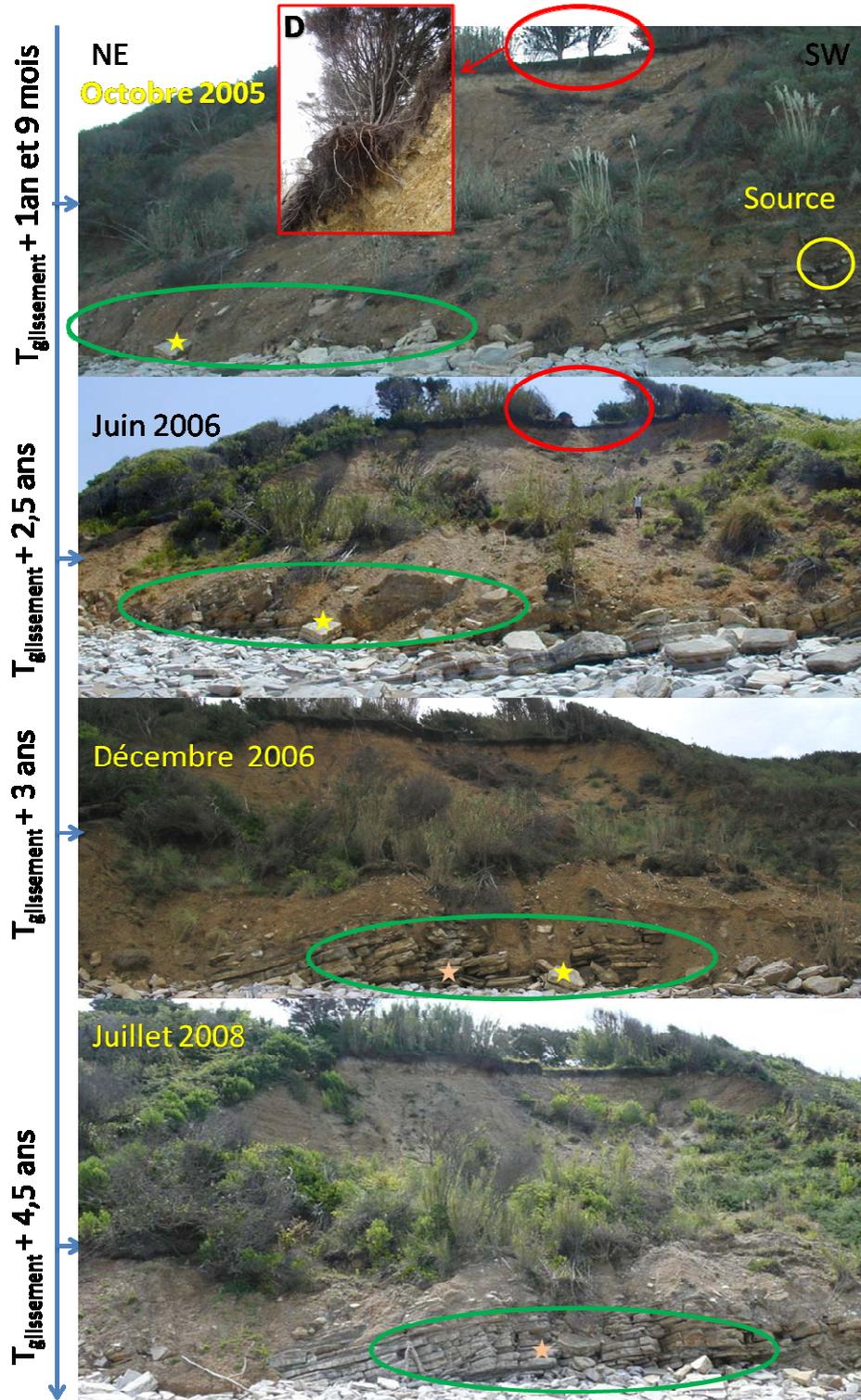


Illustration 8 : Evolution du glissement (2/2)

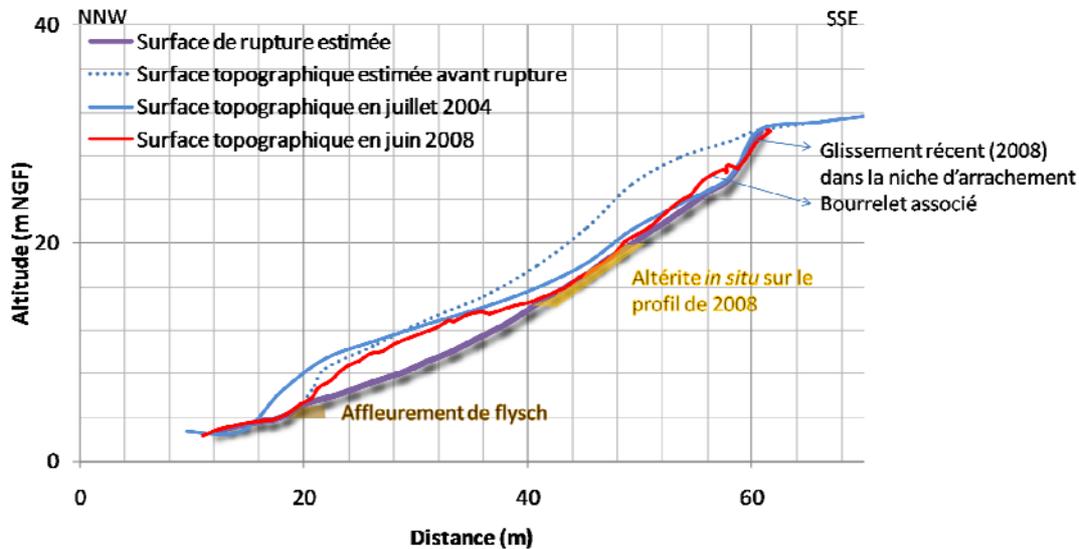


Illustration 9 : Evolution du profil du glissement de 2004 à 2008

Les profils topographiques levés au DGPS en juillet 2004 et en juin 2008, permettent de quantifier l'érosion de la masse glissée au cours des quatre dernières années. En effet, la diminution du volume du corps et l'érosion du pied du glissement, décrites précédemment, apparaissent grâce à la comparaison des sections levées en juillet 2004, juin 2008 et estimées avant le glissement, présentées illustration 9. La surface totale du bourrelet est alors estimée à :

- 160 m² mobilisés lors du glissement,
- 80 m² en juillet 2004 ; la moitié du matériau glissé a été érodé en 6 mois,
- 45 m² en juin 2008 ; en 4 ans, 75 % du matériau mobilisé a été érodé.

Plusieurs processus sont à l'origine du déplacement du matériau du corps du glissement vers son pied, où il est disponible à l'action directe de l'érosion marine :

- des gradins d'arrachement intra-bourrelet (illustration 7 A) ; en outre de l'eau stagne fréquemment dans ces discontinuités,
- des fentes de tension (de direction N95°E), observées au contact de la levée nord-est du glissement, témoignent des contraintes subies par le matériau mobilisé par le glissement et en particulier d'un mouvement de cisaillement en bordure du glissement (illustration 7 C),

- on a observé, entre 2004 et 2006, de nombreuses petites coulées de boue au pied de la masse glissée, qui se sont produites généralement en période de fortes précipitations (illustration 7 B),
- le matériau est raviné par le ruissellement de l'eau de pluie, qui transporte les particules fines vers l'aval du glissement.

Par ailleurs, la teneur en eau du matériau glissé est importante :

- les mesures de teneur en eau effectuées sur les échantillons prélevés un an après le glissement dans le bourrelet révèlent de fortes valeurs (46 %), supérieures à ce qui est mesuré par ailleurs dans le matériau stable (20 à 30%),
- une venue d'eau émergeant de la base de l'altérite a ruisselé à l'extrémité ouest-sud-ouest du pied du glissement jusqu'en juillet 2005 (illustration 8). Cette source réapparaît ponctuellement le plus souvent au printemps, période durant laquelle le massif d'altérite est le plus humide (données de l'Humitub, Aubié S. et Peter-Borie M., 2008).

La végétation arbustive (lauriers principalement) d'avant le glissement n'a pas survécu. Elle a tout d'abord laissé place à des plantes hydrophiles (cannes de Provence) sur le bourrelet. Petit à petit, à mesure que la masse glissée se stabilise, la lande littorale, formée principalement par les ajoncs et la bruyère, colonise les pentes les plus faibles.

3.1.4. Historique du site

L'étude des photographies aériennes prises par l'IGN en 1938, 1954, 1968, 1977, 1992, 1996 et 2000, a permis de recenser les cicatrices des mouvements de terrain sur les reliefs côtiers d'Harotzen Costa (illustration 10, Peter-Borie, 2006). Le glissement qui s'est produit en janvier 2004 a mobilisé une zone qui semblait stable depuis au moins 66 ans. Deux zones de glissement sont, au contraire, régulièrement réactivées par des événements brutaux, et des mouvements de fluage sont par ailleurs observés :

- la zone notée 1 (illustration 10), dans la baie de Cénix, présente une cicatrice de glissement dès 1938 ; sa forme est complexe, la couronne est composée d'une partie circulaire au nord, et d'une partie linéaire au sud. Cependant, cette forme ne semble pas initiée par la structure des marno-calcaires sous-jacents. Ce glissement est réactivé moins de 15 ans plus tard : en 1954, une cicatrice d'une surface équivalente est observée. Entre 1954 et 1977, le glissement évolue de façon régressive : la partie nord du glissement emporte la route d'accès à une habitation, qui avait été déplacée suite à l'événement visible sur la photographie aérienne de 1938 (illustration 11). L'activité de ce glissement

est suspendue depuis 1977 ; seul, en 2006, à l'extrémité Sud de cette zone, un glissement d'une largeur de 5 m a emporté une partie des altérites formant les reliefs de fond de baie.

- la zone notée 2 (illustration 10) est stable au moins jusqu'en 1954. Sur les photographies datant de l'année 1968, une cicatrice sur une surface de 8 500 m² est visible. Elle résulte de deux glissements de 110 m et 30 m de large, successifs ou simultanés. L'un d'eux, au moins, s'est probablement produit le 20 septembre 1959, date à laquelle la destruction d'une villa est enregistrée dans les archives de la mairie de Guéthary. Outre cette habitation, deux chemins privés ont également été emportés. Le glissement est réactivé avant 1977, mais la surface mobilisée diminue (2400 m²), puis en 1986 (source : mairie de Guéthary). Aucune activité n'est observée depuis. En outre, la végétation envahit de nouveau la zone glissée (herbes de la pampa, bruyères et lauriers), témoignant de sa stabilité actuelle.
- sur les reliefs côtiers de Guéthary, mais aussi sur l'ensemble des reliefs formés par les altérites, des indices de mouvements de fluage sont présents comme des arbres au tronc incurvé, ou la fissuration et la déformation des infrastructures (illustration 12).

L'illustration 13 présente les précipitations enregistrées au moment des instabilités de la zone notée 2 datées :

- le mois de septembre 1959 est caractérisé par des précipitations exceptionnelles avec 377 mm, relativement à la moyenne mensuelle depuis 1921 qui est de 130 mm,
- en 1986, des précipitations supérieures aux moyennes mensuelles sont enregistrées en janvier, février, mars, avril et décembre ; au total, cette année là, 1801 mm d'eau sont tombés.

Comme dans le cas du glissement d'Harotzen Costa, ces instabilités, qui ont pu être datées, se produisent au cours de périodes caractérisées par de fortes précipitations.

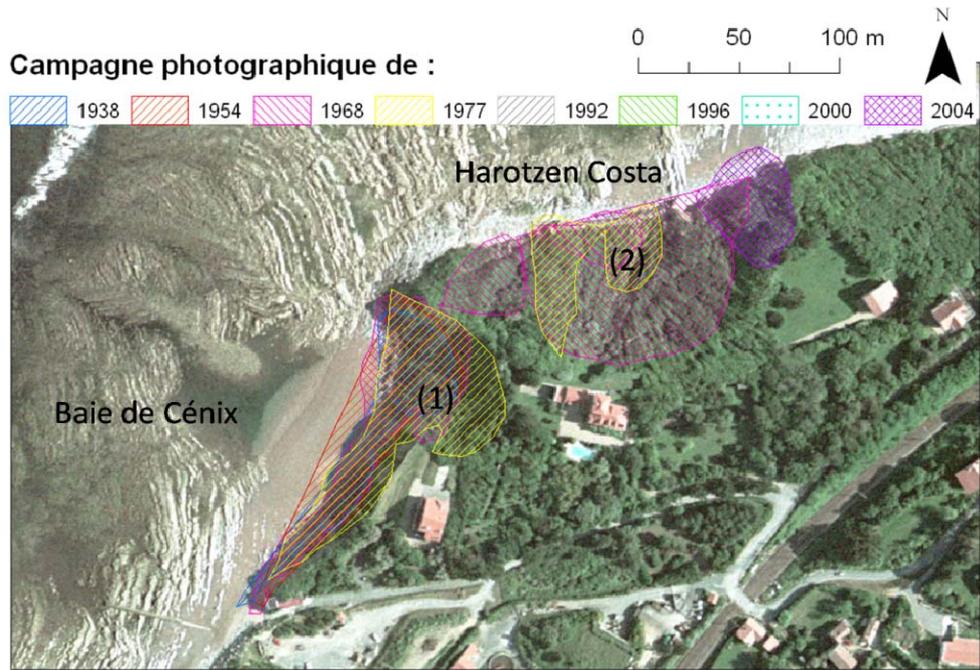


Illustration 10 : Glissements de terrain recensés sur les reliefs côtiers de Guéthary à partir de l'étude des photographies aériennes (fond cartographique : © Ortholittoral, 2000)

