

# Compréhension des mouvements de terrain de la commune de Pénestin, Morbihan (56) :

Retrait-gonflement des argiles ou érosion littorale

Rapport final

BRGM/RP-62681-FR

Mai 2013



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Compréhension des mouvements de terrain de la commune de Pénestin, Morbihan (56) :

## Retrait-gonflement des argiles ou érosion littorale

### Rapport final

**BRGM/RP-62681-FR**  
Mai 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2012

**Jean-Michel SCHROETTER**

Avec la collaboration de C.BONDIS et F. PILLOIS

**Vérificateur :**

Nom : Emmanuelle PLAT

Date : 11/09/13

Signature :

**Approbateur :**

Nom : Eric PALVADEAU

Date : 23/09/2013

Signature :

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 9001:2008.**

**Mots clés :**

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Schroetter J.-M-. 2013, avec la collaboration de C. Bondis et F. Pillois, Compréhension des mouvements de terrain de la commune de Pénestin, Morbihan (56) : Retrait-gonflement des argiles ou érosion littorale, Rapport final, BRGM/RP-62681-FR, 83 p., 35 fig., 2 ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Dans le cadre d'une collaboration entre le BRGM et la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Morbihan (DDTM 56), afin de déterminer l'origine de nombreuses fissures affectant des habitations sur la commune de Pénestin, le BRGM a réalisé une analyse de l'aléa retrait-gonflement des argiles, des mouvements de la falaise de la Mine d'Or puis de l'érosion littorale sur la commune.

Une cartographie géologique de détail, valable à l'échelle du 1/10 000, a été réalisée. Par ailleurs, deux dispositifs de suivi (1) des mouvements de la falaise (inclinomètres) et (2) des fissures (jauges saugnac) sur quelques habitations, ont été mis en place.

L'enregistrement des jauges installées sur les fissures des maisons montre des mouvements : ouverture et fermeture, respectivement pendant les périodes sèches et humides, et la cartographie géologique détaillée met en évidence une formation géologique argileuse (qui n'existait pas jusqu'à présent sur les cartes géologiques) située au droit des habitations fissurées.

La caractérisation (lithologique, géotechnique et minéralogique) de cette formation géologique argileuse, dans le respect de la méthodologie nationale, montre qu'elle présente une susceptibilité forte au phénomène de retrait-gonflement et qu'elle est très vraisemblablement responsable des fissures affectant les habitations. Cela semble confirmé par l'évolution des fissures enregistrées sur les habitations qui s'ouvrent et se referment au gré des saisons (au moins sur la période d'observation).

Enfin, l'enregistrement de la falaise montre que le mouvement sur celle-ci ne semble pas être un mouvement de type rotationnel enraciné sur un niveau de décollement principal mais des mouvements de type glissement suivant des plans verticaux opérant par à-coup de 1 à 2 mètres. Ces mouvements ne semblent pas en mesure d'engendrer les fissures observées sur les habitations.

Enfin, les vitesses de recul du trait de côte sont en relation avec différentes géométries de côtes et de falaises sur lesquelles s'opèrent différents modes d'érosion. Les vitesses d'érosion de l'ordre de 0.75 m/an, les plus importantes, sont observables au niveau de la falaise de la Mine d'Or, alors que sur sa partie estuarienne, on remarque le déplacement « longshore » depuis l'océan vers le fleuve, de matériaux sablo-graveleux, avec une vitesse d'accrétion de 1.5 m/an perpendiculairement à la côte. Enfin, une vitesse d'érosion (0.625 à 0.75 m/an), similaire aux vitesses mesurées à la Mine d'Or, a été observée dans le fond de la Baie du Bile, elles sont la conséquence de l'érosion différentielle due à la présence d'un ouvrage de protection de la route côtière.



# Sommaire

<b>1. Contexte de l'étude.....</b>	<b>9</b>
1.1. INTRODUCTION .....	9
1.2. PROGRAMME MIS EN PLACE .....	10
1.2.1. Acquisitions géologiques.....	10
1.2.2. Acquisitions hydrogéologiques.....	11
1.2.3. Acquisitions géotechniques et de sinistralité .....	11
1.2.4. Chronogramme, <i>délivrables &amp; résultats</i> .....	12
<b>2. Rappels sur les aléas .....</b>	<b>13</b>
2.1. ALEA RETRAIT-GONFLEMENT .....	13
2.1.1. Facteurs intervenant dans le retrait-gonflement des argiles .....	13
2.1.2. Carte des argiles du Morbihan .....	17
2.1.3. Hiérarchisation des formations argileuses et cartographie de la susceptibilité au retrait-gonflement.....	19
2.1.4. Cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement.....	22
2.2. L'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT SUR PENESTIN .....	22
2.3. EROSION LITTORALE SUR PENESTIN .....	23
<b>3. Contexte géologique &amp; géomorphologique .....</b>	<b>25</b>
3.1.1. Contexte géomorphologique .....	25
3.1.2. Contexte géologique (référence ci-dessous, dans Cagnard et al., 2004) .....	26
3.1.3. Contexte hydrogéologique .....	30
<b>4. Présentation des résultats .....</b>	<b>33</b>
4.1. LES DONNEES GEOLOGIQUES .....	33
4.1.1. Les données de forages.....	33
4.1.2. Les observations géologiques.....	35
4.1.3. La carte géologique et la carte des argiles .....	38
4.2. LES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES.....	40
4.2.1. Les données de forage .....	42
4.2.2. Le suivi de la nappe .....	43
4.3. LES DONNEES GEOTECHNIQUES .....	44
4.3.1. Le Suivi des jauges de type « saugnac » .....	45
4.3.2. Le suivi des inclinomètres .....	47
4.3.3. Les analyse de sols .....	50
4.4. L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET L'EROSION LITTORALE .....	50
<b>5. Interprétations et conclusions.....</b>	<b>57</b>

**6. Bibliographie.....63****Liste des illustrations**

Illustration 1 –Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche .....	13
Illustration 2 – Carte géologique départementale des formations argileuses et marneuses du Morbihan, accompagnée de sa légende (Schroetter et al., 2010) .....	19
Illustration 3 - Degré de susceptibilité pour chaque formation argileuse ou marneuse du département du Morbihan (Schroetter et al., 2010) .....	20
Illustration 4 - Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des formations argileuses ou marneuses du département du Morbihan (Schroetter et al., 2010) .....	21
Illustration 5 : Carte d'aléa retrait-gonflement avant cette étude, de la commune de Pénestin (Point rouge : sinistres recensés, Orange : aléa moyen, jaune : aléa faible : source BRGM ; Trait noir pointillé : trait HistolittV2, source SHOM-IGN) .....	23
Illustration 6 - Extrait du site de l'IFEN au niveau de la commune de Pénestin : Trait de côte en rouge – en érosion, en gris – pas d'information : Source Eurosion 2003). .....	24
Illustration 7 – Géomorphologie de la commune de Pénestin (MNT 50 m IGN) ; Limite de commune trait Histolitt V2 – SHOM-IGN .....	25
Illustration 8 – Schéma structural et Coupe schématique de la partie interne de la chaîne hercynienne de Bretagne Sud (Cagnard et al., 2004).....	27
Illustration 9 : La falaise de Pénestin au niveau de la Mine d'Or (56) ; Les micaschistes ne sont plus ici reconnaissables, ils laissent place à des argiles et limons kaoliniques d'altération	28
Illustration 10 – En haut, Découpage sédimentaire de la formation de Pénestin par van Vliet et al, (2009) ; en bas, par Brault et al. (2001).....	29
Illustration 11 –Modèles de déformation des terrasses alluviales de Pénestin, à gauche d'après van Vliet et al. (2009) et à droite d'après Brault et al. (2001).....	30
Illustration 12 – Organisation des altérites et de l'aquifère d'après Wyns (1998) .....	31
Illustration 13 – Localisation des ouvrages réalisés (forages) et des fissures/lézardes recensées et observées sur la commune de Pénestin (56) .....	34
Illustration 15 – A : Passage latéral et vertical du conglomérat ferrugineux à la formation argilo-limoneuse vert kaki, formation qui cache la faille N110/120 ; B – Détail du conglomérat, fragment de micaschistes ; C – Discordance entre le conglomérat et les micaschistes qui cache ici les accidents N020.....	36
Illustration 16 – Faille N110/120 au niveau des falaises Est de la pointe du Bile .....	37
Illustration 17 – A – Diapir d'argiles d'altération (argilocinèse) et faille N020/030 ; B – Détail en bordure de la faille N020/030, la foliation métamorphique des micaschistes est décalée ; C – Même figure qu'en B, mais au niveau d'un filon de quartz parallèle à la foliation. ....	37
Illustration 18 – Carte géologique de détail au 1/10 000 et carte géologique des formations argileuses extraite pour la commune de Pénestin(56)   .....	40
Illustration 20 – Coupe schématique Est-Ouest au niveau de la falaise (Inclinomètre 1), montrant la relation entre la géologie et l'hydrogéologie.....	43
Illustration 21 – Evolution des niveaux des nappes phréatiques autour de la zone sinistrée (pointillé : nappe de la terrasse alluviale ; plein : nappe des altérites) et Relation avec les pluies efficaces (Station de Theix) .....	44
Illustration 22 – Exemple de jauge-saugnac type G1 installée .....	45

Illustration 23 – Localisation des jauges ; Evolution de l'écartements de lèvres des lézardes sur le secteur de Pénestin sinistré et les pluies efficaces (station de Theix) et la pluviométrie moyenne annuelle (Station de la Tour du Parc) en 2012/2013.....	46
Illustration 24 : Schéma de principe de l'inclinomètre, la coupe technique est donnée en annexe (voir inclino 1 Nord).....	48
Illustration 25 : Suivi des déformations suivant les voies A et B de l'inclinomètre .....	49
Illustration 26 : Commune de Pénestin (56) – Trait histolitt V2 et Images de la campagne de 1962 de l'IGN géoréférencées ; Secteurs présentés ci-dessous en rouge et points homologues de l'erreur entre les deux campagnes d'images.....	51
Illustration 27 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 1 (Trait noir pointillé, trait histolittV2 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation).....	52
Illustration 28 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 2 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2.0 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation au nord jusqu'à la source et la ligne de crête au sud) .....	53
Illustration 29 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 3 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2.0 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation).....	54
Illustration 30 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 4 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2.0 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation).....	55
Illustration 31 – Tableau synthétique des notes lithologique, géotechnique et minéralogique et du niveau d'aléa des formations géologiques argileuse de la commune de Pénestin (56) .....	57
Illustration 32 – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles sur la commune de Pénestin (jaune : faible ; orange : moyen et rouge : fort) .....	58
Illustration 33 – Falaise de la Mine d'Or proche de la Source : les plans verticaux (flèche blanche) correspondent aux plans de glissement des mouvement de terrain .....	59
Illustration 34 – Diapirs d'argiles d'altération remontant dans la terrasse alluviale et ravinement en tête de falaise (Le Mine d'Or, Pénestin) .....	60
Illustration 35 – Falaise depuis la Source et regard vers le nord : Après l'enrochement, développement de végétation sur les pentes générés par l'érosion.....	60

## Liste des annexes

Annexe 1 : Coupes lithologiques et techniques des forages réalisés au cours de l'étude .....	65
Annexe 2 : Données de foration brutes, Analyses géotechniques et aux rayons X .....	75



# 1. Contexte de l'étude

## 1.1. INTRODUCTION

Les phénomènes de **retrait-gonflement** de certains sols argileux provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel.

Le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) actuellement, Ministère de L'Écologie, du Développement Durable et de L'Énergie (MEDDE), a confié au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), à travers sa mission de service public sur les risques naturels, l'élaboration d'une méthodologie nationale de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles afin de réaliser des **cartes départementales de l'aléa retrait-gonflement** dans le but de définir les zones exposées au phénomène. Ce constat scientifique établi à l'échelle départementale avait pour objectif principal de fournir un document de référence permettant une information préventive.

Le Morbihan a fait l'objet d'une cartographie de l'aléa retrait-gonflement en 2010. Ce département, bien que peu touché par le phénomène (il a été classé en 75<sup>ème</sup> département métropolitain en termes de coût d'indemnisation, soit 407 000 euros d'après les données CCR de septembre 2008), n'a pas été épargné. Ainsi, sur les **261** communes que compte le département, **3** ont été reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse, pour des périodes allant de janvier **1990** à septembre **2008**. La commune de Pénestin a été reconnue deux fois en état de catastrophe naturelle pour les périodes de janvier 1991 à aout 1998 et de juillet 2003 à septembre 2005. Par ailleurs, dans le cadre de la cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles du Morbihan, réalisée par le BRGM, entre 2007 et 2010 (Schroetter et al., 2010), la **commune de Pénestin** avec **11** sinistres déclarés à elle seule, et **15** sinistres recensés, s'est vu attribuer « **la palme** » de la commune du Morbihan, la plus sinistrée.