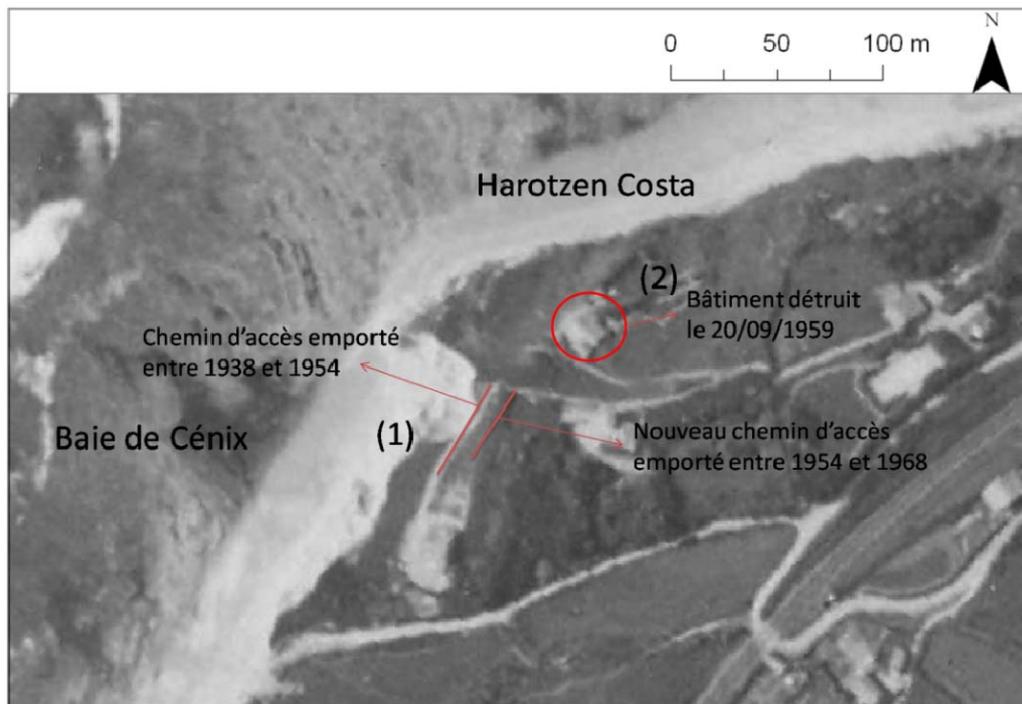


Illustration 11 : Dégâts consécutifs aux instabilités sur le secteur de Guéthary entre 1938 et 2008 (fond cartographique : photographie aérienne 1938, IGN)



Illustration 12 : Indices de fluage en centre ville de Guéthary (Image satellite Google Earth 2008)

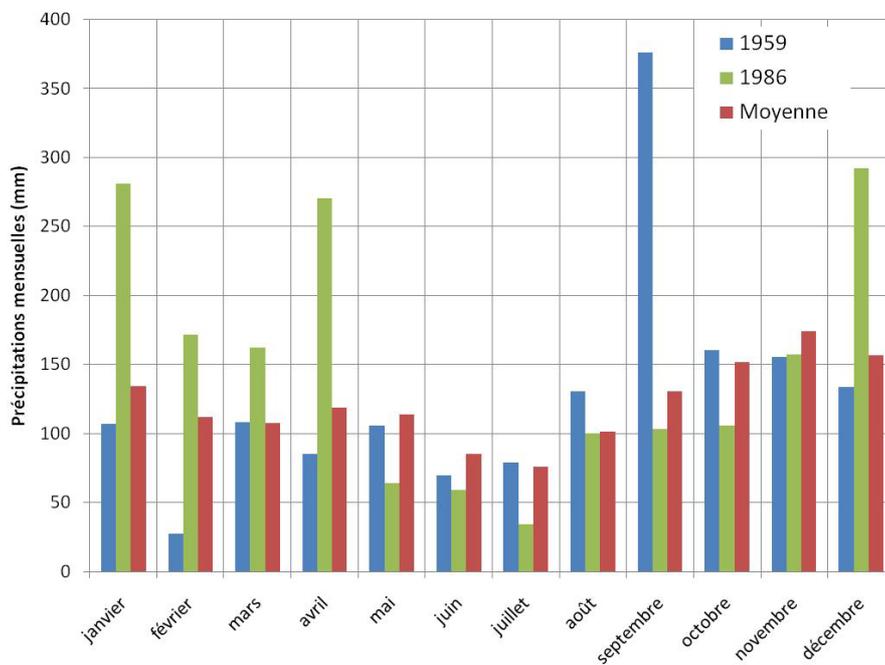


Illustration 13 : Précipitations mensuelles en 1959 et en 1986 et moyennes mensuelles entre 1921 et 2008 à Socoa (Source : Météo France, 2008)

3.1.5. Synthèse : le scénario de rupture du glissement de Guéthary

Laugier (2002) a proposé une fiche-type pour l'analyse de scénarii de mouvements de versant de grande ampleur en montagne, dans laquelle est recensé l'ensemble des données relatives à l'environnement climatique, géographique, géologique, hydrogéologique et géotechnique de l'événement étudié. En complément de ces informations descriptives, les caractéristiques du scénario de rupture sont précisées. Ce type de document permet de synthétiser les informations nécessaires à la compréhension des facteurs et processus à l'origine de la rupture, et permet, également, de ce fait, la comparaison de différents événements.

Les renseignements demandés dans ce type de fiche apparaissent également appropriés à des mouvements de dimension moindre, en milieu quelconque, comme cela est démontré en annexe 1, dans lequel les données relatives au glissement qui s'est produit à Harotzen Costa ont été saisies.

3.2. LES FACTEURS ET PROCESSUS A L'ORIGINE DES INSTABILITES DANS LES ALTERITES

L'état de stabilité d'une pente est toujours précaire : sous l'effet de la gravité, les versants fluent à une vitesse plus ou moins importante. De plus, certains sont susceptibles d'être le siège d'une rupture brutale qui résulte alors de l'action conjuguée de facteurs de prédisposition, de préparation, aggravants et déclenchants (d'après Antoine, 1992, Antoine et Giraud, 1993, Azimi et Desvarreux, 1996, Couture et al. 1997, Lebourg, 2000, Laugier, 2002, Pollet, 2004, Le Mignon, 2004 et Martins-Campina, 2005) :

- les premiers, inhérents à la formation géologique, sont les caractéristiques géologiques (structure et lithologie) qui conditionnent la stabilité du versant à l'origine,
- les seconds, qui agissent au cours de longues périodes, modifient progressivement les propriétés du versant et du massif, les amenant à un état métastable, en affectant notamment la résistance et la structure du massif rocheux,
- un facteur aggravant est un phénomène qui vient se surimposer aux autres facteurs ; à lui seul, il ne déclenche pas la rupture, mais sa présence contribue à en alourdir les conséquences,
- un facteur déclenchant est, par définition, un stimulus externe à l'origine de la rupture (Varnes, 1978), par augmentation rapide des contraintes ou diminution de la résistance du matériau (Wieczorek, 1996).

Dans ce paragraphe, nous proposons de recenser les différents facteurs intervenant dans les processus conduisant aux instabilités littorales du type de celle qui s'est produite à Harotzen Costa. En synthèse, un modèle conceptualisant les processus à l'origine de la rupture au sein des altérites est présenté.

3.2.1. Facteurs de prédisposition

Les facteurs de prédisposition sont des éléments intrinsèques au massif rocheux liés à l'histoire géologique. On distingue classiquement, parmi les facteurs de prédisposition (Antoine, 1992, Antoine et Giraud, 1993, Azimi et Desvarreux, 1996, Couture et al. 1997, Pollet, 2004) :

a) La lithologie

Selon leur nature pétrographique, les propriétés géotechniques des massifs rocheux ou de sol diffèrent, indépendamment de leur structure. Dans le cas des altérites, la nature argilo-silteuse du matériau est particulièrement défavorable à la stabilité, comme le montrent leurs faibles propriétés géotechniques. En outre, les variations dans la consolidation du matériau, mises en évidence également dans l'étude géotechnique, représentent un facteur supplémentaire de prédisposition.

b) La structure du massif

L'existence de structures particulières (stratification, foliation, joints, diaclases, failles, disposition des couches les unes par rapport aux autres, etc.), issues de l'histoire géologique de la roche (dépôt, tectonique) peut favoriser les instabilités.

Les structures des altérites (stratification, plis), de dimension centimétrique à plurimétrique, ne semblent pas guider les glissements pluridécamétriques. En effet ces derniers se produisent sur une surface de rupture circulaire et qui, comme pour ce qui a été observé dans le cas du glissement d'Harotzen Costa, recoupe potentiellement les plans de stratification. Cependant, des discontinuités majeures héritées de la roche-mère (soit au cours de processus d'altération, soit par des phénomènes de rejeu) semblent avoir limité l'extension du glissement. La structure du massif, apparaît, dans ce cadre, être un facteur de prédisposition.

En outre, la structure du massif peut également avoir des conséquences par le fait qu'elle conditionne les circulations d'eaux souterraines dans les massifs d'altérites, considérées comme déclenchant les instabilités (c.f. infra) : en effet, d'une part, ces circulations sont chenalisées, probablement par les niveaux le plus perméables des altérites, dont la répartition spatiale est intimement liée à la structure du massif. D'autre part, la structure de l'horizon karstifié, et notamment la présence de conduits karstiques, bien que non vides, prédispose également potentiellement cette zone aux circulations hydrogéologiques.

c) L'état altéré

L'état altéré, facteur important dans les instabilités de terrain, peut être classé soit en facteur de prédisposition, soit en facteur de préparation, selon que l'on considère les altérites comme les formations géologiques initiales composant le versant, ou comme issues de processus d'altération dégradant les propriétés des roches initiales : les marno-calcaires à faciès flysch. Étant donné que les altérites se sont très probablement développées avant la formation des reliefs littoraux, nous proposons, ici, de les considérer comme les roches initiales. L'état altéré se classe, de ce fait, parmi les facteurs de prédisposition à cause de la lithologie et de la structure des altérites (c.f. ci-dessus).

3.2.2. Facteurs de préparation

Les mouvements de terrain sont le résultat d'une préparation longue et progressive du versant, qui consiste en une dégradation des propriétés du massif, l'amenant à un état de stabilité précaire. Ce phénomène est le fait de facteurs de préparation qui sont climatiques, tectoniques morphologiques ou encore océanographiques.

a) Les facteurs climatiques

Les facteurs climatiques préparant le matériau à la rupture peuvent également la déclencher, à long terme ou par le biais d'événements exceptionnels. La limite peut être floue entre les événements préparant et ceux déclenchant la rupture. Nous essaierons ici de les distinguer par l'échelle de temps sur laquelle ils agissent. Ainsi, le type de climat est étudié parmi les facteurs de préparation. Les événements exceptionnels, qui se répercutent à très court terme sur les circulations hydrogéologiques comme on a pu le constater grâce aux instrumentations et aux suivis (Aubie S., Peter-Borie, 2008) sont, par contre, considérés comme facteurs déclenchants et/ou aggravants.

Le type de climat influence fortement les variations hydriques au sein du matériau potentiellement instable. Le climat océanique du littoral, avec plus de 1400 mm de précipitations moyennes annuelles, favorise l'alimentation en eau des altérites et de l'horizon karstifié dont la conséquence est, sur le long terme, une dégradation possible des propriétés géotechniques des matériaux par des processus d'altération et/ou d'érosion.

Un autre facteur climatique classiquement reconnu comme prédisposant à la rupture est le gel-dégel. Cependant, les périodes de gel sur le littoral basque sont rares, la masse océanique ayant un effet tampon.

b) La tectonique

Le jeu de failles existant dans les marno-calcaires postérieurement au développement des altérites peut avoir eu, pour conséquence, la création de plans de

fragilité dans ce dernier matériau. En créant ainsi de telles discontinuités, la tectonique « prépare » la rupture en délimitant les futures zones de glissement.

c) Les facteurs morphologiques

La stabilité d'un versant est également fonction de sa géométrie et de son évolution. Sur le littoral basque, la morphologie des reliefs côtiers est le résultat des processus d'érosion probablement dominés par les agents subaériens, comme les instabilités et le ravinement. Cette érosion continue des reliefs empêche la pente d'atteindre l'angle idéal d'équilibre. Elle est, en outre, facilitée par l'absence de végétation : l'eau de pluie ruisselle ou pénètre alors plus facilement dans le massif, favorisant respectivement le ravinement et les instabilités de pente. Le remplacement de la lande et des arbustes naturels par des champs ou des gazons plus raz, moins consommateurs d'eau et au système racinaire moins développé, représentent, à ce titre, un facteur de préparation.

L'orientation du versant est également un facteur potentiel de préparation. En effet, les reliefs littoraux basques sont orientés vers le nord-nord-ouest, dans la direction des vents dominants d'avril à septembre (brises maritime et thermique, Désurmont, 1995). Au cours des événements pluvieux de cette période, la présence d'un vent de secteur nord-ouest est à l'origine d'un apport direct de l'eau aux reliefs côtiers.

d) Le facteur océanique

L'océan peut préparer la rupture d'un relief côtier par les processus d'érosion marine directe qui agissent à long terme :

- par des agents chimiques et biologiques qui dégradent progressivement les matériaux constituant le relief côtier,
- par la houle, qui peut être à l'origine d'une fissuration du matériau générée par des pressions à la base du versant (Watremez et al, 2001, Gentier, 2002) :
 - d'une part, le déferlement de la houle représente une force dynamique qui vient buter contre le pied du relief, assimilable, en première approximation, à une force statique équivalente à l'accélération de la houle,
 - d'autre part, la houle peut être à l'origine de transferts de pression dans les conduits karstiques (remplis d'eau ou d'air).