Or, l'aléa retrait-gonflement déterminé sur cette commune selon la méthodologie nationale ne permet pas d'expliquer cette attribution de **première commune sinistrée**. En effet, la commune de Pénestin repose, d'après la carte géologique au 1/50 000, principalement sur une seule et même formation géologique composée d'argiles d'altération surmontées d'alluvions grossiers et cartographiée en aléa moyen selon la méthodologie nationale (Schroetter et al., 2010). Cette formation ne présente des sinistres recensés que sur une partie alors que d'autres parties de la formation sont urbanisées.

Afin de comprendre l'origine de ces sinistres, le BRGM a élaboré un programme, s'appuyant sur la méthodologie nationale mais adaptée à la commune de Pénestin, pour le compte de la Direction Départemental des Territoires et de la Mer du Morbihan (DDTM 56) et un suivi des habitations sinistrées.

Mais comme la commune de Pénestin a ses limites maritimes et notamment celles occidentales (la falaise de la Mine d'Or), sujettes aux assauts perpétuels de l'océan exposant la commune à des phénomènes d'érosion littorale, en cours de l'étude et à la demande de la DDTM 56, le BRGM a intégré cet aléa à son programme d'étude.

Ainsi les questions posées ont été celles-ci :

- Existe-il une formation géologique argileuse sur la commune non encore identifiée et cartographiée, responsable des fissures et lézardes des habitations ? ;
- Quel est la cause principale des fissurations et lézardes ? Sont-elles la conséquence de périodes de sécheresse et réhydratation des sols ou dans certains secteurs de l'aléa érosion littorale et notamment de la falaise de la Mine d'Or ?

## 1.2. PROGRAMME MIS EN PLACE

Le programme élaboré par le BRGM afin de répondre à ces questions, a été d'une part de réaliser une carte d'aléa à une échelle plus fine que celle élaborée dans le cadre de la cartographie départementale sur la commune de Pénestin, d'autre part de comprendre l'évolution des fissures sur les habitations sinistrées et enfin de déterminer les mécanismes ainsi que les vitesses d'érosion littorale. Ainsi, le programme du BRGM était composé : (1) de nouvelles acquisitions géologiques, (2) d'acquisitions hydrogéologiques et (3) d'acquisitions géotechniques et de sinistralité, auxquelles sont venues s'ajouter des acquisitions sur l'évolution du littoral.

### 1.2.1. Acquisitions géologiques

L'acquisition de nouvelles données géologiques s'est faite suivant deux approches.

- Une première approche axée sur la cartographie géologique de détail à l'échelle du 1/10 000, de la commune de Pénestin par un géologue du BRGM pendant l'été 2012. L'ensemble des chemins, fonds de fossé, travaux d'aménagement ou de construction en cours et affleurements de roches notamment littoraux, ont été auscultés et pour les parties plates des forêts, bords de marées littoraux, les observations ont été réalisées à l'aide d'une tarière à main;
- Et une seconde approche venant compléter la première, par l'acquisition de données de forages. L'analyse de la banque de données du sous-sol (BSS) ne faisant pas remonter de données suffisantes quantitativement et qualitativement, huit forages destructifs à l'ODEX (Marteau Fond de Trou (MFT) équipé de tubes acier à l'avancement), ont été réalisés par l'entreprise *Hydrogéotechnique*.

L'objectif de ces deux approches d'acquisition de données géologiques était : (1) de mieux préciser les contours géologiques des formations géologiques sur le territoire de

la commune de Pénestin, (2) d'en identifier de supplémentaires pouvant expliquer le phénomène d'aléa sècheresse plus intense dans certains secteurs, (3) à travers les forages d'avoir des points de contrôle sur la géométrie de structures sous le bourg, et (4) d'échantillonner les formations géologiques argileuses nouvelles afin de les caractériser.

Des échantillons de sol identifiés et prélevés ont été caractérisés par des analyses géotechniques et par diffraction aux rayons X afin d'évaluer leur potentiel de retrait et gonflement.

La finalité de cette partie de l'étude étant de produire une carte géologique de détail (au 1/ 10 000) pour produire une carte des argiles de la commune, déclinée en carte d'aléa dans le respect de la méthodologie nationale.

### **1.2.2. Acquisitions hydrogéologiques**

L'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques s'est faite parallèlement à l'acquisition de nouvelles données géologiques. Lors de la réalisation des huit ouvrages (forages), six d'entre eux, ont été équipés en piézomètres<sup>1</sup>.

L'équipement des piézomètres s'est fait en fonction de la coupe géologique levée au moment de la réalisation du forage par un géologue du BRGM. Sur chaque ouvrage, toutes les arrivées d'eau ont été notées afin de déterminer quel aquifère était traversé en cas d'aquifère superposé. Les piézomètres font une vingtaine de mètres de profondeur au maximum, et ont été réalisés dans les règles de l'art.

Parallèlement à cette opération, un inventaire d'ouvrages a été effectué à partir de la consultation de la BSS et des observations de terrain. Cette opération avait pour objectif de dresser une carte de la piézométrie autour de la zone sinistrée, à travers un suivi de la nappe, pendant les optimums saisonniers sur une année (soit 1 levé tous les deux mois).

### **1.2.3. Acquisitions géotechniques et de sinistralité**

Sur cette opération, trois approches ont été mises en place :

1 - Sur les huit ouvrages réalisés, deux d'entre eux ont été transformés en inclinomètres. Un inclinomètre<sup>2</sup> a été installé entre la falaise au nord de la Mine d'Or et le quartier d'habitation (inclinomètre 1 nord) et un entre la falaise et la zone la plus

---

<sup>1</sup> Un piézomètre est un forage équipé de tubes crépinés, c'est-à-dire laissant passer les venues d'eau et de tubes pleins sur les parties non aquifères. Le tubage permet d'avoir accès à la ressource en eau pour mesurer l'évolution des niveaux.

<sup>2</sup> Un inclinomètre est un tube mis en place dans le terrain ou solidarisé à une structure dans lequel est introduit une sonde mobile munie d'un capteur inclinométrique qui permet de suivre l'évolution en fonction du temps des mouvements d'une pente instable.

sinistrée au nord de la Poudrantaie (inclinomètre 2 sud). Ces inclinomètres ont été relevés avec le même pas de temps que les piézomètres, soit une fois tous les deux mois pendant une année. L'objectif était de mesurer si l'érosion de la falaise et les mouvements de terrain pouvaient avoir des répercussions vers l'intérieur.

2 - Une seconde approche a été de réaliser un inventaire, sur les façades des habitations individuelles, des fissures ou lézardes, et d'en équiper une dizaine grâce à des outils de mesures de leur évolution par des jauges de type « Saugnac » et de les suivre comme pour les niveaux de la nappe et les inclinomètres, à raison d'une fois tous les deux mois sur une année. En effet, selon les phénomènes en jeux, les déplacements attendus des fissures ne sont pas les mêmes.

3 – Enfin, des analyses de sol sur les échantillons argileux identifiés au cours de la réalisation des forages ou au cours de la cartographie géologique, ont été réalisées et viennent en complément de celles existantes. Ces analyses ont été des indices de plasticité et des essais au bleu de méthylène.

#### **1.2.4. Chronogramme, *délivrables & résultats***

L'ensemble des données enregistrées (cartographie géologique précise ; cartographie des déformations du bâti ; suivi de la piézométrie et suivi des inclinomètres), a été confronté aux données climatiques sur la période de l'étude soit une année (une période d'observation d'une année étant une période minimale d'observation puisqu'elle correspond à un cycle hydrogéologique complet).

Les résultats finaux sont :

- Une cartographie de détail de la géologie de la commune de Pénestin, une cartographie de détail des argiles et de l'aléa retrait-gonflement au 1/10 000 ;
- Une interprétation des contributions des différents phénomènes aux désordres observés, avec identification des zones exposées ;
- Un schéma d'évolution possible des déformations ;
- et une proposition de cartographie multi-aléas de la zone d'étude au 1/10 000.

## 2. Rappels sur les aléas

### 2.1. ALEA RETRAIT-GONFLEMENT

Cette partie décrit les principaux facteurs intervenants dans le retrait-gonflement des sols argileux puis, pour rappel, la méthode et les résultats de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement mis en œuvre dans le cadre de la cartographie départementale du Morbihan (Schroetter et al., 2010).

#### 2.1.1. Facteurs intervenant dans le retrait-gonflement des argiles

Les phénomènes de retrait-gonflement sont dus pour l'essentiel à des variations de volume de formations argileuses sous l'effet de l'évolution de leur teneur en eau (illustration 1). Ces variations de volume se traduisent par des mouvements différentiels du terrain, susceptibles de provoquer des désordres au niveau du bâti.

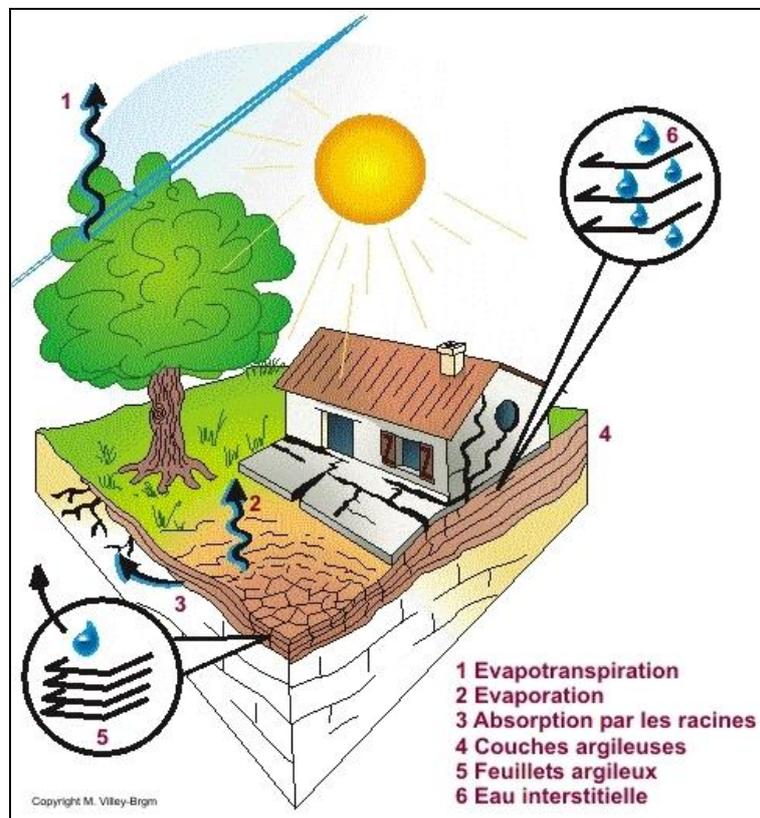


Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

Par définition, l'aléa retrait-gonflement est la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle des conditions nécessaires à la réalisation d'un tel phénomène. Parmi les facteurs de causalité, on distingue classiquement des facteurs de prédisposition et des facteurs de déclenchement.

Les facteurs de prédisposition correspondent aux conditions dont par la présence induit le phénomène de retrait-gonflement. Mais à eux seuls, ils ne suffisent pas à elle seule à le déclencher. Généralement, ces facteurs sont fixes ou évoluent lentement dans le temps. On distingue les facteurs internes, qui sont liés à la nature du sol, et des facteurs

d'environnement (illustration 1). Les facteurs de prédisposition permanents conditionnent en fait la répartition spatiale du phénomène. Ils permettent de caractériser la susceptibilité du milieu vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

Les facteurs de déclenchement correspondent aux conditions qui vont provoquer le phénomène de retrait-gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La connaissance des facteurs déclenchant permet de déterminer l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité).

### ***Facteurs de prédisposition***

#### **• Nature du sol**

La nature du sol est un facteur de prédisposition important dans le mécanisme de retrait-gonflement, où seules des formations géologiques contenant des minéraux argileux seront sujettes au phénomène. Leur susceptibilité à cet aléa dépend de leur lithologie, de leur géométrie, de leur minéralogie et de leur comportement géotechnique.