3.2.3. Facteurs aggravants et déclenchant

Distinguer les facteurs déclenchant de ceux aggravant l'instabilité n'est pas chose aisée. En effet, savoir quel phénomène a déclenché la rupture nécessite une bonne compréhension des processus. Dans le cas du glissement qui s'est produit en janvier

2004 à Harotzen Costa, il apparaît, d'après l'étude des circonstances, que les précipitations sont probablement le facteur déclenchant. Cependant, il est difficile de généraliser cette hypothèse à l'ensemble des glissements qui se sont produits dans les altérites : il faudrait, pour cela, connaître les conditions climatiques au moment de chacun de ces événements. D'autres éléments peuvent alors apparaître comme potentiellement déclenchants, comme l'érosion océanique, par exemple, qui a pu, par ailleurs, être aggravante dans le cas du glissement d'Harotzen Costa. C'est pourquoi nous présentons ici, sans distinction, les facteurs aggravants et déclenchants ; le détail des processus par lesquels ils agissent est présenté dans le § 3.3. (p. 33).

a) Les facteurs océaniques

L'océan peut être à l'origine d'un affouillement en pied des reliefs côtiers par érosion marine, potentiellement déstabilisant. Cependant, de nombreux mouvements de terrain dans les altérites sont observés alors que l'interface de la roche-mère et de l'altérite se situe plusieurs mètres au-dessus du niveau marin des plus hautes mers. Ce facteur n'est donc ni systématique, ni déterminant comme cela a par ailleurs été montré dans d'autres études portant sur les instabilités littorales (Gentier, 2002).

b) Les événements climatiques exceptionnels

Le facteur déclenchant le plus fréquemment observé est l'événement pluvieux important, parce qu'il alimente les nappes dans le versant, mais aussi à la base du massif instable (Chapeau et Durville, 2005). Dans le cas des instabilités étudiées ici, il peut provoquer la rupture d'un versant par alimentation de l'altérite qui le constitue et de l'horizon karstifié formant sa base. Il a, en effet, pour conséquence l'augmentation des contraintes dans le versant selon des processus détaillés dans le § 3.3. (p.33). Lorsque l'apport d'eau n'est pas suffisant pour déclencher une rupture brutale, l'augmentation de la teneur en eau des altérites, dont la plasticité est importante, peut faire évoluer leur état vers le domaine plastique voire liquide ; le massif peut alors potentiellement fluer. Si cet écoulement ne concerne que les couches de surface, il s'agit de reptation.

Regroupant les facteurs climatiques et océaniques, les tempêtes peuvent être des facteurs aggravant ou déclenchant la rupture. En effet :

- elles sont accompagnées de précipitations exceptionnelles. Ces dernières alimentent les nappes, ce qui est à l'origine du développement des contraintes supplémentaires dans le massif,
- elles sont associées à des vents forts et à une situation dépressionnaire qui ont pour conséquences respectives une forte houle et une surcote marine. L'océan agit alors selon deux processus : d'une part, il peut éroder le pied de falaise et d'autre part, la surcote marine peut, par transfert de pression et/ou de matière, se répercuter sur le niveau de la nappe de l'horizon karstifié et augmenter, de ce fait, les pressions déstabilisatrices à la base des altérites.

c) Autres

Les mouvements de terrain peuvent être déclenchés par de nombreux autres facteurs. Ce sont alors des phénomènes liés à l'histoire géologique régionale, tel que le volcanisme ou la sismicité qui vont provoquer l'instabilité. Cependant, la Côte Basque n'est ni une zone volcanique, ni une zone sismiquement très active : d'après le nouveau zonage sismique de la France le littoral basque est une zone qualifiée d'aléa modéré (MEEDDM, 2005). Seuls deux séismes sont répertoriés dans la base SISFrance (BRGM), l'un à Saint-Jean-de-Luz, en 1853, d'une intensité épiscopale égale à 5 d'après l'échelle macrosismique MSK de 1964, et le second à Ustaritz, en 1952, d'intensité égale à 5,5 ; cependant les informations relatives à l'intensité sont considérées comme peu fiables.

3.2.4. Facteur anthropique

Le facteur anthropique ne peut être négligé sur un littoral aussi urbanisé que la Côte Basque. Il intervient potentiellement aux niveaux suivants : facteur de préparation, facteur aggravant ou encore facteur déclenchant.

En tant que facteur de préparation, l'action anthropique peut se traduire par la déforestation, le rejet d'eau en sommet de falaise, la modification du profil de pente (retrait progressif de matériau stabilisateur lors d'exploitations, remblayage) ou encore la modification des réseaux d'écoulement. A plus long terme, il est aujourd'hui reconnu que l'homme influe sur le climat mondial ; les variations du taux de précipitation ou les variations eustatiques, intimement liées au climat, pourront donc, selon le cas, augmenter ou diminuer la stabilité des reliefs côtiers.

Les modifications des conditions hydrologiques et hydrogéologiques (irrigation, montée ou descente du niveau de l'eau dans une retenue artificielle, rejet des eaux pluviales ou usées volontaire ou non), l'excavation du pied de falaise ou mise en place de surcharges en sommet de falaises sont des éléments qui peuvent déclencher ou aggraver un mouvement de terrain. Lors de la cartographie des instabilités littorales du Pays Basque (Aubié et al, 2007), des conduites d'eau pluviales détériorées ou des canalisations rejetant l'eau en sommet de reliefs ont parfois été observées dans les versants déstabilisés. Bien que sèches au moment de l'observation, l'eau provenant de certaines d'entre elles (fuites ou exutoire en milieu de falaises) a pu participer au déclenchement d'instabilités (exemples : illustration 14).



Illustration 14 : Conduite d'eau dans un glissement observé sur le littoral luzien ; b. Escarpement principal d'un glissement sur la commune de Saint-Jean-de-Luz et (c) système de drainage des eaux de pluie du chemin littoral situé dans la zone sommitale, qui les conduit directement en haut du versant.

3.3. MODELISATION CONCEPTUELLE DES PROCESSUS A L'ORIGINE DE LA RUPTURE

Les glissements ont plusieurs causes potentielles, énumérées parmi les différents facteurs cités dans les paragraphes précédents ; cependant une seule déclenche la rupture (Varnes, 1978), c'est le facteur déclenchant. Dans ce paragraphe, nous considérons les processus associés aux facteurs suivants déclenchant potentiellement les instabilités dans les altérites : un événement pluvieux exceptionnel (exemple du glissement d'Harotzen Costa), l'érosion océanique et une tempête.

3.3.1. Processus associés à un événement pluvieux exceptionnel

Les observations et mesures de terrain effectuées à Harotzen Costa ont fait apparaître les précipitations abondantes comme facteur déclenchant la rupture (c.f. : § 3.1) et de ce fait, ont mis en évidence le rôle primordial de l'eau dans les processus à l'origine de la rupture.

Les instrumentations de suivis installés sur ce site (Aubié S., Peter-Borie, 2008) ont démontré l'existence de circulations d'eau dans l'altérite et dans l'horizon karstifié reliées aux précipitations dans un délai très rapide qui sont potentiellement déstabilisantes à cause de la géométrie des massifs et les caractéristiques géotechniques du matériau (illustration 15) :

- l'augmentation de la teneur en eau de l'altérite s'accompagne d'une augmentation de la masse du matériau (notée p sur l'illustration 15). La présence d'eau dans le versant est d'autant plus déstabilisatrice quelle est située à proximité de la surface (Guglielmi et al., 2005) ;
- l'augmentation du potentiel hydraulique de la nappe semi-captive de l'horizon karstifié peut se traduire :
 - par une augmentation réelle de la surface piézométrique (saturation des niveaux d'altérite perméables), et dans ce cas, par une diminution de la résistance des altérites, saturées, à la base du relief,
 - et/ou par la création de surpressions (notées σ sur l'illustration 15) à la base du massif d'altérite.

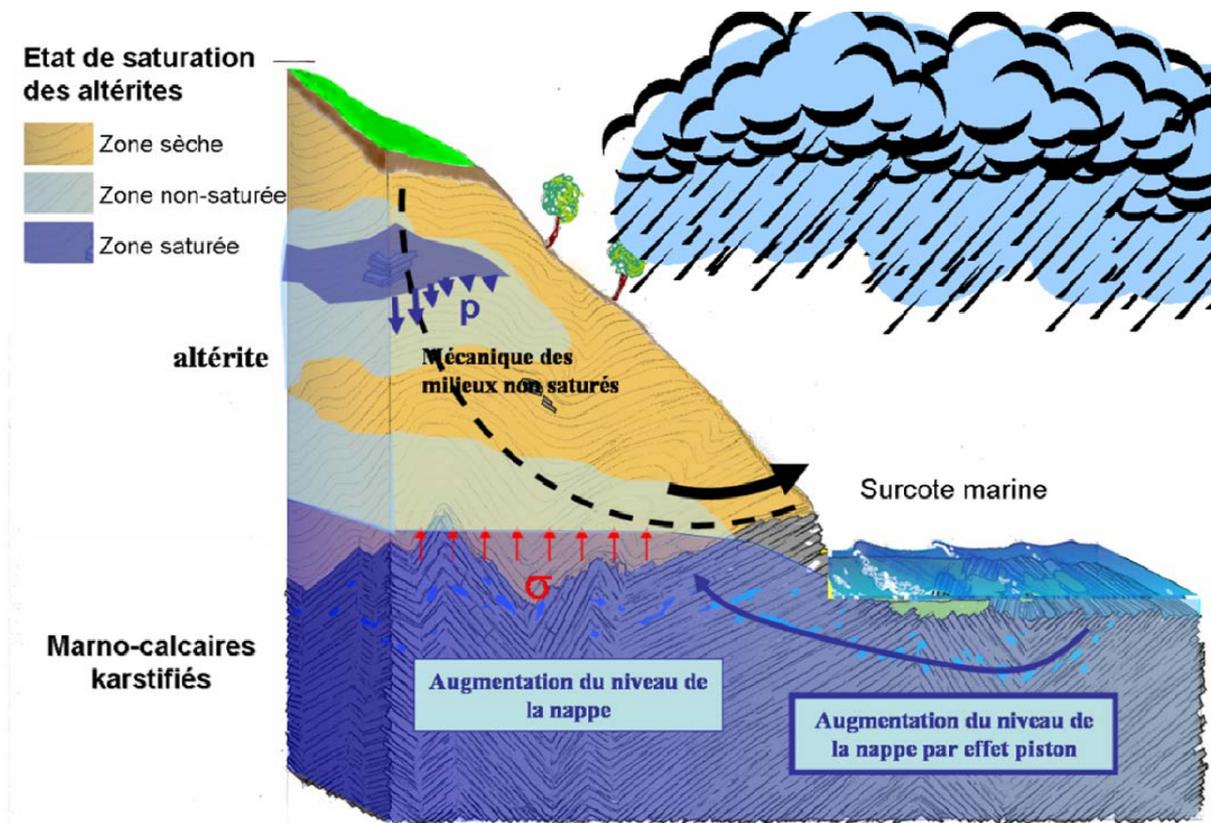


Illustration 15 : Conceptualisation des processus à l'origine de la rupture d'une pente (p : pressions induites par la masse des nappes perchées ; σ : contraintes générées par une nappe semi-captive dans les marno-calcaires)

3.3.2. Processus associés aux facteurs océaniques

Le facteur océanique pouvant potentiellement déclencher la rupture est l'érosion du pied des reliefs côtiers par les agents marins. En effet, l'affouillement qui en résulte est à l'origine d'une diminution des forces de butée, et donc d'une potentielle déstabilisation du versant.

d) Tempêtes

Les facteurs climatiques et océaniques peuvent être réunis dans le cadre des tempêtes, où il est alors difficile de faire la part entre le facteur qui déclenche l'instabilité et celui qui l'aggrave. En effet :

- les tempêtes sont accompagnées de précipitations exceptionnelles. Ces dernières alimentent les nappes, ce qui est à l'origine du développement des contraintes dans le massif,
- les tempêtes sont associées à des vents forts et à une situation dépressionnaire qui ont pour conséquences respectives une forte houle et une surcote marine. L'océan agit alors selon deux processus : d'une part, il peut éroder le pied de falaise et d'autre part, la surcote marine peut, par transfert de pression et/ou de matière, se répercuter sur le niveau de la nappe de l'horizon karstifié et augmenter, de ce fait, les pressions déstabilisatrices à la base des altérites (illustration 15).

3.4. MODELISATION NUMERIQUE DES PROCESSUS DE RUPTURE

3.4.1. Scénarii et méthodes de modélisation

Des scénarios de rupture, associés aux facteurs déclenchant énumérés dans le paragraphe précédent, sont étudiés par la rétro-analyse numérique du glissement d'Harotzen Costa à Guéthary :

- scénario 1 : augmentation de la surface piézométrique de la nappe semi-captive à la base de l'altérite consécutivement à des précipitations abondantes. Son niveau piézométrique est, dans un premier temps, située à l'interface de l'altérite et des marno-calcaires. Il s'élève ensuite progressivement par pas métrique jusqu'à être positionné 4 m au-dessus de cet interface, ce qui équivaut à 9 m NGF, soit une altitude proche de celle de la nappe captée par le piézomètre installé sur le site (Aubié S. Peter-Borie M, 2008),

- scénario 2 : au scénario 1 est ajoutée l'augmentation de la saturation de portions de dimension croissante de l'altérite consécutivement à des précipitations abondantes,
- scénario 3 : érosion du pied de falaise.

La modélisation des surpressions générées par une augmentation de la pression hydrostatique de la nappe de l'horizon karstifié n'a pu être effectuée, par manque de temps. Cependant, cette étude est une perspective au travail présenté ici. Ce type de calcul est, en effet, réalisable avec le logiciel utilisé (c.f. infra). En outre, l'étude de la stabilité du versant post-glissement est réalisée avec le profil topographique de juillet 2004.

Les calculs sont effectués avec le logiciel FLAC2D (version bidimensionnelle 5.00) et son module FLAC Slope (© Itasca), avec un couplage hydromécanique. Ce code de calcul, qui permet la résolution de problèmes en contraintes-déformations dans un milieu continu, basé sur la méthode des différences finies explicites : les variables sont connues en des lieux discrets de l'espace et le calcul dans un élément est effectué sans tenir compte de l'élément voisin. Par ailleurs, le maillage se déforme avec le matériau : les coordonnées des nœuds sont réactualisées à chaque pas du calcul (formulation « lagrangienne »). Ceci permet de traiter les problèmes en grande déformation, comme dans notre cas d'étude.

3.4.2. Paramètres

La géométrie du modèle utilisé pour ces analyses est présentée sur l'illustration 16. Il reprend la coupe du versant actuel : la topographie utilisée est celle du versant situé à l'est-nord-est du glissement, parallèlement à la direction estimée du mouvement (c.f. : § 3.1.2 p.16) et deux formations géologiques sont intégrées, les marno-calcaires et l'altérite, séparées par une interface plane dont l'altitude est celle mesurée à l'affleurement, et extrapolée à l'ensemble du versant. Plusieurs secteurs sont prédéfinis dans l'altérite (illustration 16a) :

- pour les scénarii 1 et 2, quatre secteurs sont créés à la base des altérites auxquelles les propriétés de l'altérite saturée sont attribuées à mesure de l'augmentation de la surface piézométrique. Ils sont utilisés pour modéliser la saturation de l'altérite suite à l'augmentation du niveau de la nappe semi-captive contenue dans l'horizon karstifié,
- pour le scénario 2, sont créés deux secteurs, notés (1) et (2), auxquels, en fonction des simulations, les propriétés de l'altérite saturée sont attribuées ; ils sont utilisées pour modéliser une zone saturée de dimension plus ou moins importante à proximité de la surface du versant,
- pour le scénario 3, deux secteurs sont prédéfinis en pied du versant qui correspondent à des reculs du pied de versant de 2 m (surface totale : ~4,4 m²)

et de 4 m (surface totale : ~20 m² ; illustration 18); au cours de la simulation, après chaque « excavation », le maillage est ajusté à la nouvelle topographie ainsi définie par une procédure automatisée.

La section est discrétisée à l'aide d'un maillage constitué d'éléments carrés de 2,17 m de côté (illustration 16b et illustration 18), au cours d'un processus « semi-automatisé » qui prend en compte la topographie. Les mouvements de sa base et de ses extrémités sont respectivement fixés horizontalement et verticalement, et horizontalement. Trois points de contrôle, A, B et C permettent l'enregistrement des historiques des déplacements et des vitesses selon les axes x et y (illustration 16a).

Trois matériaux sont utilisés pour le modèle : les marno-calcaires, l'altérite non-saturée, et l'altérite saturée. Seule la masse volumique distingue l'altérite saturée de celle insaturée, les caractéristiques mécaniques étant par ailleurs identiques, égales à celles estimées en conditions drainées (illustration 17, Peter-Borie, Aubié S., 2008) ; en effet, pour une pente de durée de vie proche du siècle (l'étude historique des reliefs côtiers de ce secteur montre que la récurrence des instabilités est de cet ordre de grandeur, (§ 3.1.4 p.23), il est recommandé de choisir les caractéristiques mécaniques drainées de pic (Philipponnat et Hubert, 2002). Les paramètres géotechniques de l'altérite, saturée ou non, proviennent des résultats des essais géotechniques (Peter-Borie, Aubié S., 2008) et ont été ajustés de façon à obtenir un versant stable dans l'état défini comme initial (pas d'eau dans le massif, le facteur de sécurité calculé par le logiciel est alors égal à 1,05). Ceux des marno-calcaires ont été choisis de façon à ce que ce substrat reste stable. Dans chaque cas, on considère que le matériau a un comportement élasto-plastique de type Mohr-Coulomb.

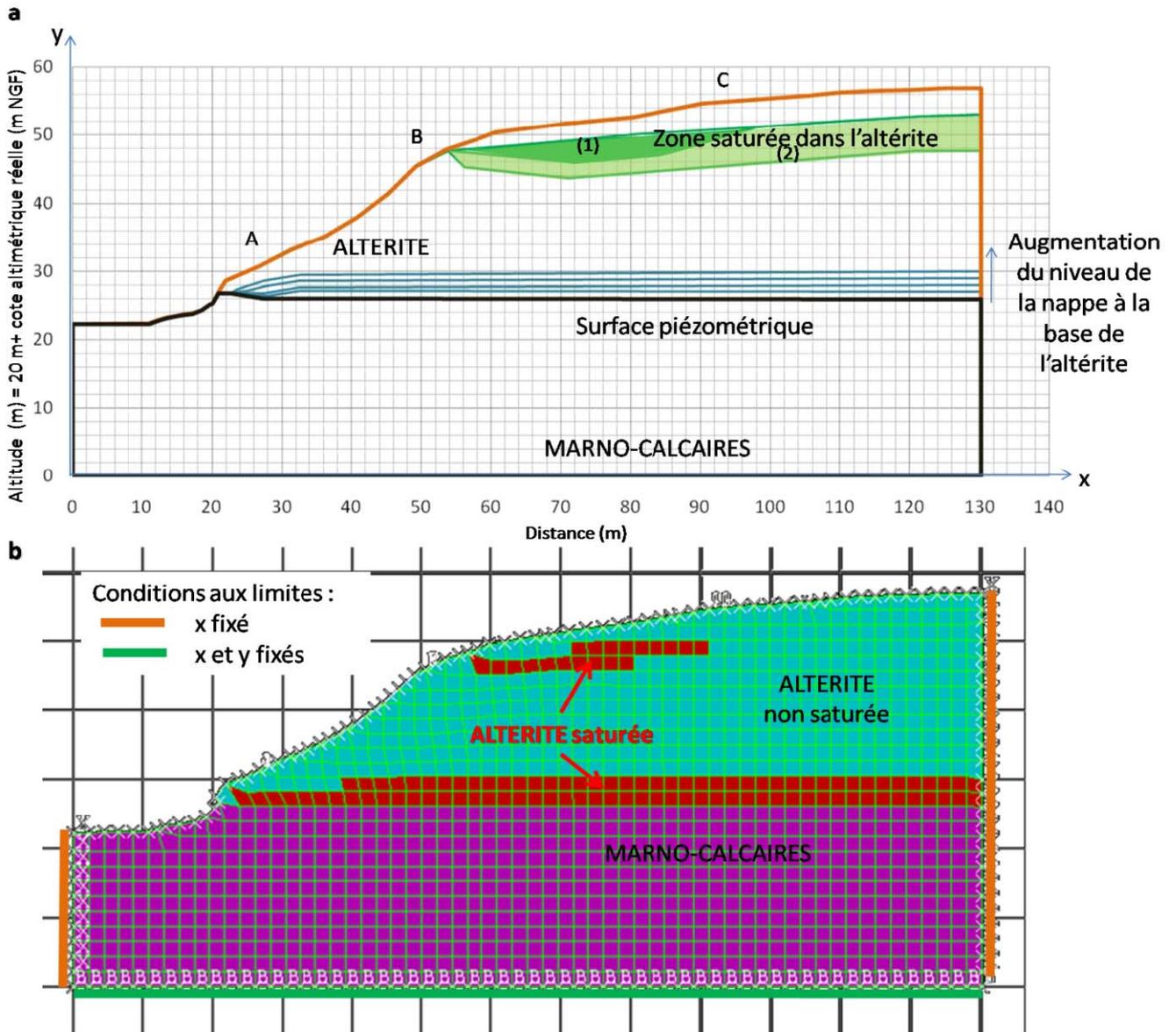


Illustration 16 : a. Géométrie du modèle ; A, B, et C correspondent aux points des différents suivis (déplacement et vitesse de déplacement) ; b. maillage, conditions aux limites et localisation des différents matériaux dans le cas d'une saturation de l'altérite correspondant à la zone (1) et une surface piézométrique de la nappe à la base de l'altérite située 4 m au-dessus de l'interface.

	Masse volumique (kg.m-3)	Module de déformation (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Cohésion (kPa)	Angle de frottement
Altérite non saturée	1 790	2	0,75	10	21,5°
Altérite saturée	1850	2	0,75	10	21,5°
Marno-calcaires	2 700	2 260	1 100	6 720	42°

Illustration 17 : Propriétés géotechniques des différents matériaux utilisés dans la modélisation

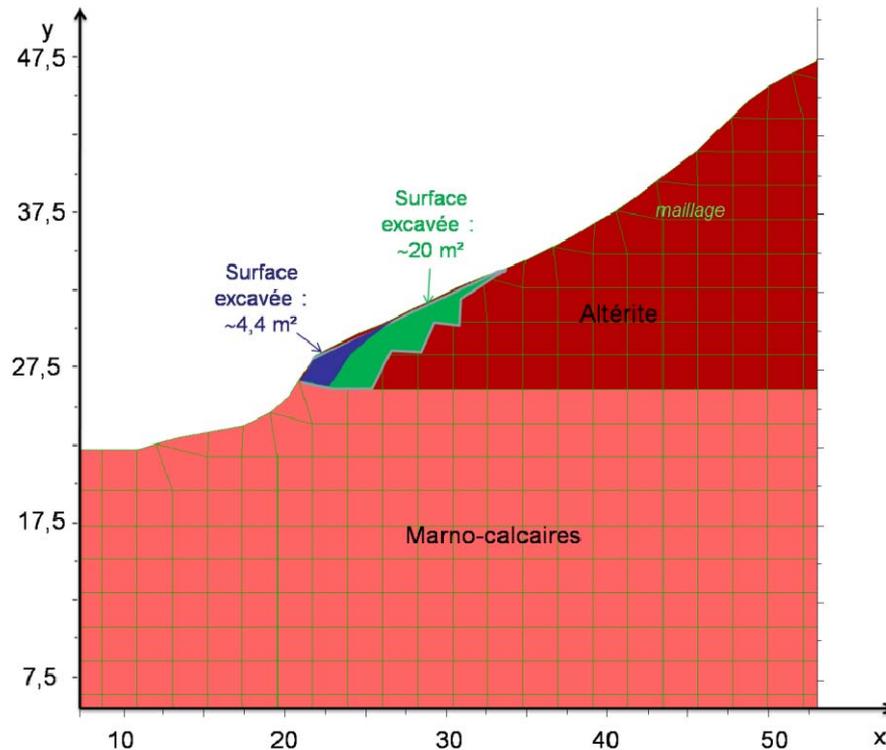


Illustration 18 : Définition des régions excavées au cours du scénario 3

3.4.3. Scénario 1

Ce premier scénario consiste en la montée de la nappe à la base de l'altérite, cette dernière étant progressivement saturée. Cinq situations de la surface piézométrique de la nappe (notées Z0m à Z4m) ont été modélisées, depuis la base de l'altérite (altitude

de la nappe égale à celle de l'interface des marno-calcaires et de l'altérite), jusqu'à quatre mètres au-dessus de cette position (illustration 16).

L'étude de la répartition des indicateurs de plasticité montre que l'augmentation du niveau de la nappe dans l'altérite a pour conséquence le développement d'une bande de cisaillement, du pied du versant vers son sommet (illustration 19). Lorsque le niveau de la surface piézométrique est situé 4 m au-dessus de la base de l'altérite (Z4m), une zone en traction apparaît en sommet de versant, dans la continuité de la bande de cisaillement (illustration 19b). Des joints de tension peuvent alors se développer en amont du versant. Cependant, l'apparition de telles discontinuités dans cette zone non saturée va modifier le drainage des eaux pluviales, ce qui peut avoir des conséquences sur la stabilité du massif, néfastes ou non. En effet, selon les cas, l'eau peut s'accumuler dans ces joints, qui ont alors un rôle défavorable à la stabilité, ou au contraire être drainée par ceux-ci, ce qui peut améliorer la stabilité du versant (Gentier, 2002).

L'alignement des indicateurs de plasticité semble définir un secteur où sont localisées les déformations, conduisant éventuellement à la rupture, au-dessus de laquelle, le matériau se déplace vers l'aval (illustration 19 et illustration 20) : l'étude des historiques des déplacements aux points A, B et C révèle en effet :

- des déplacements qui se sont stabilisés de l'état Z0m à l'état Z3m ; ils sont plus importants aux points A et B qu'au point C,
- les déplacements aux points A et B ne sont pas stabilisés à l'état Z4m, alors qu'ils le sont quasiment au point C : seule la région délimitée par les indicateurs de plasticité est instable ; en outre les déplacements importants sont à l'origine de l'arrêt du calcul au cours de cet état (problèmes rencontrés avec la déformation du maillage au pied du versant suite aux déplacements).

La disposition des indicateurs de plasticité est compatible avec la géométrie de la surface de rupture telle qu'elle a été décrite dans le § 3.1.2 (p.16) :

- la surface de rupture réelle est comprise dans la région délimitée par la bande de cisaillement,
- l'apparition de zones en traction conforte l'hypothèse de la présence de joints de tension supposée à partir de la géométrie de la surface de rupture.

Ainsi, la modélisation de ce premier scénario met en évidence l'existence d'un seuil piézométrique critique, sans avoir à faire intervenir des surpressions à la base des altérites.