La procédure d'étude de la nature du sol, est basée sur l'exploitation des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 éditées par le BRGM, qui contiennent un inventaire des formations affleurantes à sub-affleurantes, à composante argileuse ou marneuse et en leur cartographie.

Ce qui conforte l'adoption de ce concept est que la majorité des dossiers consultés montre que les sinistres sont corrélés à la présence d'une formation argileuse ou marneuse définie. Mais il est important de signaler que la carte géologique au 1/50 000<sup>ième</sup>, peut ne pas suffire car elles peuvent ne pas prendre en compte le degré d'altération ou les variations de faciès au sein d'une même formation géologique, pour diverses raisons liées à l'évolution de la connaissance géologique, l'intérêt scientifique d'une formation géologique d'une carte par rapport à une autre. Ainsi la cartographie des formations géologiques superficielles par exemple, peut se révéler hétérogène d'une carte à l'autre.

Le facteur lithologique (c'est-à-dire la proportion de matériau argileux) influence en premier lieu la susceptibilité au retrait-gonflement d'une formation géologique, et en moindre proportion mais non négligeable, sa géométrie. De plus, les effets du phénomène seront d'autant plus importants que la formation sera en position superficielle et que les niveaux argileux en son sein seront épais et continus. Une alternance de niveaux argileux et de lits plus perméables (grès par exemple), sièges de circulations d'eau temporaires, constitue également une configuration défavorable, car à l'origine de fréquentes variations de teneur en eau dans les parties argileuses.

A ce facteur lithologique, la composition minéralogique sera d'autant plus susceptible au phénomène que sa fraction argileuse contiendra une forte proportion de minéraux argileux dits "gonflants". En effet, les minéraux argileux de la famille des smectites (comme les montmorillonites), présentent par rapport minéraux argileux interstratifiés tels que les kaolinites ou vermiculite et certains chlorites, une aptitude supérieure vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. La connaissance de la composition minéralogique d'une formation argileuse est déterminée par des analyses diffractométriques aux rayons X.

Enfin, des essais géotechniques de laboratoire, permettent de caractériser l'aptitude du matériau à absorber de l'eau, voire mesurer directement sa capacité de retrait ou de gonflement. Ces deux dernières approches (caractérisation minéralogique et évaluation du comportement géotechnique du matériau) présentent l'avantage majeur de fournir des résultats quantitatifs rigoureux, mais exigent un grand nombre de mesures pour caractériser

de manière statistique le comportement de chacune des formations, qui peuvent être par nature hétérogènes.

### • Contexte hydrogéologique

Parmi les facteurs de prédisposition, les conditions hydrogéologiques constituent un des facteurs environnementaux régissant les conditions hydrauliques in situ. Or la présence d'une nappe phréatique rend plus complexe le phénomène de retrait-gonflement. En effet, les conditions hydrauliques in situ (teneur en eau et degré de saturation) varient dans le temps non seulement en fonction de l'évapotranspiration (dont l'action est prépondérante sur une tranche très superficielle de l'ordre de 1 à 2 m d'épaisseur) mais aussi en fonction des fluctuations de la nappe éventuelle (dont l'action devient prépondérante en profondeur).

La présence d'une nappe permanente à faible profondeur permet généralement d'éviter la dessiccation de la tranche superficielle de sol. Inversement, un rabattement de cette nappe (sous l'effet de pompages ou d'un abaissement généralisé du niveau), ou le tarissement naturel des circulations d'eau superficielles en période de sécheresse, aggrave la dessiccation de la tranche de sol soumise à l'évaporation. Ainsi, dans le cas d'une formation argileuse surmontant une couche sablo-graveleuse, un éventuel dénoyage de cette dernière provoque l'arrêt des remontées capillaires dans le terrain argileux et contribue à sa dessiccation.

### • Géomorphologie

La topographie constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait-gonflement.

La présence d'une pente favorise le ruissellement et le drainage par phénomène gravitaire, tandis qu'une morphologie plate sera d'avantage susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment. En outre, les formations argileuses et marneuses qui affleurent sur le flanc des vallées peuvent occasionner, localement, un fluage lent du versant et la formation de loupes argileuses. Ce phénomène vient s'ajouter aux désordres consécutifs à la seule dessiccation du sol.

D'autre part, il arrive souvent qu'une maison construite sur un terrain en pente soit plus sujette au problème de retrait-gonflement, en raison d'une dissymétrie des fondations lorsque celles-ci sont ancrées à une cote identique à l'amont et à l'aval. Le bâtiment se trouve alors enterré plus profondément du côté amont. De ce fait, les fondations situées à l'aval, étant en position plus superficielle, seront davantage sensibles aux variations de teneur en eau du sol. Cet effet est même parfois renforcé par une différence de nature du sol situé à la base des formations amont et aval, la couche d'altération superficielle suivant généralement plus ou moins la topographie.

### • Végétation

Il est avéré que la présence de végétation arborée à proximité d'une maison peut constituer un facteur déclenchant du phénomène de retrait-gonflement, même s'il n'est souvent qu'un facteur aggravant de prédisposition. En effet, les racines soutirent par succion (mécanisme d'osmose) l'eau du sol. Cette succion crée un gradient de la teneur en eau du sol, qui peut se traduire par un tassement localisé du sol autour de l'arbre. Si la distance au bâtiment n'est pas suffisante, cela entraînera des désordres dans les fondations. On considère en général que l'influence d'un arbre adulte se fait sentir jusqu'à une distance égale à une fois voire une fois et demie sa hauteur, mais ceci est variable selon les espèces arborées.

Il est à noter que les racines seront naturellement incitées à se développer en direction de la maison, puisque celle-ci s'oppose à l'évaporation et qu'elle maintient donc une zone de sol plus humide sous sa surface. Contrairement au processus d'évaporation, qui affecte surtout la tranche superficielle des deux premiers mètres, les racines d'arbres peuvent avoir une influence jusqu'à 4 à 5 m de profondeur. Le phénomène sera d'autant plus important que l'arbre est en pleine croissance et qu'il a, de ce fait, davantage besoin d'eau.

Ainsi, on considère qu'un peuplier ou un saule adulte peut absorber jusqu'à 300 litres d'eau par jour en été (Habib, 1992). En France, les arbres considérés comme les plus dangereux du fait de leur influence sur les phénomènes de retrait seraient les chênes, les peupliers, les saules, les cyprès et les cèdres. Des massifs de buissons ou d'arbustes situés près des façades (et notamment la vigne vierge) peuvent cependant aussi causer des dégâts.

#### • Défauts de construction

Ce facteur de prédisposition, dont l'existence peut être révélée à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle, se traduit par la survenance ou l'aggravation des désordres. L'importance de ce facteur avait déjà été mise en évidence par les études menées en 1990 par l'Agence Qualité Construction et en 1991 par le CEBTP, lesquelles montraient que la plupart des sinistres concernaient des maisons individuelles dépourvues de chaînage horizontal et fondées sur semelles continues peu ou non armées et peu profondes (40 à 80cm).

L'examen de dossiers d'expertises réalisées dans le département du Morbihan confirme que de nombreuses maisons déclarées sinistrées présentent des défauts de conception ou de réalisation des fondations (souvent trop superficielles, hétérogènes ou fondées dans des niveaux différents) et il est probable que des fondations réalisées dans les règles de l'art auraient pu, dans de tels cas, suffire à limiter fortement, voire à éviter l'apparition de ces désordres. Cependant, l'examen des dossiers de sinistres montre que des constructions fondées sur semelles ancrées à plus de 0,80m d'épaisseur ont aussi été affectées par le phénomène, en particulier lorsque des arbres sont plantés trop près des bâtiments. Par ailleurs, il est à noter que les désordres ne se limitent pas aux maisons récentes, mais concernent aussi des bâtiments anciens qui semblaient avoir été épargnés jusque-là.

### ***Facteurs de déclenchement***

#### • Phénomènes climatiques

Les phénomènes météorologiques exceptionnels constituent le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement. Les variations de teneur en eau du sol sont dues à des variations climatiques saisonnières. La profondeur de terrain affectée par les variations saisonnières de teneur en eau ne dépasse guère 1 à 2 m sous nos climats tempérés, mais peut atteindre 3 à 5 m lors d'une sécheresse exceptionnelle, ou dans un environnement défavorable (végétation proche).

Les deux paramètres importants sont les précipitations et l'évapotranspiration (illustration 1). En l'absence de nappe phréatique, ces deux paramètres contrôlent en effet les variations de teneur en eau dans la tranche superficielle des sols. L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation (liée aux conditions de température, de vent et d'ensoleillement) et de la transpiration (eau absorbée par la végétation). Ce paramètre est mesuré dans certaines stations météorologiques mais sa répartition spatiale est difficile à appréhender car sa valeur dépend étroitement des conditions locales de végétation. On raisonne en général sur les hauteurs de pluies efficaces qui correspondent aux précipitations diminuées de l'évapotranspiration.

Malheureusement, il est difficile de relier la répartition, dans le temps, des hauteurs de pluies efficaces avec l'évolution des teneurs en eau dans le sol. On observe évidemment qu'après une période de sécheresse prolongée la teneur en eau dans la tranche superficielle de sol a tendance à diminuer, et ceci d'autant plus que cette période se prolonge. On peut établir des bilans hydriques en prenant en compte la quantité d'eau réellement infiltrée, ce qui suppose d'estimer, non seulement l'évapotranspiration, mais aussi le ruissellement. Mais toute la difficulté est de connaître la réserve utile des sols, c'est-à-dire leur capacité d'emmagasiner de l'eau et de la restituer ensuite (par évaporation ou en la transférant à la végétation par son système racinaire). Le volume de cette réserve utile n'est généralement connu que ponctuellement et l'état de son remplissage ne peut être estimé que moyennant certaines hypothèses (on considère généralement qu'elle est pleine en fin d'hiver), ce qui rend extrêmement délicate toute analyse de ce paramètre à une échelle départementale. Un autre paramètre difficile à estimer de façon systématique est le volume d'eau transféré de la zone non saturée à la nappe phréatique, ainsi que le rythme de ce transfert.

#### • Facteurs anthropiques

Il s'agit de facteurs de déclenchement qui ne sont pas liés à un phénomène climatique, par nature imprévisible, mais à une action humaine. En effet, les travaux d'aménagement, en modifiant la répartition des écoulements superficiels et souterrains, ainsi que les possibilités d'évaporation naturelle, sont susceptibles d'entraîner des modifications dans l'évolution des teneurs en eau de la tranche superficielle de sol. En particulier, des travaux de drainage réalisés à proximité immédiate d'une maison peuvent provoquer des mouvements différentiels du terrain dans le voisinage.

Inversement, une fuite dans un réseau enterré ou une infiltration des eaux pluviales en pied de façade peut entraîner un mouvement consécutif à un gonflement des argiles. Pour ces derniers facteurs, une étude récente conduite par CEBTP-Solen sur environ 994 maisons sinistrées montre que ces facteurs peuvent être pris en compte dans un tiers des cas étudiés (Vincent et *al.*, 2006).

Par ailleurs, la présence de sources de chaleur en sous-sol (four ou chaudière) près d'un mur mal isolé peut, dans certains cas, aggraver voire déclencher la dessiccation du sol à proximité et entraîner l'apparition de désordres localisés.

### 2.1.2. Carte des argiles du Morbihan

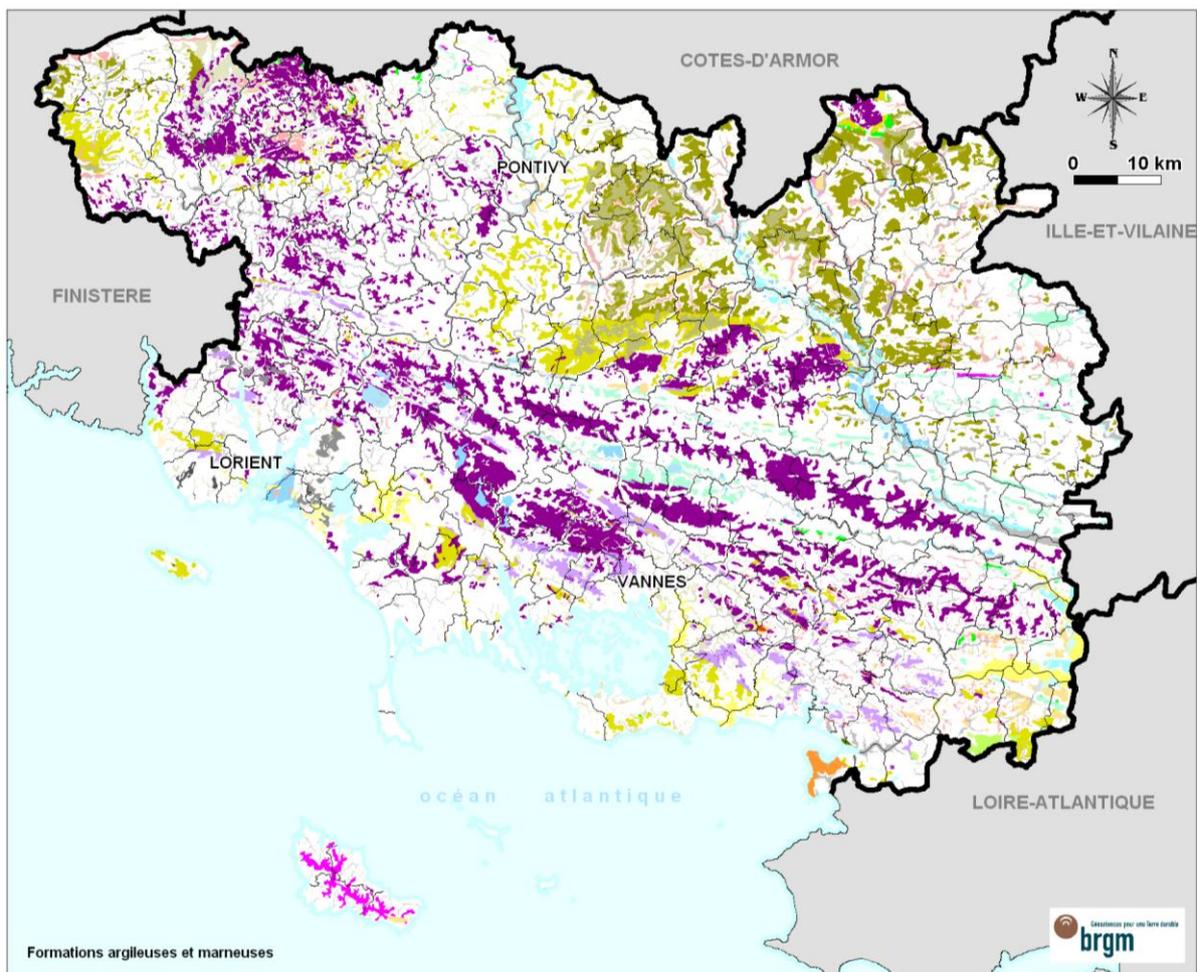
La méthodologie de cartographie de l'aléa développée par le BRGM a été mise au point à partir d'études similaires menées d'abord dans le département des Alpes de Haute-Provence (1995-96) (Chassagneux et *al.*, 1995 ; 1996) et des Deux-Sèvres (1998) (Vincent et *al.*, 1998), puis dans l'Essonne (2000) (Prian et *al.*, 2000) et en Seine-Saint-Denis (2001) (Donsimoni et *al.*, 2001).

Cette méthodologie, validée par le ministère en charge de l'environnement, a été appliquée dans le cadre d'un programme qui concerne l'ensemble des départements métropolitains français, ce qui permet d'obtenir des résultats homogènes au niveau national (Vincent et *al.*, 2008). Les trois autres départements de la région Bretagne ont fait l'objet d'une étude similaire, réalisée avec la même méthodologie.

La première étape se base sur les cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000, du département, qui font l'objet d'un travail d'harmonisation, afin d'en déduire une carte géologique départementale harmonisée (Cagnard, 2009). Ce document sert de point de départ pour la cartographie des formations argileuses et marneuses du département mais elle intègre également certaines données ponctuelles issues de diverses sources, comme : **1 980** sondages saisis pour cette étude et provenant d'études géotechniques ; **6 214**

sondages issus de la banque de données du sous-sol (BSS) gérée par le BRGM, dont **411** contenant des argiles dans la tranche 0-10m ; **1 125** sondages réinterprétés lors de l'étude SILURE (Mougin et *al.*, 2008), sur lesquels avait été interprétée et extraite la base des altérites ; l'analyse géomorphologique à partir des cartes de l'IGN au 1/25 000<sup>ème</sup> afin de cerner des secteurs susceptibles d'être concernés par le phénomène d'altération ; et enfin les données bibliographiques diverses (thèses, DEA, rapports miniers, publications scientifiques etc.) et rapports d'expertise de sinistres.

Pour cela, toutes les formations argileuses ou marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, ont été inventoriées puis cartographiées. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape, en considérant que des natures lithologiques voisines laissaient supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large (illustration 2).



**Formations argileuses et marneuses**

FzT - Alluvions récentes tourbeuses, Holocène
Fz - Alluvions récentes, Holocène
Fy - Alluvions des basses terrasses, Pléistocène
Fx - Alluvions des hautes terrasses, Pléistocène
Fp - Alluvions fluviales "anciennes", Quaternaire
Fw - Alluvions des très hautes terrasses, Pléistocène
SA - Coulées de solifluxion à matrice argileuse abondante, Quaternaire
SH - Coulées de solifluxion de bas de pentes (heads) à gros blocs erratiques, Quaternaire
C - Colluvions des têtes de vallées, de piémonts, de dépressions et de fond de vallons, Holocène
MzP - Sols des polders, vases et sables drainés et pédogénisés, Holocène
My - Cordon littoral ancien, Pléistocène à Holocène
MzV - Dépôts estuariens vaseux, slikke vaseuse, shorre des estuaires, Holocène
p - Conglomérats, sables estuariens, parfois argileux, fluviaux de couleur rouge à blanc, Pliocène
pA - Faciès argileux ou marno-silteux fossilifères stratifiés et dominant, Pliocène
p-IVB - Formation de Bétahon, argiles - Plio-quaternaire
p-IV - Cailloutis, sables jaunes et rouges, parfois argileux en nappes résiduelles, Plio-quaternaire
Mp - Formations littorales et marines, argiles, sables et graviers anciens, Mio-pliocène
e-Fx - Formation de Pénestin, argiles d'altération sous des sables, argiles et graviers, Eocène à Actuel
e4 - Sables et argiles vertes, calcaires à nummulites, Eocène, Yprésien
e-p/b - Conglomérats, sables argileux et argiles blanches à noires structurées - Eocène à Pliocène
l l l - Argiles, sables, galets "anciens" d'origine marine ; sables et argiles bariolées - Eocène ?
A - Argiles d'altération
RI l l - Epanchage résiduel de dépôts tertiaires indifférenciés et altérites tertiaires remaniées
AbS - Altérites au sens large des schistes peu à pas métamorphiques
AKM - Altérites au sens large de laves, roches volcaniques et volcanoclastites
AΣδ - Altérites au sens large de roches basiques et ultrabasiques
Aζζ - Altérites au sens large de para et ortho gneiss, migmatites
AγL - Altérites au sens large de roches de la famille des granites
AbζKδ - Altérites au sens large de roches métamorphiques riches en phyllosilicates
AbK - Altérites au sens large de schistes métamorphiques tachetés et cornéennes
Ao-d - Altérites au sens large de roches sédimentaires paléozoïques
Akao - Kaolin (altérites)

*Illustration 2 – Carte géologique départementale des formations argileuses et marneuses du Morbihan, accompagnée de sa légende (Schroetter et al., 2010)*

### 2.1.3. Hiérarchisation des formations argileuses et cartographie de la susceptibilité au retrait-gonflement

Les critères utilisés pour établir cette hiérarchisation sont les caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique de ces formations.

#### **La caractérisation lithologique, géotechnique et minéralogique**

La caractérisation lithologique des formations argileuses et marneuses est élaborée, pour chacune d'entre-elles, essentiellement à partir de la description faite de ces formations sur les cartes géologiques au 1/50 000<sup>ième</sup> et de la connaissance de terrain du géologue régional.

La caractérisation géotechnique des formations argileuses et marneuses est élaborée à partir du dépouillement et de la synthèse des études géotechniques pour divers aménagements tels que des terrains de sports, des routes, des enfouissements de canalisations, des réalisations de ZAC, de constructions etc., et des expertises sinistres réalisées par différentes entreprises (Labosport), bureaux d'études (Uretek, Arbrotec, ECR Environnement, Fondasol, Egsol, Hydrogéotechnique, Arcadis, Géotec), compagnies ou experts d'assurance (CCR, MAIF), mais aussi et surtout par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc (LRPC Saint-Brieuc). Ces données, **1980** au total, ont été récoltées lors de la consultation des **261** communes du département, lors de la visite de chaque entreprise, bureau d'études et maîtres d'ouvrage comme la Direction des Routes du Conseil Général du Morbihan, la Direction Régionale de l'Équipement (DRE), la Direction Interdépartementale des Routes de l'Ouest (DIR Ouest). Chacun d'entre eux a bien voulu

nous laisser consulter leurs archives. Enfin ces données ont été recoupées avec les données bibliographiques quand ce fut nécessaire ou que celles-ci étaient présentes.

Pour la caractérisation minéralogique des formations, dans un souci d'homogénéité sur les données, ce sont en priorité les **40** analyses aux rayons X (dont **20** réalisées pour le Morbihan et **20** pour l'Ille-et-Vilaine) qui ont été utilisées. La bibliographie scientifique, thèses, DEA, rapports du BRGM et les notices des cartes géologiques, sont venues confirmer ou infirmer cette caractérisation minéralogique des formations argileuses et marneuses, correspondant à l'évaluation de la proportion de minéraux argileux gonflants (smectites, interstratifiés, etc.).

Le recoupement des notes lithologiques, minéralogiques et géotechniques de chaque formation argileuse (ou marneuse), permet de définir leur degrés de susceptibilité à l'aléa retrait-gonflement.

N°	Code_Formation	Nom_Formation	Surf. (km²)	% du départ.	Susceptibilité
1	FzT	Holocène	8,80	0,13	fort
14	pA	Faciès argileux ou marno-silteux fossilifères stratifiés et dominant, Pliocène	0,29	0,00	fort
15	p-IVB	Formation de Bétahon, argiles - Plio-quaternaire	0,23	0,00	fort
19	e4	Sables et argiles vertes, calcaires à nummulites, Eocène, Yprésien	0,04	0,00	fort
<b>TOTAUX</b>			<b>9,35</b>	<b>0,14</b>	<b>fort</b>
10	MzP	Sols des polders, vases et sables drainés et pédogénisés, sables et tangues des salines, Holocène	4,27	0,06	moyen
12	MzV	Dépôts estuariens vaseux, slikke vaseuse, shorre des estuaires, Holocène	76,25	1,12	moyen
18	e-Fx	Formation de Pénestin, argiles d'altération sous des sables, argiles et graviers, Eocène à Actuel	9,13	0,13	moyen
26	jÜä	Altérites au sens large de roches basiques et ultrabasiqes, Age ?	0,86	0,01	moyen
<b>TOTAUX</b>			<b>90,51</b>	<b>1,33</b>	<b>moyen</b>
2	Fz	Alluvions fluviales récentes, limons de débordement, Holocène	342,70	5,02	faible
3	Fy	Alluvions fluviales "anciennes", sables gris, argiles grises à débris végétaux, Pléistocène	60,31	0,88	faible
4	Fx	Alluvions fluviales "anciennes", sables et argiles, Pléistocène	35,31	0,52	faible
5	Fp	Alluvions fluviales "anciennes", argiles, sables, graviers et cailloux, Tertiaire	9,59	0,14	faible
6	Fw	Alluvions fluviales "anciennes", argiles, sables, graviers et cailloux, Pléistocène	37,10	0,54	faible
7	SA	Coulées de solifluxion à matrice argileuse abondante, Quaternaire	0,35	0,01	faible
8	SH	Coulées de solifluxion de bas de pentes (heads) à gros blocs erratiques, Quaternaire	94,79	1,39	faible
9	C	Colluvions des têtes de vallées, de piémonts, de dépressions et de fond de vallons, Holocène	168,52	2,47	faible
11	My	Cordon littoral ancien, sables et argiles, plages anciennes, Pléistocène	6,80	0,10	faible
13	p	Conglomérats, sables estuariens, parfois argileux, fluviales de couleur rouge à blanc, Pliocène	28,58	0,42	faible
16	p-IV	Cailloutis, sables jaunes et rouges, parfois argileux en nappes résiduelles, Plio-quaternaire	10,26	0,15	faible
17	Mp	pliocène	0,77	0,01	faible
20	e-p/b	Conglomérats, sables argileux et argiles blanches à noires structurées - Eocène à Pliocène	0,20	0,00	faible
21	ÁÁÁ	Argiles, sables, galets "anciens" d'origine marine ; sables et argiles bariolées - Eocène ?	1,61	0,02	faible
22	i	Argiles d'altération - Age ?	15,19	0,22	faible
23	RÁÁÁ	Epanchage résiduel de dépôts tertiaires indifférenciés et altérites tertiaires remaniées	114,90	1,68	faible
24	jbS	Altérites au sens large des schistes peu à pas métamorphiques, Age ?	277,40	4,07	faible
25	jÁM	Altérites au sens large de laves, roches volcaniques et volcanoclastites, Age ?	19,84	0,29	faible
27	jæñ	Altérites au sens large de para et ortho gneiss, migmatites, Age ?	98,08	1,44	faible
28	jÁL	Altérites au sens large de roches de la famille des granites, Age ?	698,82	10,24	faible
30	jbK	Altérites au sens large de schistes métamorphiques tachetés et cornéennes, Age ?	232,42	3,41	faible
29	jbñ(Áä)	Altérites au sens large de roches métamorphiques riches en phyllosilicates, Age ?	7,08	0,10	faible
31	jo-d	Altérites au sens large de roches sédimentaires paléozoïques, Age ?	79,87	1,17	faible
32	jkao	Kaolin (altérites), Age ?	2,38	0,03	faible
<b>TOTAUX</b>			<b>2342,87</b>	<b>34,34</b>	<b>faible</b>