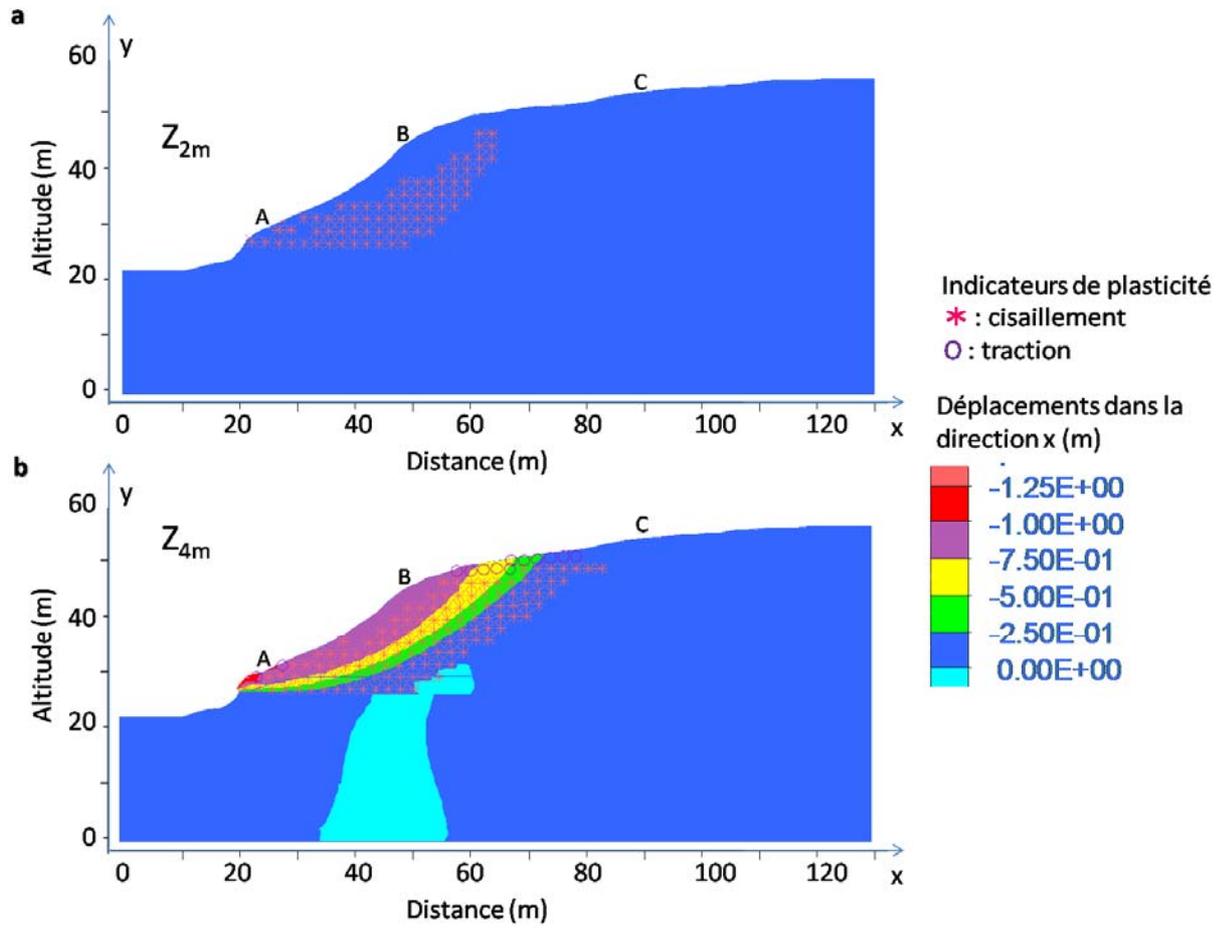


Illustration 19 : Augmentation du déplacement et disposition des régions entrées en plasticité en cisaillement et en traction, avec une surface piézométrique de la nappe à une altitude supérieure de (a) 2 m et (b) 4 m à celle de la base de l'altérite

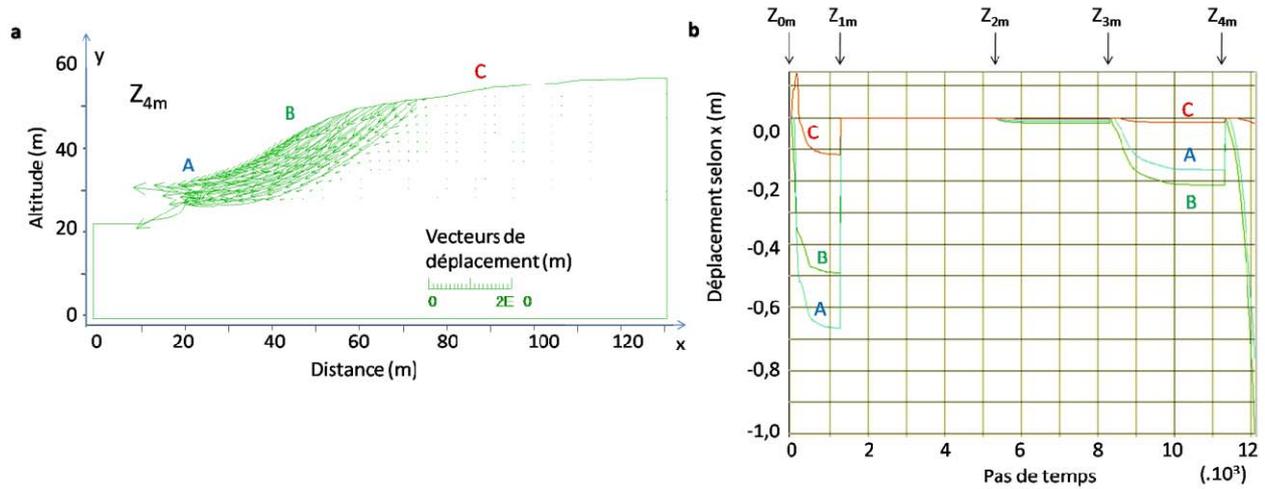


Illustration 20 : a. Déplacements du matériau pour l'état Z_{4m} du scénario 1 ; b. historique des déplacements aux points A, B et C

3.4.4. Scénario 2

Au cours du scénario 2, pour chaque région de l'altérite saturée (scénario 2a : saturation de la région (1), 2b : de la région (2), 2c : de toute l'altérite), le niveau de la nappe à la base de l'altérite est progressivement augmenté comme dans le scénario 1.

La présence du poids supplémentaire en haut de versant que représentent les zones saturées a pour conséquence un développement plus précoce de la bande de cisaillement. En effet, dès l'état Z_{3m}, les indicateurs de plasticité s'alignent de la base au sommet du versant (traction en sommet et cisaillement par ailleurs ; illustration 21a), alors que dans le scénario 1, ils étaient uniquement localisés à la base et en milieu du versant (illustration 21b). Cependant, dans les deux cas, les déplacements engendrés par ce nouvel état sont faibles, et stoppent rapidement (illustration 22b). Dans cette configuration, où un secteur en traction est identifié en sommet de versant sans que ce dernier n'apparaisse totalement déstabilisé, le développement de joints de tension est, là aussi, probable.

La saturation de la seule partie sommitale du massif d'altérite apparaît plus déstabilisante que la saturation de l'ensemble du matériau : en effet, la saturation de la zone (1) (scénario 2a) est à l'origine du développement d'une bande de cisaillement de la base au milieu du versant, alors que l'augmentation de la surface saturée (région (2), scénario 2b, puis toute l'altérite, scénario 2c), n'est à l'origine de l'entrée du matériau dans le domaine plastique qu'en peu d'endroit (exemple illustration 23 en absence de nappe à la base de l'altérite). On observe le même phénomène lorsque la région (2) est saturée juste après l'état initial, sans saturation préalable de la région (1). Par contre la saturation directe de l'ensemble du massif d'altérite depuis l'état initial ne

génère que très peu de déformations. Ce phénomène se comprend de façon intuitive : la saturation du matériau se traduit par l'augmentation de sa masse, et lorsque cette surcharge est appliquée en sommet de versant, elle est plus déstabilisante que lorsqu'elle concerne l'ensemble du massif. En effet, la butée (force résistante) est alors le résultat de la masse du matériau non saturé alors que la poussée (force motrice) dépend de la masse du matériau saturé, plus élevée. **Ainsi, la saturation du massif d'altérite est d'autant plus défavorable qu'elle ne concerne que les régions proches de la surface.**

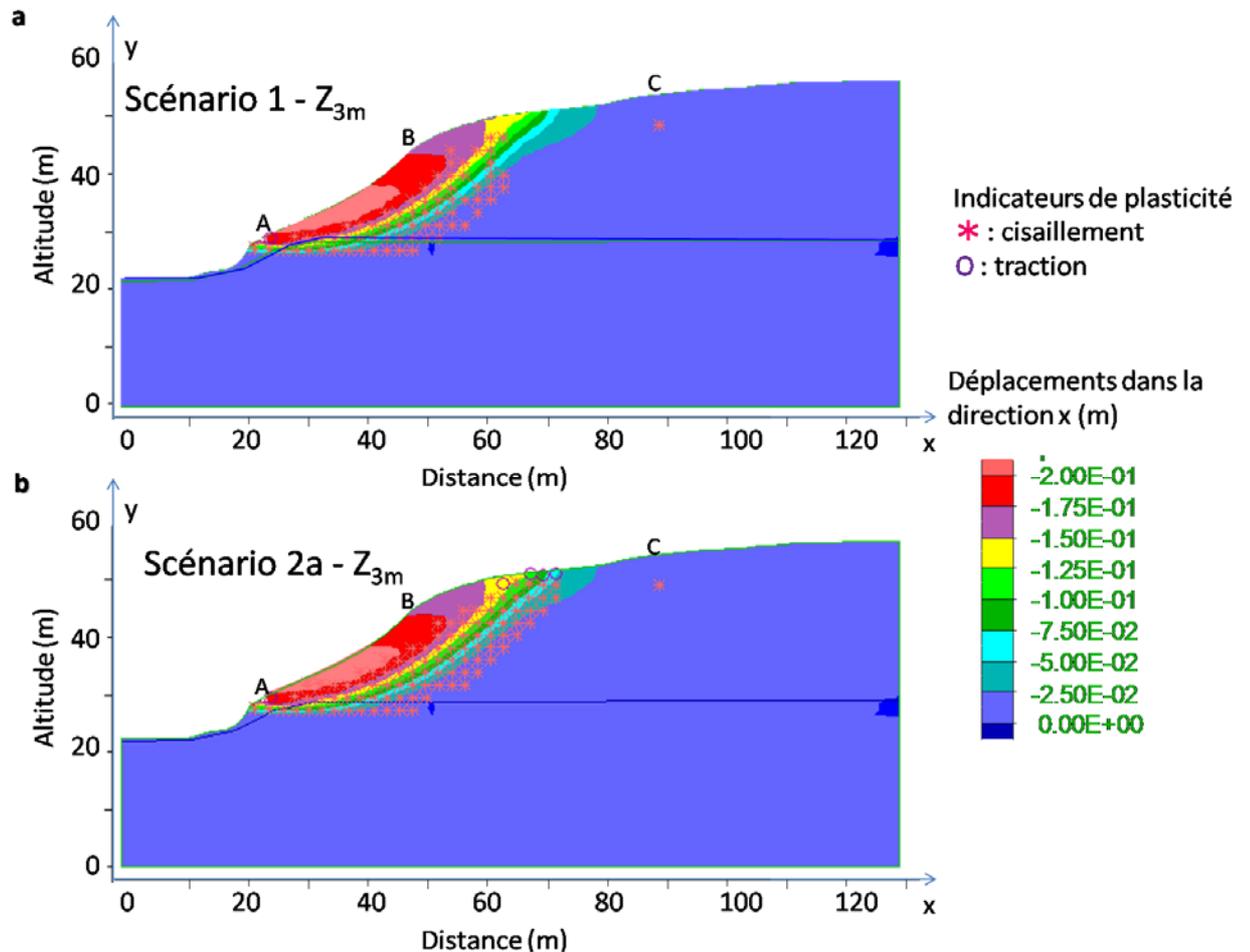


Illustration 21 : Comparaison des indicateurs de plasticité et des déplacements horizontaux de l'état Z_{3m} des scénarios 1(a) et 2 (b ; les résultats pour les scénarios 2a à 2c sont similaires, seul le scénario 2a est présenté sur la figure)

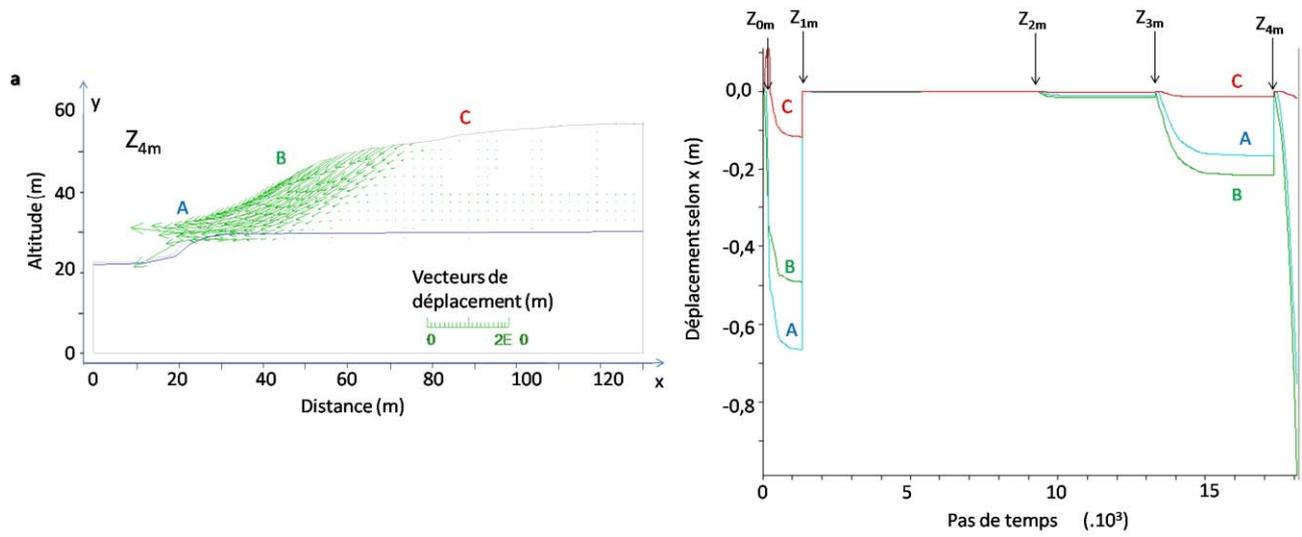


Illustration 22 : a. Déplacements du matériau pour l'état Z_{4m} du scénario 2; b. historique des déplacements aux points A, B et C