Illustration 3 - Degré de susceptibilité pour chaque formation argileuse ou marneuse du département du Morbihan (Schroetter et al., 2010)

### **Autres facteurs de prédisposition et de déclenchement**

D'autres facteurs de prédisposition ou de déclenchement, plus ponctuels, comme **la végétation arborée**, les **actions anthropiques** ou les **défauts de construction**, ne sont pas pris en compte lors de la cartographie départementale. Les **conditions météorologiques** n'apparaissent pas aussi comme étant un élément discriminant à l'échelle du département et sont pas pris en compte dans l'élaboration de la carte départementale. Malgré des **connaissances hydrogéologiques** en domaine de « socle » qui ont largement évolué depuis plus d'une vingtaine d'années (Lachassagne et Wyns, 2005), l'influence des nappes reste difficile à mettre en évidence à une échelle départementale. Enfin, le facteur **géomorphologique** de terrains en pente, même s'ils peuvent conditionner la survenance de sinistres car des défauts de réalisation et de conception de fondations peuvent être fréquents, auxquels s'ajoutent de fortes variations de teneur en eau entre l'aval et l'amont de la construction, ne sont aussi pas intégrés. **Ainsi la cartographie s'en tient aux contours des formations lithologiques des cartes.**

### **Carte de susceptibilité**

En définitive, la carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement est établie à partir de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses du département, après évaluation du degré de sensibilité de ces formations.

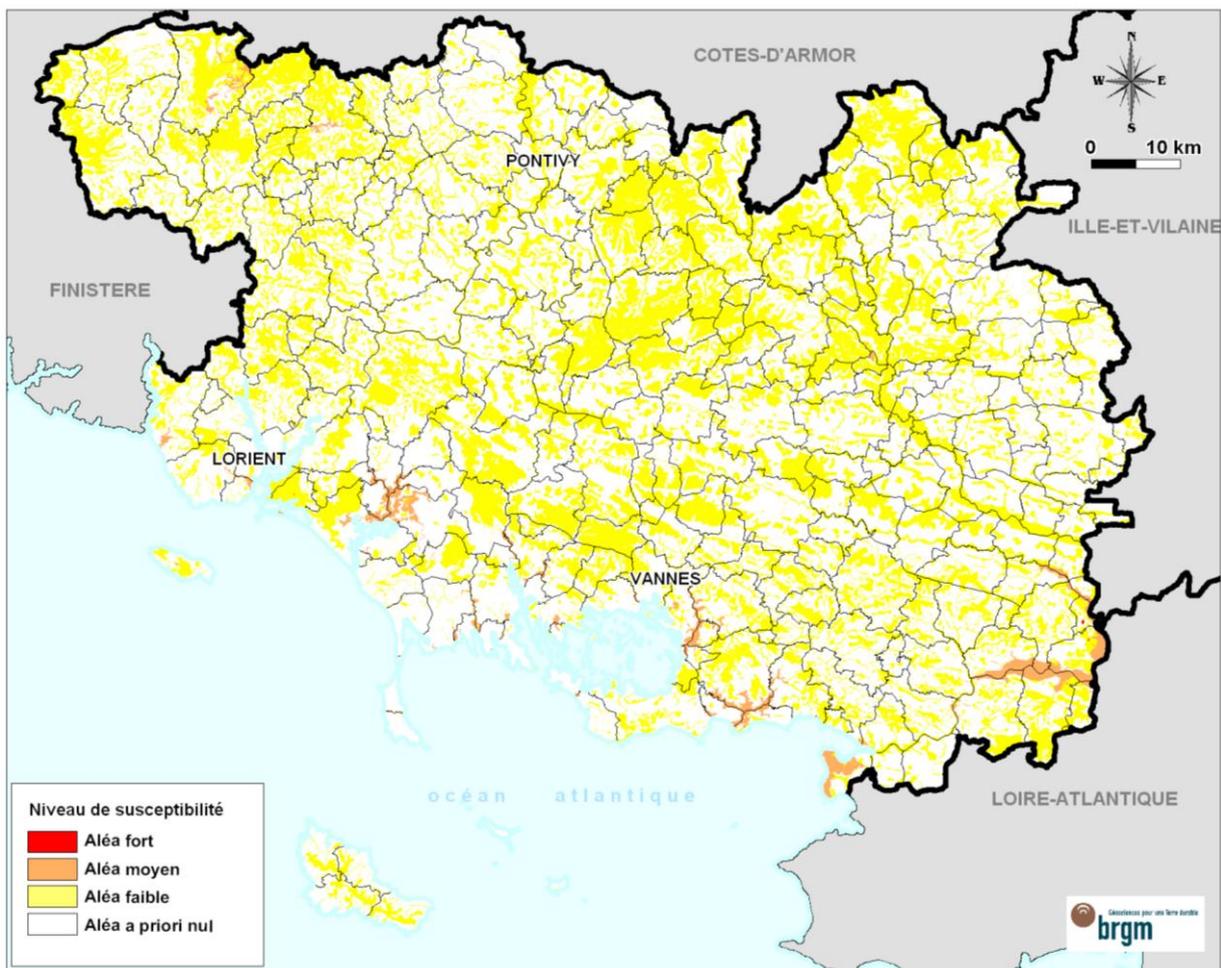


Illustration 4 - Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des formations argileuses ou marneuses du département du Morbihan (Schroetter et al., 2010)

### 2.1.4. Cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement

La carte départementale d'aléa est le croisement pour chaque formation argileuse, de la note de susceptibilité et de la densité de sinistres ramenée à 100 km<sup>2</sup> de chaque formation argileuse, en donnant toutefois un poids deux fois plus important à la susceptibilité.

#### ***Le recensement des sinistres***

Pour ce faire, un recensement des sinistres sécheresses avait été effectué auprès de 261 communes du département. Ces données ont été complétées par celles recueillies directement auprès de la Caisse Centrale de Réassurance, des bureaux d'études, de compagnies et d'experts d'assurance. Après élimination des doublons (sinistres récurrents sur un même site ou données identiques issues de sources différentes), ce sont **33** sites de sinistres qui ont pu être recensés. Ils sont répartis sur **13** communes, les **3** communes ayant fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle en regroupant à elles seules **23**, ce qui permet de considérer l'échantillon comme représentatif de l'occurrence spatiale du phénomène dans le département du Morbihan.

#### ***La densité de sinistres par formation argileuse***

A chaque sinistre recensé, est affectée la nature de la formation géologique. Il est possible ainsi de déterminer le nombre de sinistres recensés pour chacune formation géologique et, de calculer une densité de sinistres par formation (en pondérant par la surface d'affleurement de chacune des formations, afin d'obtenir des chiffres comparables entre eux). Cette densité avait été pondérée en tenant compte du taux d'urbanisation de chacune des formations géologiques, calculé à partir de la couche bâti de la BD Topo (IGN) fournie par la DDTM du Morbihan. Ainsi, la hiérarchisation des formations géologiques argileuses était réalisée en fonction du taux de sinistres ramené à 100 km<sup>2</sup> de formation géologique réellement bâtie.

## 2.2. L'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT SUR PENESTIN

Pour le département du Morbihan comme pour les autres départements bretons (et du massif armoricain), l'un des problèmes auquel le programme national avait été confronté, était l'existence ou pas de la cartographie des formations géologiques issues de l'altération des roches du substratum rocheux, très hétérogènes d'une carte géologique au 1/50 000<sup>ième</sup> à l'autre.

Ces formations géologiques issues de la détérioration de roches existantes et dites superficielles autochtones ou d'altération, pouvant contenir un pourcentage non négligeable de matériaux argileux, avait été évaluées à partir des diverses données géologiques disponibles. L'hétérogénéité sur la présence ou pas des altérites au sens-large, sur les cartes géologiques au 1/50 000, est la conséquence de l'évolution de la connaissance géologique, comme de l'évolution dans les besoins anthropiques, qui se sont accrus, et qui n'existaient pas lors des premiers levés géologiques.

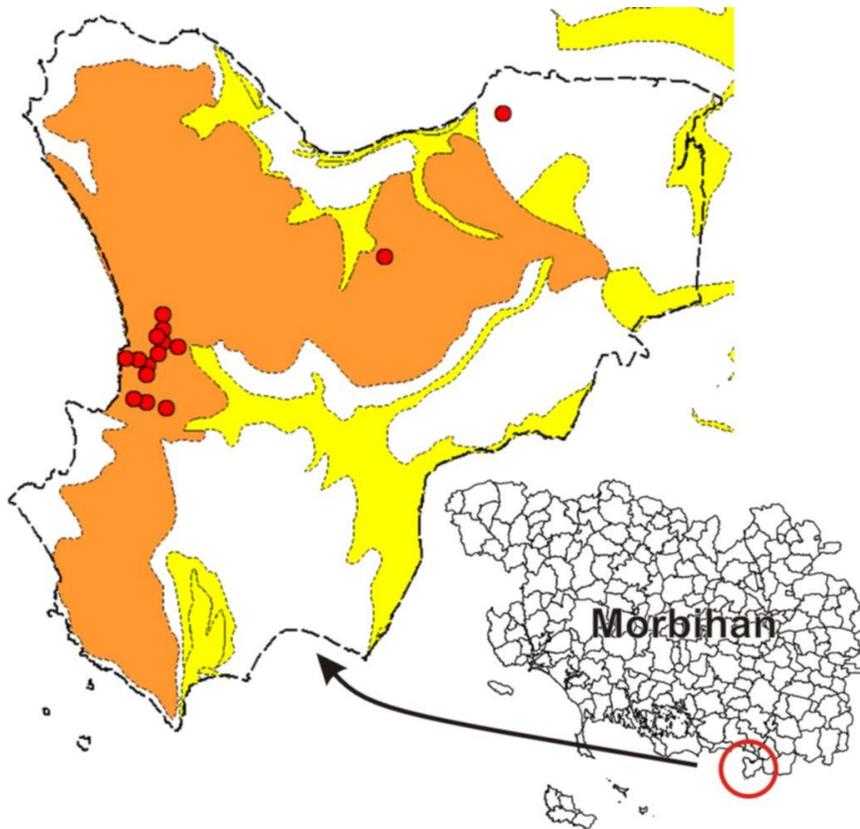
Ainsi la Cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles du Morbihan (Schroetter et al., 2010), avait abouti à ce que l'essentiel du territoire de la commune de Pénestin soit en aléa moyen, malgré :

- (1) que la commune ait le plus fort taux de sinistralité et
- (2) que la commune repose principalement sur une seule et même formation géologique composite, notée e-Fx, sur la carte géologique au 1/50 000, N°449, feuille

*La Roche-Bernard*, et constituée de limons et d'argiles d'altération sous-jacents à des terrasses alluviales, composées de galets, sables, limons et argiles rouges, mais que le recensement des sinistres soit concentré sur un secteur en particulier.