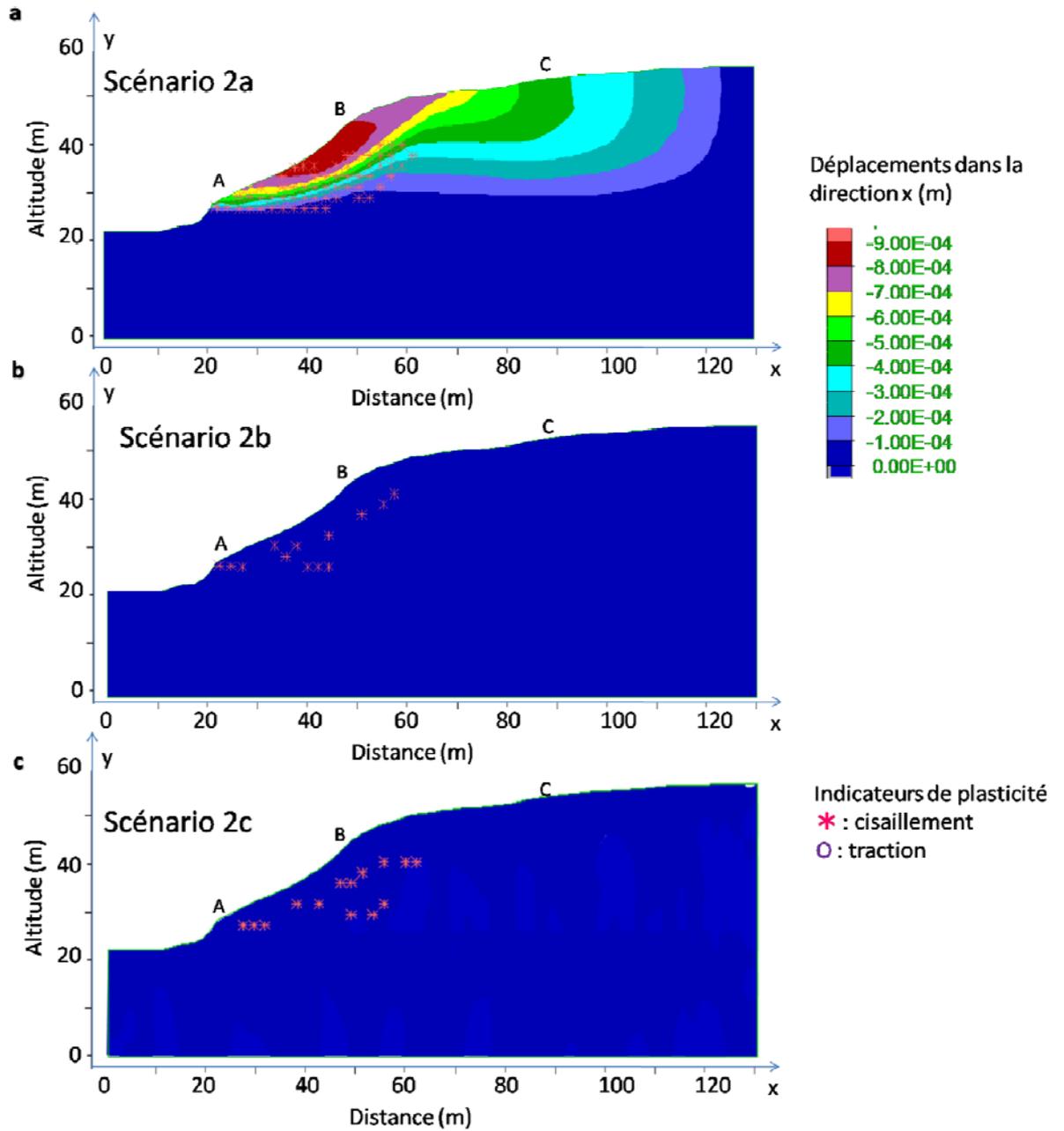


Illustration 23 : Résultats de la saturation progressive de l'altérite (pas de nappe à la base de l'altérite) : a. scénario 2a ; b. scénario 2b ; c. scénario 2c

3.4.5. Scénario 3

L'excavation du pied de falaise par l'érosion marine est simulée par modification de la topographie. Deux cas sont étudiés (illustration 24) :

- scénario 3a : une excavation est créée, correspondant à un recul de 2 m du pied du versant, soit, sur la coupe, une surface de 4 m²,
- scénario 3b : une excavation est créée correspondant à un recul de 4 m du pied du versant, soit une surface 12 m².

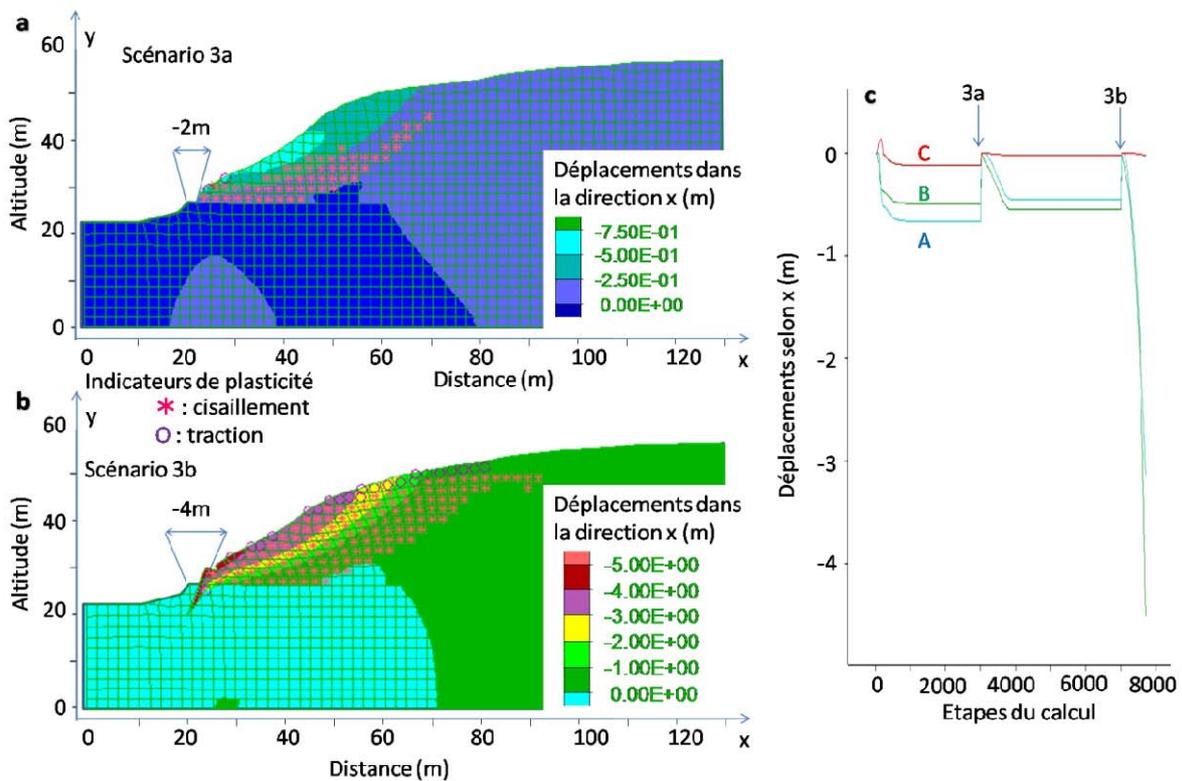


Illustration 24 : Géométrie du versant après simulation d'une excavation en pied du versant

L'excavation du pied de la falaise de 2 m est à l'origine du développement d'une bande de cisaillement du pied au milieu de versant ; en outre, les déplacements sont faibles et le versant est stable (illustration 24a et c). Un tel affouillement ne semble pas suffisant au déclenchement de la rupture.

Au contraire, suite à l'excavation créée dans le scénario 3b (recul de 4 m), la bande de cisaillement se développe jusqu'au sommet du relief ; des indicateurs de régions en traction sont, en outre, localisés à proximité de la surface (illustration 24b). Des déplacements importants apparaissent (supérieurs à 4 m ; illustration 24c) ; le calcul

est arrêté par le chevauchement des nœuds du maillage en pied du relief suite à ces déplacements importants (illustration 24b).

L'affouillement du pied du relief se révèle déstabilisateur uniquement lorsqu'il est la conséquence d'un important retrait de matériau. L'érosion d'une surface équivalente à celle présentée dans le scénario 3b au cours d'un seul événement océanique ou climatique à l'origine de fortes houles semble peu probable. Cependant, la sape de la base des altérites reste un phénomène aggravant, qui pourrait s'avérer déclenchant dans le cas d'un cumul important du volume érodé. C'est pourquoi il ne doit pas être négligé.

3.4.6. Etude de la stabilité du profil de versant après glissement

La stabilité du versant avec le profil post-glissement, levé en juillet 2004, est estimée par le calcul du facteur de sécurité à partir du module FLAC Slope. Sans même avoir besoin d'intégrer une saturation de l'altérite, on observe le développement d'une bande de cisaillement en arrière de l'escarpement principal (illustration 25). La zone est instable, avec un facteur de sécurité égal à 0,90. Ce modèle reproduit ce qui a été observé quelques années après le glissement principal (c.f. : § 3.1.3) : la niche d'arrachement est une zone instable.

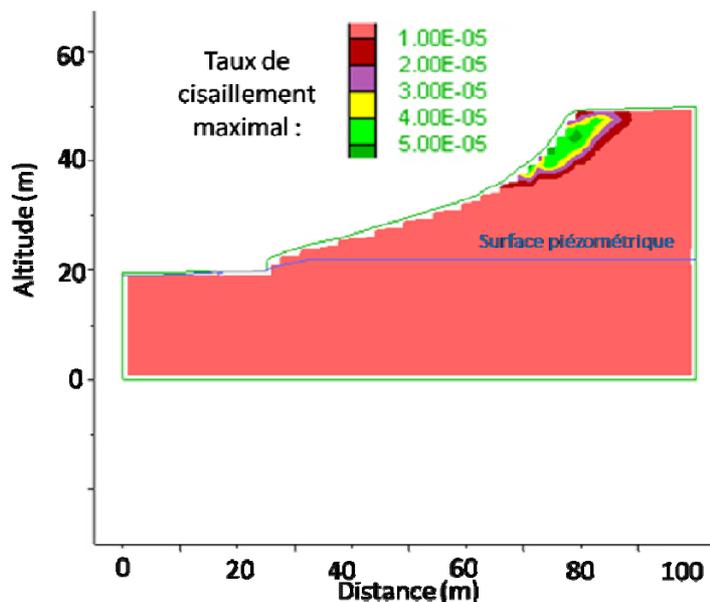


Illustration 25 : Modèle de relief côtier avec la topographie post-glissement ; l'escarpement est instable ($F = 0,90$)

Ce type d'instabilité secondaire est à l'origine d'une évolution régressive de la zone mobilisée. En outre, le pied de la surface de glissement demeure le pied du versant. Un tel glissement ne va donc pas engendrer un recul du trait de côte, mais c'est la morphologie du relief qui change et notamment le haut de falaise qui recule. Cependant, le profil final du versant, après érosion de la masse glissée et rajustement

des escarpements trop pentus, est, in fine, sensiblement parallèle à celui qui existait initialement. Une zone qui a subi une telle évolution, glissement de terrain suivi de l'érosion de la masse glissée, est donc potentiellement re-mobilisable : les conditions géométriques restent en effet sensiblement semblables, seules les conditions hydrogéologiques ont pu changer à la faveur de réorganisations des écoulements.

4. Outil de détermination ponctuelle de l'aléa lié aux altérites

4.1. PRINCIPE

L'urbanisation est concentrée dans les baies et sur le littoral des communes de Bidart et de Guéthary. De nombreuses habitations sont construites au sommet des reliefs côtiers. De par leur forte urbanisation, ces zones, qui sont également les zones à fort aléa glissement de terrain dans les altérites, sont vulnérables. Il en résulte, à l'échelle régionale, un risque majeur lié aux instabilités des versants d'altérites.

Cependant, en fonction des variations géologiques, morphologiques, hydrogéologiques et des activités anthropiques, le risque ne sera pas systématiquement équivalent en tout point du littoral, ni à tout moment : en effet, l'aléa est susceptible d'évoluer avec la géomorphologie de chaque site. Chaque versant est, en effet, un cas particulier, et il est nécessaire de l'étudier et de le comprendre avant de prendre des décisions d'aménagement ou de protection. C'est pourquoi, nous proposons un outil dont le but est l'estimation locale de l'aléa.

Les enjeux majeurs des zones littorales se situent pour la plupart au sommet des reliefs littoraux. C'est pourquoi, la gestion du risque dans ce type d'environnement doit être focalisée sur le recul du sommet des falaises (Moore and Griggs, 2002). Ce dernier, dans le cas des reliefs formés par les marno-calcaires à faciès flysch ou leur altérite, est la conséquence de nombreuses instabilités de terrain de type circulaire. Les glissements circulaires sont, à ce titre, l'objet majeur de l'aléa mouvement de terrain sur ce site d'étude.

Nous proposons ici un outil dont l'objectif est l'estimation de l'aléa mouvement de terrain, en effectuant peu ou pas d'investigations et d'analyses coûteuses, de façon à mettre à jour régulièrement cette cartographie en fonction de l'évolution de l'environnement. Il est basé sur une connaissance historique du site, et sur des observations naturaliste, morphologique, géologique et hydrogéologique.

Cet outil permettra d'estimer l'aléa à partir de la présence ou l'absence des différents facteurs de prédisposition, préparant, aggravant ou déclenchant et du volume potentiellement mobilisable. Il est composé des éléments principaux préconisés dans les méthodologies classiques de réalisation de la cartographie de l'aléa (Garry et al., 1997, Besson, 2005) : recensement de l'information et interprétation des indices visibles par photo-interprétation et sur le terrain. Pour ce faire deux éléments principaux ont été créés, une base de données des événements déjà produits, et un guide d'observation sur le terrain. Afin de saisir les informations et de les traiter de façon synthétique, une fiche est proposée ; basée sur un code de couleur, elle permettra d'estimer l'aléa.

L'aléa est classiquement estimé sans prendre en compte d'éventuels dispositifs de protection (Garry et al., 1997). Cependant, nous proposons ici de les considérer en ajoutant un indice à l'aléa, fonction de la qualité et de la pertinence de l'ouvrage de protection.

4.1.1. Base de données « mouvements de terrain »

Les méthodologies généralement utilisées pour l'estimation de l'aléa (Garry et al., 1997, Besson, 2005) préconisent l'une comme l'autre une première phase de recensement des instabilités actuelles et anciennes. En effet, une zone qui a été instable, l'est potentiellement de nouveau.

Connaitre l'historique d'un site nécessite un travail préalable d'archivage de l'information. Ainsi, afin de faciliter le recensement de l'information lors de l'estimation de l'aléa, une base de données a été créée ; elle permet de regrouper les informations relatives aux instabilités littorales. Cette base, est un recueil de données géoréférencées sur les mouvements de terrain anciens ou récents. Elle doit bien entendu être mise à jour à chaque nouvel événement.

La consultation de cette base de données est un indice précieux de l'activité de la zone étudiée. Ainsi, si plusieurs glissements de terrain ou un seul, mais qui est fréquemment réactivé (plusieurs fois par siècle) sont recensés, alors la zone présente potentiellement un aléa fort, à confirmer par la visite de terrain.

4.1.2. Observations de terrain

e) Observations sur documents cartographiques

L'étude d'un site particulier doit se faire à toutes les échelles ; avant de s'intéresser à l'échelle locale, il est indispensable de le replacer dans son contexte régional.

La visite de terrain doit ainsi être précédée de la consultation de la carte géologique, sur laquelle les altérites sont cartographiées (à partir de 2010, Carte géologique de Bayonne 1/50 000 ; Karnay, en cours). Le contexte géologique déterminé à l'échelle de la carte géologique, il sera nécessaire de vérifier les informations sur le terrain. De plus, les cartes du mur ou de l'épaisseur de l'altérite et la carte piézométrique, fournies dans ce document, peuvent donner une première indication sur la géométrie de ce matériau et de la nappe sur le site d'étude.

L'étude des photographies aériennes est également un préalable indispensable pour détecter tout indice de mouvement de terrain : fluage à l'origine d'une topographie légèrement déformée ou mamelonnée, ou glissement important avec des escarpements et des déformations importantes de la topographie.

f) Géologie

L'opérateur qui cartographie l'aléa, qu'il soit géologue ou géotechnicien, doit sur le terrain être capable d'identifier l'altérite et les morphologies associées. Ainsi, nous proposons une description rapide de chacune des formes importantes à reconnaître :

- la roche-mère est l'association de roches sédimentaires dures (calcaires) et tendres (marnes). Elle est litée et présente potentiellement une structure plissée et fracturée,
- l'altérite est une argile silteuse au sein de laquelle apparaissent des fragments siliceux noirs ou blancs anguleux ; en place, elle présente un litage millimétrique à centimétrique d'argiles, de silts et de bancs de fragments siliceux anguleux, ce qui lui donne un aspect feuilleté. Elle peut également être déformée (plis). L'altérite est au-dessus de la roche-mère, ces deux formations sont séparées par un volume dénommé l'horizon karstifié,
- l'horizon karstifié constitue le sommet des marno-calcaires, c'est une zone de transition avec l'altérite. Il peut être épais de plusieurs mètres, et est caractérisé par la présence de discontinuités oxydées et de conduits creusés dans les calcaires de la roche-mère, de diamètre inférieur au mètre. Ces conduits sont vides ou remplis d'altérite. Dans certains cas, de l'eau peut y circuler.

Une fois ces éléments identifiés, il faut, sur le terrain, estimer l'épaisseur maximale d'altérite. La surface de rupture du glissement le plus important pouvant potentiellement se produire sur le site d'étude passe par la base de l'altérite ; ainsi l'épaisseur de l'altérite permet une estimation des volumes engagés et donc de l'intensité du phénomène. Les structures majeures, si elles existent (failles, discontinuités majeures), doivent être également relevées : elles peuvent potentiellement conduire la surface de rupture.

g) Morphologie

Deux caractéristiques de la morphologie du versant sont retenues : l'angle de la pente et la hauteur totale de la falaise.

Un versant à forte pente est potentiellement plus favorable à un glissement qu'un versant à plus faible pente. A titre indicatif, l'angle de frottement minimal des altérites étant proche de 20°, on identifiera les versants sans indice de mouvements, mais avec une pente supérieure à cette valeur, comme une zone à aléa moyen, et, en deçà, et jusqu'à 5°, comme une zone à aléa faible. Cependant, une adaptation est effectuée d'une part, pour les zones à très faibles épaisseur d'altérite (inférieure à 5 m), pour lesquelles on considèrera le risque comme faible jusqu'à une pente de 25° et, d'autre part, pour les très fortes épaisseurs d'altérite (>25 m), pour lesquelles l'aléa est moyen pour les pentes supérieures à 15°. Cette prise en compte de l'épaisseur d'altérite se justifie par l'intensité du glissement potentiel : dans une faible épaisseur d'altérite, le

volume mobilisé est peu important, l'aléa est plus faible que pour un versant composé par une forte épaisseur d'altérite au sein duquel peut se développer un mouvement de grande ampleur relativement à la taille des instabilités recensées sur la côte.

A ceci s'ajoutent les indices de mouvements potentiellement décelables sur le terrain : gradins d'arrachement, joint de tension, déformations, dégâts sur le bâti, etc... Des indices de fluage du versant seront interprétés en aléa moyen ; des indices de mouvements plus importants, en aléa fort.

h) Les conditions hydrogéologiques initiales

L'eau souterraine est un élément important de la détermination de l'aléa. Cependant, il n'est pas toujours évident de détecter sa présence. Une base de données disponible au sein du SIG de l'Observatoire de la Côte Aquitaine recense les puits et piézomètres connus à ce jour sur le site ; sa consultation permettra de déterminer l'existence d'un ouvrage à proximité du site d'étude et, le cas échéant, de connaître le niveau d'eau voire les battements de nappes. Lors des investigations de terrains, la présence de sources naturelles provenant de l'horizon karstifié à la base d'une pente formée par les altérites supérieure à 10° placera le site en aléa moyen.

De plus, une venue d'eau, naturelle ou non, en haut de relief formé par les altérites est un facteur aggravant. Sa présence, sur une pente supérieure à 10°, placera le site en aléa fort.

i) Autres

Localement, selon les cas, d'autres éléments seront à considérer, comme l'excavation en pied de relief, la surcharge en sommet, la végétalisation du site, les actions anthropiques diverses, dont l'irrigation en amont de la zone potentiellement instable, etc...

En particulier la probabilité d'une sape du pied du massif d'altérite par érosion marine ou action anthropique est à étudier en détail : plus la base de l'altérite sera proche du niveau marin, plus celle-ci est probable. Sur une altérite nue, l'effet de sape sera plus rapide et plus important que sur un massif protégé par de la végétation.

4.1.3. Fiche synthétique

La fiche synthétique par site récapitule les éléments vus précédemment. A partir de chaque observation, une case est à cocher, la couleur de la case renseigne sur le niveau d'aléa engendré par le phénomène considéré : rouge pour fort (G3), jaune pour moyen (G2) et bleu pour faible (G1), avec G pour indiquer « Glissement de terrain », et le chiffre indique le niveau d'aléa.

L'aléa le plus fort répertorié sur cette fiche est l'aléa du site : même si une seule case rouge a été cochée, l'aléa est fort. Le tableau « Estimation du niveau d'aléa glissement de terrain dans les altérites » formalise ce principe.

Les ouvrages sont pris en compte de la manière suivante :

- un ouvrage entretenu, selon son efficacité face à l'aléa, fait diminuer ce dernier de zéro à deux points,
- un ouvrage non entretenu ne fera pas diminuer l'aléa.

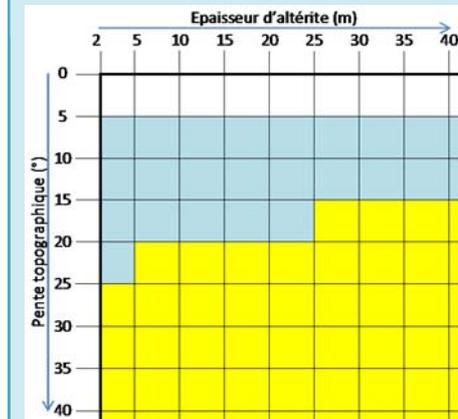
Ainsi, une zone en aléa glissement de terrain fort, qui aura été aménagée par un système de drainage et un reprofilage régulièrement entretenu, sera, par exemple, noté G31, avec 1 utilisé pour désigner le niveau d'aléa après confortement. Cependant, cette amélioration du niveau d'aléa est limitée : on ne peut passer d'un aléa faible ou plus à un aléa nul. C'est pourquoi, une zone en aléa fort (G3) ou moyen (G2) protégée avec un ouvrage entretenu et adapté ne sera, au mieux, qu'une zone, après aménagement, en aléa faible (G21 ou G31). Les zones en aléa faible (G1) n'évolueront pas. Le tableau « Efficacité de l'ouvrage de protection » permet de déterminer la valeur de cet indice.

ESTIMATION DE L'ALEA SUR UN RELIEF LITTORAL FORME DANS L'ALTERITE

IDENTIFIANT				
Identifiant du site				
Commune				
Lieu-dit				
Coordonnées (WGS84)	N	E		
Auteur de la fiche				
Date de la fiche				
ETUDE HISTORIQUE				
Glissements préexistants	<input type="checkbox"/> Aucun	<input type="checkbox"/> 1 – inactif non reproductible, faible volume	<input type="checkbox"/> 1 – actif	<input type="checkbox"/> >1
ETUDE PHOTOGRAPHIQUE ET DE TERRAIN				
Indices de mouvements	<input type="checkbox"/> Aucun	<input type="checkbox"/> indices de fluage	<input type="checkbox"/> indices de mouvements importants	

ETUDE DE TERRAIN

Morphologie



Si pente > 10° : Hydrogéologie :

Sources provenant de l'horizon karstifié ou des altérites

non

oui

Venue d'eau importante en haut de relief

non

oui

Si pente > 10 et base de l'altérite proche du niveau de la mer

Probabilité et conséquence de l'excavation en pied de pente par érosion marine :

faible

nul

moyen

fort

Autres éléments à considérer :

Excavation en pied de pente

Végétation

Action anthropique

Surcharge en sommet

Irrigation en amont

COMMENTAIRES

NIVEAU D'ALEA

G□□

Estimation du niveau d'aléa glissement de terrain dans les altérites

	Critère couleur				Critères détaillés
FORT G3	<input checked="" type="checkbox"/> > 1	<input checked="" type="checkbox"/> indif	<input checked="" type="checkbox"/> indif	<input type="checkbox"/> indif	<p>Zone de glissements actifs actuellement (nombreux indices de mouvements, dégâts matériels) ou à proximité immédiate.</p> <p>Zone de propagation potentielle de glissements amont</p> <p>Zone de glissements anciens importants ou récurrents</p>
MOYEN G2	<input checked="" type="checkbox"/> =0	<input checked="" type="checkbox"/> >1	<input checked="" type="checkbox"/> indif	<input type="checkbox"/> indif	<p>Morphologie de versant favorable aux instabilités (pente supérieure à 20°) mais pas d'indices de mouvements</p> <p>Indices de fluage</p> <p>Ecoulement d'eau en sommet ou en milieu de falaise</p>
FAIBLE G1	<input checked="" type="checkbox"/> =0	<input checked="" type="checkbox"/> =0	<input checked="" type="checkbox"/> >1	<input type="checkbox"/> indif	<p>Pente faible à moyenne (pente entre 5° et 20°) avec présence de nappes souterraines</p>

Efficacité de l'ouvrage de protection

	Pas d'entretien	Entreenu régulièrement	Amélioration possible de l'aléa	
			G3	G2
Pas d'ouvrage	-	-	-	-
Enrochements seuls	0	0	aucune	aucune
Reprofilage et drainage	0	2	G31	G21
Reprofilage et drainage et	0	2	G31	G21

enrochements				
Mur de soutènement (avec drains dans le mur)	0	1	G32	G31

5. Conclusion

Les instabilités de terrain sont les résultats de l'action conjuguée de différents facteurs qui prédisposent et préparent une zone à la rupture, mais un seul phénomène la provoque, c'est le facteur déclenchant. **Le glissement de terrain du site d'Harotzen Costa à Guéthary et ceux, datés et localisés à proximité se sont produits au cours ou peu de temps après un événement pluvieux important.** Les précipitations apparaissent, dans les cas décrits sur Harotzen Costa, comme le facteur déclenchant la rupture par **l'augmentation**, d'une part, **de la teneur en eau dans l'altérite** et, d'autre part, **du niveau de la nappe contenue dans l'horizon karstifié**. En effet, une augmentation de l'altitude de la surface piézométrique de 4 m à la base de l'altérite, voire moindre dans le cas de la saturation de l'altérite dans la partie supérieure du versant, suffit à provoquer la rupture.