La cartographie géologique au 1/50 000 ayant abouti à la cartographie de l'aléa, était donc confronté à la présence d'altérites sur le territoire de la commune non reconnues précisément et certainement à l'existence au sein de la formation géologique composite, notée e-Fx, d'une variation de faciès, qui pourrait expliquer la répartition de la sinistralité.

Enfin la formation géologique du marais littoral de la commune de Pénestin ayant la même dénomination que celles des alluvions, avait été considérée comme telle, alors qu'il avait été démontré notamment sur le marais de Dol-de-Bretagne, que ces formations littorales argileuses pouvait contenir des minéraux très gonflants et avoir une susceptibilité plutôt moyenne que faible.



*Illustration 5 : Carte d'aléa retrait-gonflement avant cette étude, de la commune de Pénestin (Point rouge : sinistres recensés, Orange : aléa moyen, jaune : aléa faible : source BRGM ; Trait noir pointillé : trait HistolittV2, source SHOM-IGN)*

Ainsi, au regard des résultats de la cartographie départementale, il a paru nécessaire de rechercher ces éventuelles variations de faciès et de rechercher l'existence de formations plus sensibles qui pourraient être à l'origine des nombreux sinistres recensés localement sur la commune de Pénestin.

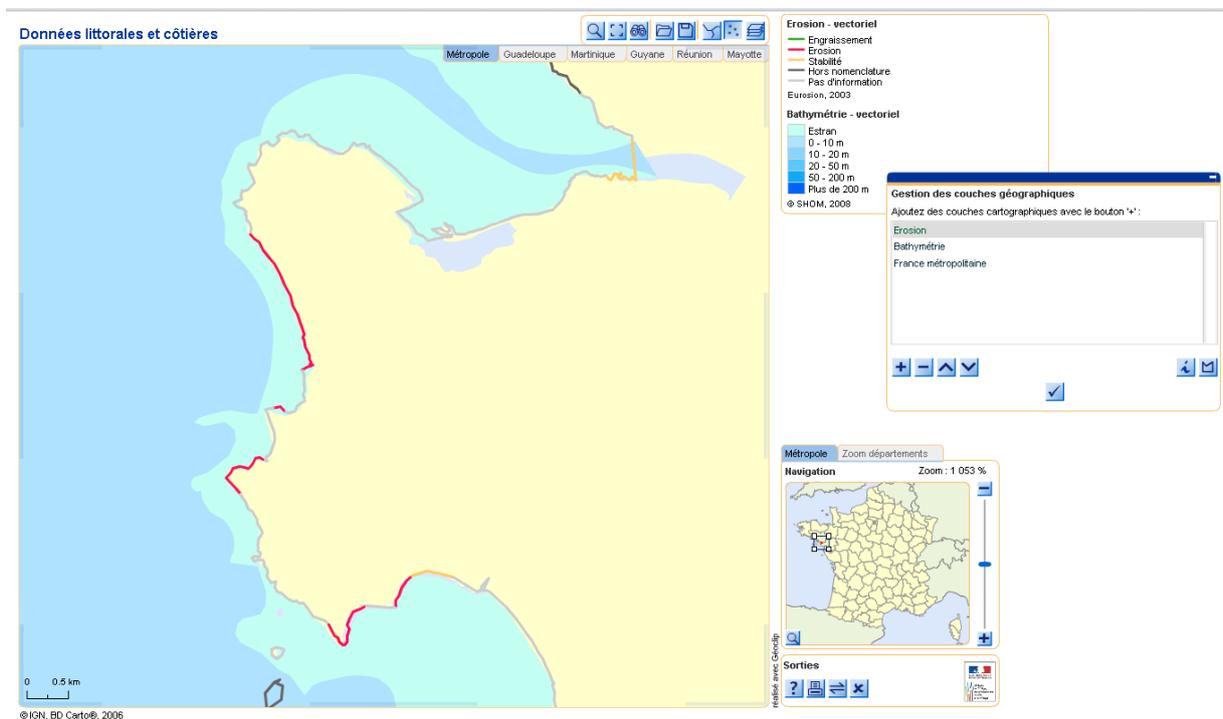
### **2.3. EROSION LITTORALE SUR PENESTIN**

Outre l'aléa retrait et gonflement des argiles, la commune de Pénestin est, notamment sur sa façade maritime occidentale de la falaise de la Mine d'Or, sujette aux assauts perpétuels de

l'océan, exposant la commune à des phénomènes d'érosion littorale, d'autant que cette falaise d'une vingtaine de mètres maximum est une falaise dont la base est meuble.

Les premiers travaux de géomorphologues de l'avant côte de Bretagne Sud, commencent dès le début du siècle dernier, par *Ferronière* (1921), suivi de *Guilcher* (1948), puis de *Pinot* (1974) et *Vanne* (1977). Des travaux plus récents se sont penchés sur la morphologie des côtes de Bretagne Sud et sur l'impact des infrastructures touristiques sur l'évolution des falaises de Pénestin (*Miossec, 1995 puis Pian et al., 2011*) qui ont évalué le recul du trait de côtes. Tous s'accordent sur l'érosion littorale, avec des vitesses évaluées entre 0,2 et 1,8 m par an notamment sur le secteur de la mine d'Or.

A l'heure actuelle, Pénestin fait partie du programme de recherche ANR Cocorisco, mené par des universitaires de l'Université de Bretagne Occidentale à Brest, sous la direction d'Alain Hénaff et par des universitaires de Géosciences Rennes. L'approche se fait à l'aide d'imagerie stéréoscopique et de scanner laser 3D (Article du 8 juillet 2010, Ouest\_France).



*Illustration 6* - Extrait du site de l'IFEN au niveau de la commune de Pénestin : Trait de côte en rouge – en érosion, en gris – pas d'information : Source Euroision 2003).

Dans l'étude qui suit, le BRGM, a privilégié vérifier si le départ de matière au niveau de la falaise de la Mine d'Or, pouvait : soit se traduire par des tassements différentiels, soit se traduire par un glissement rotationnel de la formation alluviale reposant sur les argiles d'altération ou sur un niveau lubrifié, et pouvant avoir des répercussions plus à l'intérieur des terres. En effet, l'existence à la base de la falaise de la Mine d'Or, de résurgences (sources) pouvaient être interprétées comme les exutoires d'un aquifère à mettre en évidence. Lors de la remise des résultats intermédiaires, la DDTM 56 et la commune ont souhaité que le BRGM réalise une évaluation de la vitesse de l'érosion littorale en complément de cette présente, il a donc été proposé une évaluation de la cinématique du trait de côte, sur deux périodes de temps entre 1962 et 2000.

### 3. Contexte géologique & géomorphologique

#### 3.1.1. Contexte géomorphologique

La commune de Pénestin est une commune du département du Morbihan, située au sud de l'estuaire de la Vilaine, en région Bretagne, et au nord de la Baie de Pont-Mahé (Loire Atlantique, 44).

La Vilaine après avoir parcouru 220 km et drainé un bassin versant d'environ 10 000 km<sup>2</sup>, se jette dans une baie du même nom, au nord de la commune.

Cette baie, atteignant une profondeur maximum de 30 m est partiellement protégée des houles d'Ouest dominantes par un chapelet d'îles et de presqu'îles, telles que respectivement, Belle-Île, Houat, Houëdic et Quiberon, mais soumise aux actions des houles de Sud-Ouest.

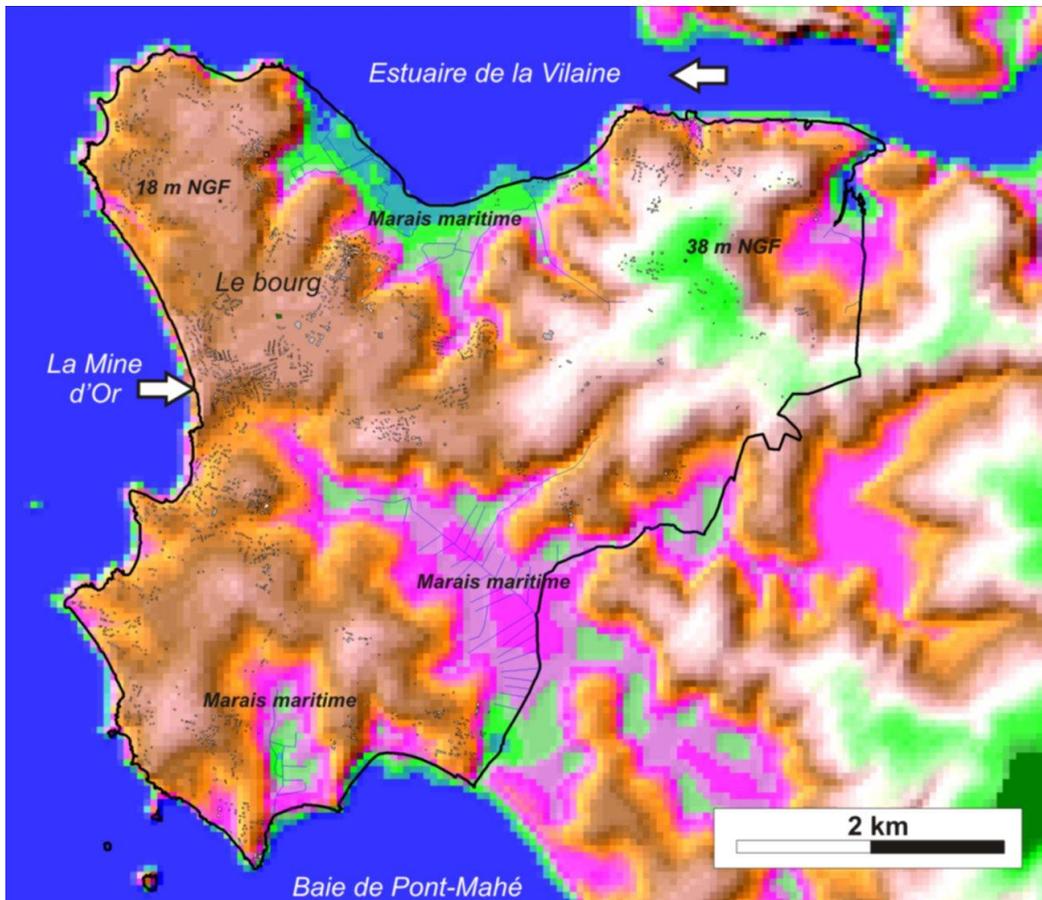


Illustration 7 – Géomorphologie de la commune de Pénestin (MNT 50 m IGN) ; Limite de commune trait Histolitt V2 – SHOM-IGN

D'Est en Ouest, l'estuaire évolue depuis une morphologie de chenaux méandriformes, vers une forme plus rectiligne qui s'évase vers l'embouchure, soulignant un estuaire dont la géomorphologie est intermédiaire entre un estuaire dominé par les vagues partiellement ouvert et un estuaire dominé par la marée selon Dalrymple et Choi (2007) (Goubert et Menier( 2005). Ainsi l'estuaire est soumis aux débits sortant du barrage d'Arzal à une dizaine de kilomètres en amont et à un régime de marée méso à macrotidal de 2,5 m en mortes

eaux et plus de 5 m en vives eaux. La limite entre l'estuaire intermédiaire et la zone externe est marquée par un haut fond vaseux.

Depuis la construction du barrage d'Arzal sur la Vilaine, entre 1965 et 1970, l'estuaire de la Vilaine est soumis à un fort envasement.

L'altitude de la commune de Pénestin oscille entre 15 et 25 m NGF en moyenne, entre l'estuaire de la Vilaine au Nord et la Baie de Pont-Mahé au Sud, atteignant sur sa partie Nord-Est, les 40 m NGF.

Trois marais maritimes, sont présents sur la commune, un au Nord, orienté Sud-Est-Ouest, depuis le Haut-Pénestin à Tréhiguer et remontant jusqu'à Le Toquem, et deux au Sud, l'un Nord-Sud, entre Le Bile, le Lesté et Pradun et un second plus étendu et remontant jusqu'au bourg depuis la Baie de Pont-Mahé, le marais de Kerseguin. Les altitudes de ces trois marais maritimes sont de 3 à 4 m NGF. Chaque marais maritime a un exutoire sur la mer et est protégé par un cordon de sable au Sud et de galets au Nord.

### 3.1.2. Contexte géologique (référence ci-dessous, dans Cagnard et al., 2004)

La commune de Pénestin appartient au domaine hercynien de Bretagne Sud qui constitue une partie de la zone interne de la chaîne hercynienne, délimitée au nord par une zone de déformation majeure : la Branche Sud du Cisaillement Sud Armoricaire (BrSCSA) (Jégouzo, 1980) et correspondant à un décrochement d'échelle régionale dextre (Arthaud et Matte, 1977) (illustration 8).

Les principales unités géologiques qui composent cette zone interne de la chaîne hercynienne, sont (illustration 8):

- Une unité supérieure de roches métamorphiques de type hautes pressions et basses températures, composée des schistes bleus de l'Île de Groix et du Bois de Céné (Pressions de 1400 à 1900 MPa et Températures de 500 à 550° C, Bosse et al, 2002), et de roches volcaniques métamorphosées et schistes noirs de Belle-Ile-en-Mer et de Vendée (Pressions de 700 à 900 MPa et Températures de 350 à 400° C, Le Hébel et al., 2002.).
- Une unité intermédiaire, composée principalement de micaschistes dont le métamorphisme occupe le domaine du faciès *schiste-vert* au faciès *amphibolite* (Triboulet et Audren, 1988 et Goujou, 1992), qui compose le substratum de Pénestin.
- et enfin une unité inférieure, constituée de migmatites, dont les conditions de métamorphisme, sont de 700 à 750° C et de pression de 1000 MPa (Golfe du Morbihan; Jones et Brown, 1990).

L'âge du métamorphisme est carbonifère au sens large pour les unités supérieures et intermédiaires, c'est-à-dire autour de 350 Ma (Bosse et al., 2002 ; Le Hébel, 2002), alors que dans le Golfe du Morbihan, le métamorphisme des migmatites, a eu lieu entre environ 290 et 310 Ma (Gapais et al., 1993 et Brown et Dallmeyer, 1996). La mise en place des granites à deux micas, s'est faite généralement dans les micaschistes, entre 310 et 300 Ma (Bernard-Griffiths et al., 1985, Le Corre et al., 1991 et Le Hébel, 2002).

À l'échelle régionale, le modèle tectonique de Bretagne Sud est celui d'une faille normale (de détachement), qui a permis de faire remonter (exhumation) les formations métamorphiques de Hautes pressions et Basses températures. Une forte linéation d'étirement montre un mouvement (cinématique) de l'Est vers l'Ouest (Brun et Burg 1982, Burg et al., 1987 et Burg et al., 1994) (illustration 8).

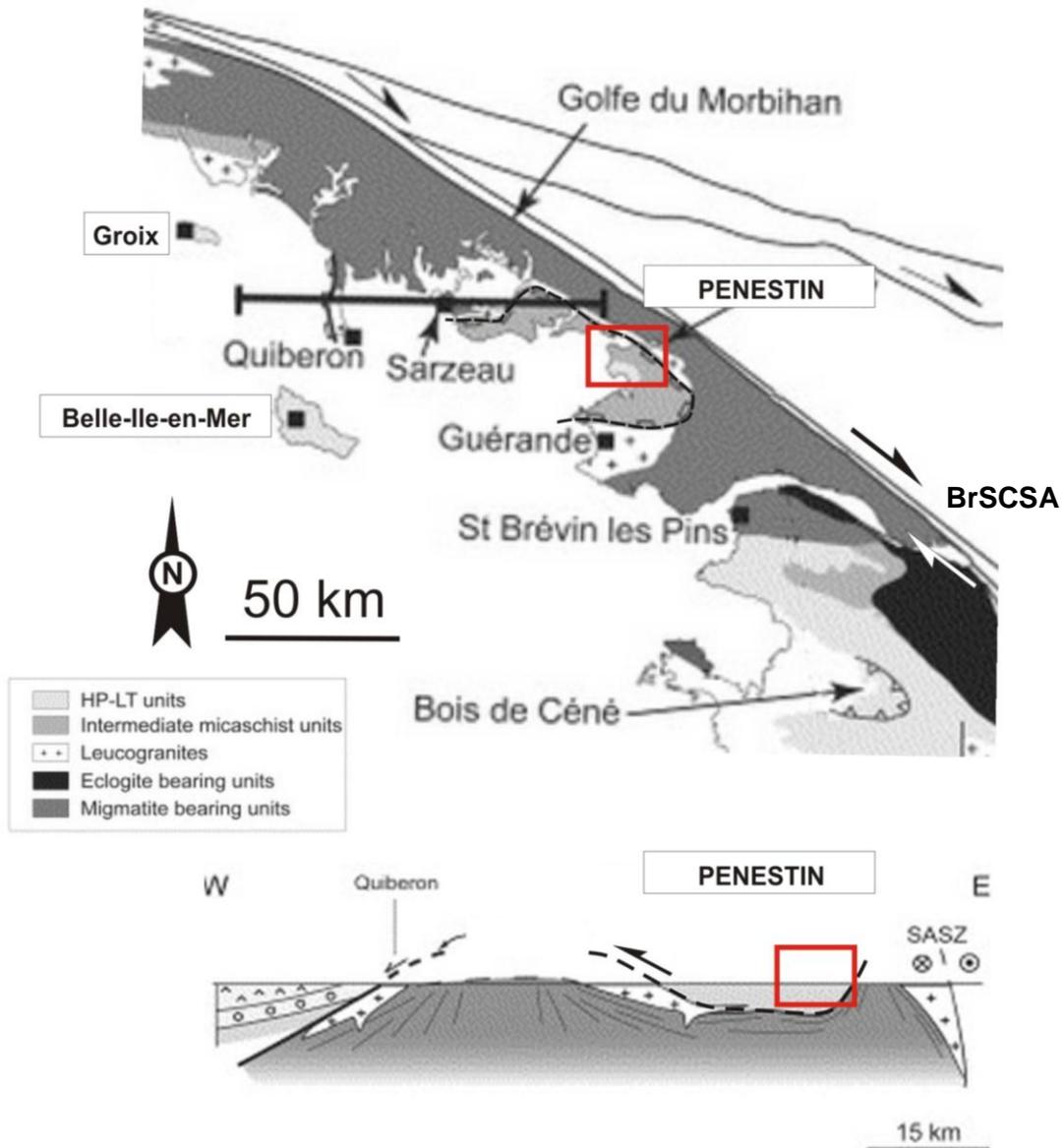


Illustration 8 – Schéma structural et Coupe schématique de la partie interne de la chaîne hercynienne de Bretagne Sud (Cagnard et al., 2004)

La commune de Pénestin et les micaschistes qui composent sont sous-bassement, sont situés dans le toit d'une faille majeure normale ou de détachement (illustration 8 en bas).

Cette édifice hercynien est affecté dès le Trias (200 Ma) par (1) les soubresauts de l'ouverture de l'Atlantique Nord et (2) du Jurassique (136 Ma) au Crétacé supérieur (80 Ma) par celle du golfe de Gascogne. La Bretagne, restant un vaste domaine émergé, subit sous des climats chauds et hydrolysants, une altération générale dite « supergène », pouvant atteindre les 100 mètres d'épaisseurs (Klein, 1996 ; Wyns, 1991).

Sur la falaise de la Mine d'Or, le profil d'altération affectant les micaschistes, est observable sur 2 km de long et une dizaine de mètres de haut environ (illustration 9).



*Illustration 9 : La falaise de Pénestin au niveau de la Mine d'Or (56) ; Les micaschistes ne sont plus ici reconnaissables, ils laissent place à des argiles et limons kaoliniques d'altération*

La collision entre l'Afrique et l'Europe, avec une rotation de 23° de la péninsule ibérique, du Crétacé supérieur à l'Eocène supérieur (38 Ma), entraîne un changement de contraintes tectoniques, devenues compressives, réactivant les failles hercyniennes comme le BrSCSA (Ziegler, 1992). Enfin au Miocène supérieur- Quaternaire ancien (5,2 ma), sur la marge sud de la Bretagne, sont décrits de petits bassins « pull-apart » (Proust et al., 2001) et une sédimentation détritique fluvio-marine jusqu'au Pléistocène (Brault et al., 2001 ; van Vliet et al., 2009).

La formation géologique de Pénestin notée e-Fx, correspondent à des sédiments détritiques très grossiers (conglomérats, graviers, sables et argiles rouges à orangés), d'un paléo-estuaire de la Vilaine pour Guilcher (1948), et de la Loire pour les deux unités inférieures et de la Vilaine pour l'unité supérieure, par Brault et al., (2001). Ces sédiments détritiques reposent indifféremment sur les micaschistes peu à pas altérés comme sur les micaschistes très altérés, jusqu'à l'orthoigneiss de Pénestin.

Brault et al., (2001) définissent trois unités distinctes dans la formation de Pénestin (illustration 10 en bas):

- Une unité U1 à la base : composée de conglomérats à blocs et de niveaux de sables fins avec des lits obliques, sur 1 m d'épaisseur et interprétée comme dépôts chaotiques : coulées de débris et crues, à proximité d'un cône alluvial.
- Une unité U2 : composée de niveaux de sables grossiers à fins contenant des lits (lamines) horizontaux à obliques et se terminant par des niveaux silto-argileux, avec rides de courants et dont les argiles sont bioturbées, pour une épaisseur de 3 m. L'environnement de dépôts de cette unité U2 correspond à un milieu estuarien interne sous la dominance des marées.
- Enfin l'unité U3, composée d'une répétition de l'alternance de conglomérats, sables grossiers et moyens, avec parfois un matériel silto-argileux rouges, dans lesquels des traces de racines sont observables. L'environnement de dépôts de cette unité correspond à celui de chenaux d'un réseau en tresses avec des lacs temporaires.

Van Vliet et al. (2009) apportent en complément à la séquence proposée par Brault et al., une unité sous l'unité U1, notée : B, l'unité U1 de Brault et al., devient l'unité C1, l'unité U2 devient C2 (a et b) et C3, et enfin l'unité III devient l'unité D1 (illustration 10 en haut).

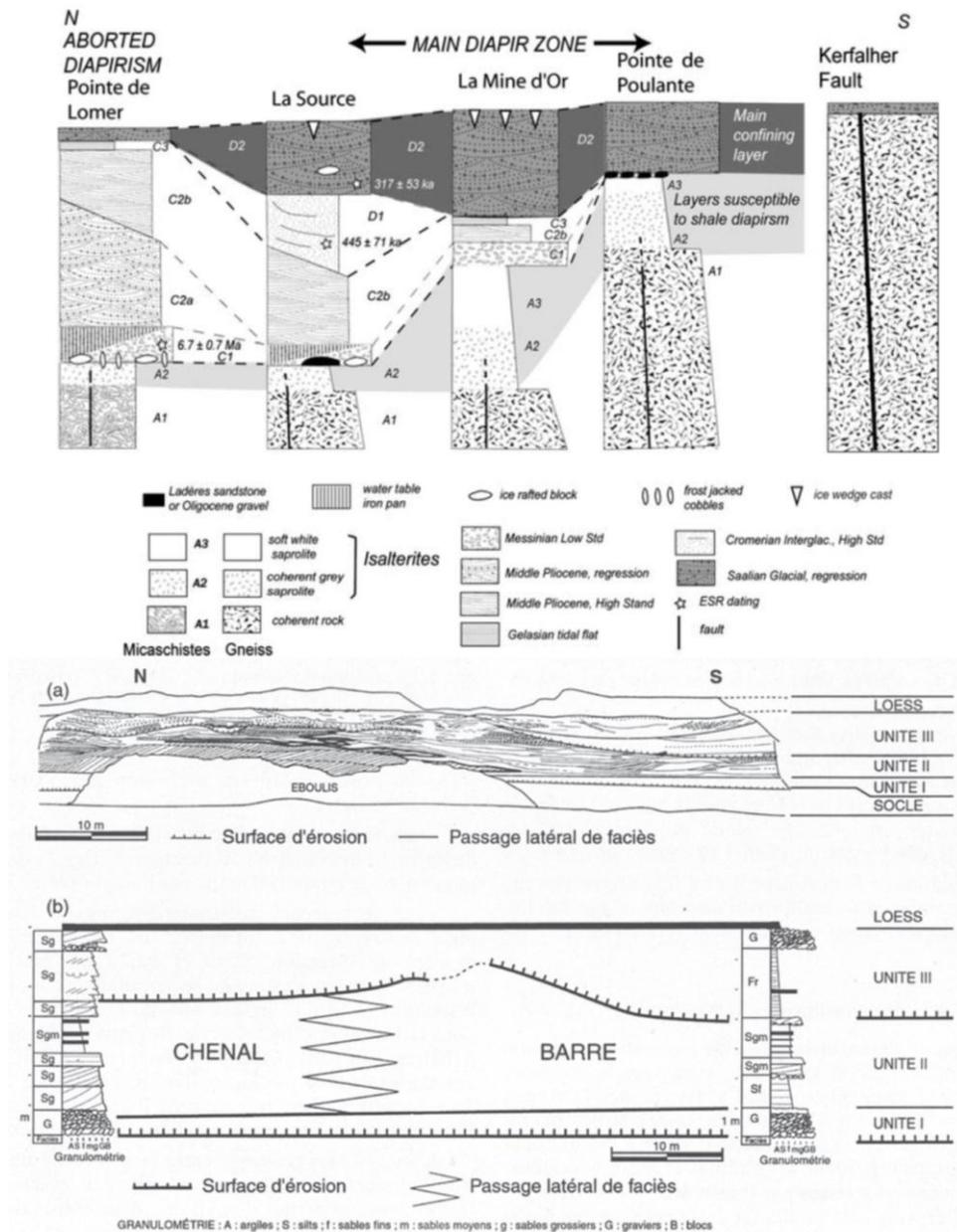


Illustration 10 – En haut, Découpage sédimentaire de la formation de Pénestin par van Vliet et al., (2009) ; en bas, par Brault et al. (2001)

Les déformations observées sur cette formation de Pénestin ont plusieurs explications.