L'érosion du pied de falaise par les agents marins n'apparaît pas être impliqué dans le glissement d'Harotzen Costa, de même que dans de nombreux autres glissements dont le pied de la surface de rupture est situé hors d'atteinte de la houle. L'action de l'érosion marine apparaît ainsi principalement comme un facteur aggravant ; le déclenchement d'instabilités par l'action d'un tel processus ne peut être le résultat que d'un événement particulièrement intense.

A partir des connaissances acquises sur les altérites de la Côte Basque, en géologie, géotechnique et hydrogéologique, un outil de détermination de l'aléa mouvements de terrain a été mis en place. Cet outil permet d'estimer le niveau de l'aléa mouvements de terrain sans investigation complémentaire. Il permet de compléter et d'étayer la cartographie de l'aléa mouvements de terrain réalisée en 2005 et établie à dire d'expert sur le secteur couvert par les altérites du flysch à silex. Afin d'avoir une meilleure connaissance de l'aléa mouvements de terrain à l'échelle du littoral de la Côte Basque, il conviendrait d'adapter cet outil au contexte géologique et hydrogéologique.

6. Bibliographie

Antoine P. (1992), Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur, aspects géologiques, Bull. of the Int. As. for Eng. Geol., Vol.45, p.9-24

Antoine P. et Giraud A. (1993), Aide à la reconnaissance des principaux types de mouvements de terrain connus dans les Alpes du Nord, Commission des communautés Européennes, Programme EPOCH, Partie n°3, Vol n°2.

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. en collaboration avec M. Peter-Borie et A. Genna (2007) : Atlas cartographique des phénomènes naturels et des caractéristiques géologiques du littoral de la Côte Basque Rapport BRGM/RP-55262-FR, 30 illus., 3 ann., 16 p

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.

Azimi C. et Desvarreux P. (1996), Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain, Revue Française de Géotechnique n°76, 3ème trimestre, p. 63-74.

Besson L. (2005), Les risques naturels : de la connaissance pratique à la gestion administrative, Editions Techni.Cités, 594 p.

Chapeau C., Durville J.-L. (2005), L'eau et les risques de glissements de terrain, Geosciences n°6, éd. BRGM, p.72-79.

Couture R., Antoine P., Locat J., Hadgigeorgiou J., Evans S.G. et Brugnot G., (1997), Quatre cas d'avalanches rocheuses dans les Alpes françaises, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, p.102-119.

Désurmont T. (1995), L'érosion littorale et les aménagements de protection contre la mer sur la Côte Basque (entre Guéthary et l'Adour). Université Bordeaux III, mémoire de DEA, 147 p.

Garry G., Grasz E. et Dupuy J.-L. (1997), Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles - Guide Général, La documentation Française, Paris, 76 p.

Gentier S. (2002), Projet ROCC. Stabilité des falaises côtières : les mécanismes d'éboulement, BRGM/RP-51743-FR, 45 p., 37 fig.

Guglielmi Y., Cappa F. and Binet S., (2005), Coupling between hydrogeology and deformation of mountainous rock slopes: Insights from La Clapière area (southern

Alps, France), Comptes Rendus Geosciences, Volume 337, Issue 13, September-October 2005, pp. 1154-1163.

IAEG, Commission on Landslides (1990), Suggested Nomenclature for landslides, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, n°41, p.13-16.

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'Ecole des mines de Paris, 333 p.

Lebourg T. (2000), Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans les moraines des Pyrénées centrales et occidentales (France), Thèse d'Université, Université Bordeaux 1, 362 p.

Le Mignon G. (2004), Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes de Hautes Provence, France), Thèse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, 261 p.

Martins-Campina B. (2005), Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe), Thèse de l'Université Bordeaux 1, 267 p.

Moore J.-L. et Griggs G.B. (2002), Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary, Marine Geology n°181, p.265-283

Peter-Borie M., Lucassou F., Aubié S. (2009) – Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral basque français et son arrière pays, Observatoire de la Côte Aquitaine – Rapport BRGM/RP-57054-FR, 55 p, 36 illus.

Peter-Borie M., Aubié. S. (2009) : Caractérisation du complexe Marno-calcaire du Crétacé Supérieur et altérites associées sur la Côte Basque. Rapport final, BRGM/RP-57055-FR, 30 illus., 2 ann, 57 p.

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.

Peter-Borie M. (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, 120 p.

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 Kófels (Tyrol, Autriche), Thèse ENPC, 252 p.

Philipponat G. et Hubert B. (2002), Fondations et ouvrages en terre, éd. Eyrolles, 548 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.

Varnes D.J. (1978), Slope movements Types and Processes. In : Schuster R.L. et Krizek R.J. (eds), Landslides Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176, National Research Council, Washington D.C., Chap.2, p.11-33.

Watremez P., Duperret A., Mortimore R.N. et ROCC team (2001), ROCC Project (Risk of Cliff Collapse) : the respective role of marine and geological parameters on chalk cliff collapses, in Coastal Rock Slope Instability : Geohazard and Risk Analysis Conference, 30-31 May 2001, Le Havre, France, p.11-12.

Wieczorek G.F. (1996), Landslide triggering mechanisms, in Turner A.K. and Scuster R.L. (eds), Landslides, investigation and mitigation, National Academy Press, Washington D.C., p.36-75

Annexe 1

Caractéristiques de rupture du glissement de La Muserie à Guéthary (d'après la fiche-type définie par Laugier, 2002)

LE VERSANT	
Localisation	
Localité	Guéthary (Pyrénées-Atlantiques), Lieu-dit : Harotzen Costa
Aménagements existants	aucun
Coordonnées géographiques du site	43°25'28"N – 1°36'58"W
Climat actuel	
Type de climat	Océanique modéré
Station météorologique la plus proche	Socoa (code station : 64189001)
Précipitations	Moyenne annuelle (1921-2008) : 1479 mm
Températures	Moyenne annuelle (1921-2008) : 14,3°C Moyenne des minima hivernaux : 8,9°C Moyenne des maxima estivaux : 20,6°C
Période de persistance du gel et couverture neigeuse	Gelée et précipitations neigeuses rares
Morphologie et géologie	
Forme du versant et de la vallée	Pente moyenne : 35°, Exposition : Nord-Nord-Ouest Altitudes extrêmes : 30 m et 7 m NGF
Formations géologiques du substrat	Flysch à silex de Guéthary et altérite associée
Cadre tectonique régional	Piémont pyrénéen

Structures du massif (sol ou rocheux)	Altérite : hétérogénéité lithologique et structurale multi-échelle, fragments de chailles, conservation de la structure de la roche-mère (stratification, plis, et éventuellement discontinuités majeures) Roche-mère : Dépôts lités, alternance de marnes et de calcaires, plis en chevrons de longueur d'onde métrique
Formations superficielles	Altérite : argiles silteuses hétérogènes ; plus de 30 m d'épaisseur dans cette zone
Hydrologie et hydrogéologie	
Réseau de drainage du versant	Les reliefs côtiers forment probablement l'exutoire du bassin versant topographique
Surface englacée, écoulements sous-glaciaire	aucune
Ecoulements hypodermiques et nappes de versant, sources associées	Eau présente dans l'altérite (circulations chenalisées) et dans les marno-calcaires (réseau karstique semi-captif ou libre)
Rivière de fond de vallée	Océan
Plan d'eau à la base du versant	Marnage : 3,7 m Niveau des plus hautes mers : 4,9 m NGF
Historique des déformations et rupture antérieures, à l'échelle du bassin versant	
Glissements anciens	Glissements circulaires dans l'altérite récurrents dans deux zones proches, fluage par ailleurs
Crêtes dédoublées	
Fauchages du versant	
LA ZONE SOURCE	
Caractéristiques morphologiques	

Altitudes extrêmes	30 m NGF
Pente moyenne	35°
Dimensions et limites	<p>longueur de la surface de rupture : 50 m</p> <p>longueur de la masse glissée : 48 m</p> <p>longueur totale : 53 m</p> <p>largeur de la surface de glissement au niveau de l'escarpement principal : 32 m</p> <p>largeur maximale de la surface de glissement : 44 m</p> <p>profondeur estimée de la surface de rupture : 4,4 m</p> <p>profondeur estimée de la masse glissée : 4,4 m</p>
Rapport épaisseur/longueur	0,09
Volume estimé	<7 000 m ³ .
Position du centre de gravité	
Aspects morphologiques particuliers	
Caractéristiques pétrographiques, géotechniques et structurales	
Types pétrographiques	Altérite : alternance d'argiles, de silts, de sables fins et de fragments de chailles
Etat du matériau	Altéré, potentiellement localement sous-consolidé
Orientation et pendages des familles de discontinuités	Plan de stratification de direction et pendage très variables, cependant des discontinuités majeures, continues sur plusieurs mètres, héritées des marno-calcaires peuvent apparaître (famille L : N5°E-80°W à N155°E-72°W)
Extension, espacement, ouverture et	Aucune information – discontinuités non

remplissage des discontinuités	visibles à l’affleurement
Discontinuités jouant un rôle sur la rupture	famille L : N5°E-80°W à N155°E-72°W: limite de l’extension du glissement ?
Caractéristiques mécaniques	
Propriétés pétrophysiques et mécaniques du sol ou de la roche	Valeurs retenues : Masse volumique humide : 1790 kg.m-3 Masse volumique saturée : 1850 kg.m-3 Module non drainé : 3 MPa Module drainé : 2 MPa Cohésion drainée : 3 à 20 kPa Angle de frottement effectif : 20 à 32°
Propriétés géométriques et mécaniques des discontinuités par famille directionnelle	-
Propriétés mécaniques du massif	-
Déformations et ruptures antérieures	Pas d’informations
Niche d'arrachement ancienne	
Fissures de traction, ouvertures de discontinuités, surfaces de cisaillement récentes	
Changements morphologiques	
Basculement de blocs / Chutes de blocs	
Hydrologie et hydrogéologie à l'échelle de la zone source	
Localisation et débit des sources	Ruissellement à la base du glissement (à proximité de la levée ouest-sud-ouest)

Réseau de drainage de la zone source	La zone draine probablement l'ensemble du bassin versant topographique
Surface englacée	
Écoulements hypodermiques et nappes de versant	Eau présente dans l'altérite (circulations chenalisées)
Nappes profondes avec sources de déversement et de trop plein	réseau karstique semi-captif ou libre dans les marno-calcaires
Couverture végétale au niveau de la zone source	
Formations végétales	Prairie en sommet de reliefs, arbustes (lauriers principalement) sur la pente, landes maritime en bas de pente
Pourcentage de la superficie de la zone source	Proche de 100%
LES PENTES INFÉRIEURES	
Profils topographiques	
Dénivelé entre la zone source et la base du versant <2 m	
Extension horizontale	<1 m
Angles de pente moyenne et par sections	90°
Forme en coupe verticale	Microfalaise quasi verticale
Forme en plan	
Formations du substratum, formations superficielles et couverture végétale	
Nature pétrographique du substratum, état d'altération du substratum	Microfalaise de marno-calcaires, plage : sables grossiers et graviers siliceux sur marno-calcaires
Paramètres géotechniques des formations géologiques	

Couverture végétale au niveau des pentes inférieures	
Formations végétales	Aucune
Pourcentage de la superficie de la zone source 0%	
source	

LE SCENARIO DE RUPTURE	
Caractéristiques générales	
Date, heure, durée	24 janvier 2004, ?, ?.
Conditions climatiques	Précipitations abondantes (50 mm en 24 heures)
Facteurs déclenchants ou aggravants	précipitations
Processus de déformation et de rupture au niveau de la zone source	
Processus général	Première rupture observée
Surface de rupture	Rupture circulaire délimitée par des flancs rectilignes
Direction moyenne du vecteur déplacement	N 320°E
Nombre de phases de rupture	1
Cicatrice de la rupture	Largeur de la surface de glissement au niveau de l'escarpement principal : 32 m profondeur : 3 à 5 m
Déplacement et propagation de la masse déstabilisée sur les pentes inférieures	
Dimension de la masse déplacée	longueur de la masse glissée : 48 m

	épaisseur maximale : 4,4 m
	largeur maximale : 44 m
Cinématique du déplacement ou de la propagation	Arrêt rapide sur la plage
Comportement et transformation du matériau	Mouvements du matériau constituant la masse glissée observés plusieurs années après l'événement, Teneur en eau du matériau mobilisé élevée
Phénomène à l'interface basale matériau substrat	
Autres phénomènes particuliers	
Aspects énergétiques	
Aire dévastée par la propagation du phénomène	Quelques mètres carrés de plage
Mécanismes d'arrêt et caractéristiques des dépôts	
Paramètres géométriques et cinématiques	
Contrôle géomorphologique du mouvement et de la morphologie des dépôts	
Etude de la stabilité finale des dépôts	Mouvements du matériau constituant la masse glissée observés juste après et plusieurs années après l'événement
Caractéristiques et nature des dépôts	Disparition de la structure litée de l'altérite, matériau boueux
Présence d'un plan d'eau en bas de la pente et scénario d'impact	Erosion du pied par les agents marins directs
Formation d'un barrage	-
Formation d'un lac de barrage	-

Stabilités des terrains après l'événement	
Menace résiduelle	Erosion régressive de la niche d'arrachement
Autres types d'instabilités	
Initiation d'un autre mouvement de terrain	



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

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