Rivière et al., (1963) proposent qu'elles sont la conséquence de « pingos » glaciaires. Les pingos sont des formes géométriques dues à l'alternance du gel et dégel de la nappe phréatique de lacs, étangs ou mares etc., sous des climats très froids, qui en augmentant de volume en périodes froides et en diminuant en périodes plus chaudes, créent des formes cartographiques polygonales et en coupe, des structures de forme concave.

Van Vliet-Lanoë et al., (2009) proposent que les diapirs (remontée d'argiles d'altération, au sein des terrasses alluviales), soient la conséquence de séismes ayant généré cette argilocinèse, facilitée par la présence d'eau marine ou d'une nappe phréatique. La liquéfaction des argiles d'altération, et leur remontée seraient accentuées aussi par le poids des sédiments détritiques. L'âge de la déformation se situerait autour de 280 000 ans BP

(*Before Present*) et serait le résultat de la subsidence progressive de la marge sud de la Bretagne (illustration 11 à gauche et illustration 9).

Enfin Brault et al., (2001), proposent une déformation de la formation de Pénestin, dans un régime compressif dont le régime de contraintes a pour orientation NNW-SSE. Cet événement compressif engendre des failles et des plis syn-sédimentaires orientés N050-070 et sub-contemporains ou dans un continuum de déformation avec la faille décrochante N110, parallèle à la BrCSA. Brault et al., évoquent donc un système compressif décrochant, dont les différentes directions des failles pourraient être celles que l'on retrouve sur les modèle de type Riedel.

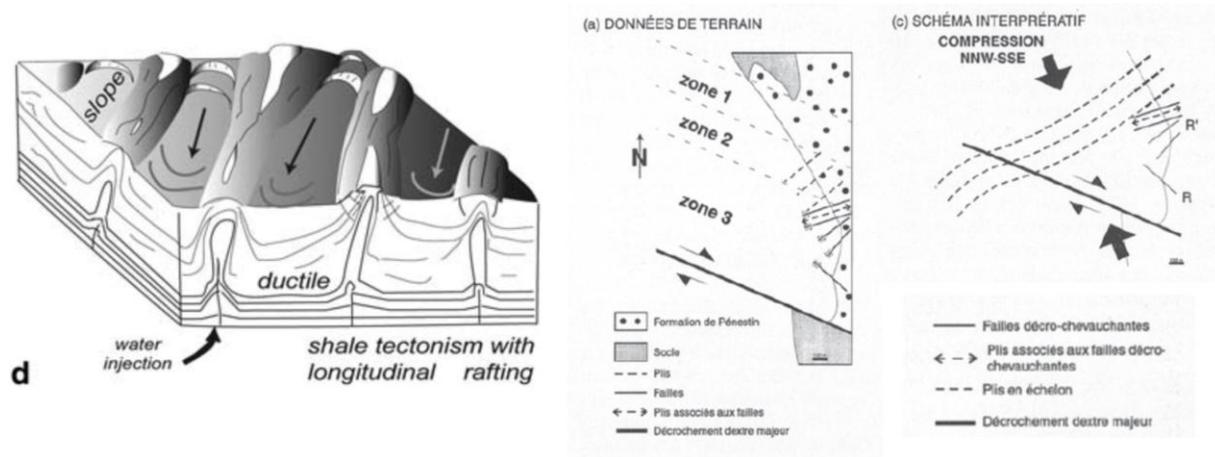


Illustration 11 – Modèles de déformation des terrasses alluviales de Pénestin, à gauche d'après van Vliet et al. (2009) et à droite d'après Brault et al. (2001)

### 3.1.3. Contexte hydrogéologique

Une seule étude hydrogéologique, que nous n'avons pas pu nous procurer, existait sur la commune de Pénestin. Cette étude proposait un suivi hydrogéologique de la nappe phréatique de la falaise de la Mine d'Or, par un système de piézomètres en « flute de pan » perpendiculaire à la falaise, depuis le talweg en arrière de celle-ci jusqu'à la falaise. Les piézomètres faisaient de 2 à 15 mètres de profondeur, le plus profond de 15 mètres étant le plus proche de la falaise (Jégouzo, 2001).

Les aquifères dits « de socle » (schistes et granites) sont généralement contenus dans les altérites et dans les plans de fractures qui l'affectent et affectent la roche originelle (illustration 12).

Les altérites dérivent de la modification in situ des propriétés physiques et chimiques des roches sous l'action des eaux météoriques. Pour la Bretagne, l'altération supergène (de surface) s'est faite grâce aux climats chauds et humides du Tertiaire (Durand, 1960 ; Estéoule-Choux, 1967 ; Ollivier-Pierre, 1980), qui ont pu être d'excellents catalyseurs de ces transformations. Les profils latéritiques à kaolinite, atteignent parfois des épaisseurs de l'ordre de la centaine de mètres. La position altimétrique de la surface continentale par rapport au niveau marin relatif (Wyns, 1991, 1996 ; Quesnel, 1996 ; Thomas, 1999) et l'absence de pentes fortes (Wyns et Guillocheau, 1999), ont pu conditionner très largement leur développement.

De la base au sommet, le profil d'altération est le suivant (Illustration 12) :

- La Zone fissurée ou le domaine fissuré, en continuité avec la roche-mère sous-jacente et d'une épaisseur variable (60 à 70 m), elle est caractérisée par une fracturation importante qui décroît en profondeur et qui provient de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes produites par les changements de phases des minéraux (hydratation des ferro-magnésiens – biotite - avec augmentation de volume, oxydation des sulfures) et de l'histoire tectonique la roche-mère. La fracturation liée à l'altération entraîne une augmentation de la porosité de la roche-mère.
- Les Isaltérites sont des roches meubles où la texture originelle de la roche et les relations spatiales entre les minéraux sont préservées. Le volume de la roche n'est, dans le détail, pas conservé totalement, en raison de l'apparition de nouveaux minéraux qui « gonflent » ou se « contractent » en fonction du degré d'hydratation du profil.
- Les isaltérites passent progressivement aux Allotérites, terme utilisé pour décrire les horizons altérés où les structures de la roche-mère (stratification, schistosité ou foliation) ne sont plus visibles. Les minéraux sensibles à l'eau, sont alors remplacés par des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes. Ces transformations s'accompagnent d'une disparition progressive de la structure de la roche originelle et d'une perte de volume.
- Parallèlement au développement du profil d'altération, des formations siliceuses (silcrètes), correspondant à une mobilisation lente de la silice de la roche-mère, se mettent en place en base de profil dans un contexte tectonique relativement stable (Meyer, 1987).
- Enfin, le sommet du profil est coiffé, d'une partie rarement conservée en Bretagne qu'est la cuirasse ferrugineuse ou ferricrètes.

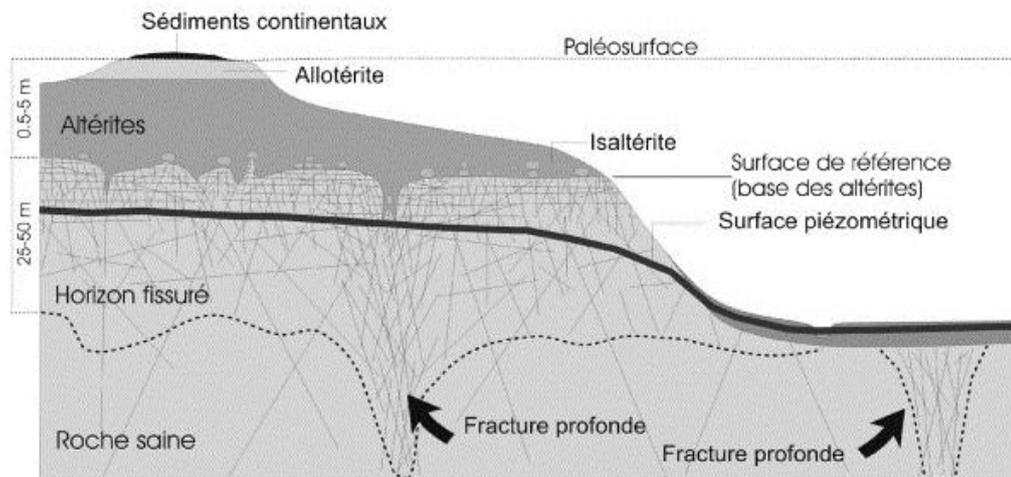


Illustration 12 – Organisation des altérites et de l'aquifère d'après Wyns (1998)



## 4. Présentation des résultats

Les résultats présentés dans cette partie du manuscrit, correspondent aux investigations réalisées sur la commune. Ils sont de trois types :

1 - Les résultats de l'acquisition de données géologiques : forages, cartographie de détail et analyses aux rayons X ;

2 - Les résultats de l'acquisition des données hydrogéologiques ; forages et suivi des aquifères ;

3 - Les résultats de l'acquisition des données géotechniques : suivi de jauges-saugnac, suivi des inclinomètres, et analyses des matériaux ;

4 – Les résultats de l'acquisition du trait de côte à deux périodes de temps différents.

### 4.1. LES DONNEES GEOLOGIQUES

#### 4.1.1. Les données de forages

Du 16 au 27 avril 2012, la société *Hydrogéotechnique* a réalisé sous la supervision d'un agent du BRGM, les huit ouvrages (6 piézomètres et 2 inclinomètres) sur la commune.

L'implantation de chaque ouvrage sur le domaine public communal, avait été préalablement validée par les services techniques de la commune et par M. le Maire (illustration 13) .

L'objectif des ouvrages était triple :

1 – l'acquisition de données géologiques faisant défaut pour le sous-sol de la commune ;

2 – l'acquisition de données hydrogéologiques et le suivi éventuel d'aquifères ;

3 – le suivi de la falaise par la transformation de deux ouvrages en inclinomètres.

Les ouvrages ont été implantés autour de la zone la plus sinistrée de la commune afin de déterminer s'il existait une formation géologique non cartographiée responsable des sinistres observés et tout autour de cette zone afin d'en évaluer son étendue. L'ensemble des coupes géologiques et des coupes techniques de chaque ouvrage réalisé figure en annexe 1.

Dans la zone sinistrée, une formation géologique a retenu notre attention. Il s'agit d'une formation argileuse de couleur vert kaki, identifiée sur deux ouvrages. Sur le piézomètre 4, située juste au nord de la zone sinistrée et sur l'inclinomètre 2, situé au cœur de la zone sinistrée.

Cette formation argileuse, a montré un caractère très plastique, bloquant à plusieurs reprises les tubes de forage à l'avancement dite aussi ODEX.

Sur le piézomètre 4, elle a été identifiée à partir de 1.80 m de profondeur mais elle s'est véritablement individualisée à 3.11 m de profondeur et jusqu'à 8.70 m. Son épaisseur serait ainsi de 7 m environ. En fin de foration, un niveau de sables grossiers à fins de couleur rouge, a été atteint sur une épaisseur de 0.5 m environ, reposant sur les argiles d'altération

(allotérites). Ce sable implique que cette formation géologique argileuse est une formation d'origine sédimentaire, certainement d'âge tertiaire et présente sur cette partie de la commune.

Sur l'inclinomètre 2, une formation géologique argileuse ayant les mêmes caractéristiques lithologiques et mécaniques, a été identifiée. Elle a été atteinte à 1.15 m de profondeur jusqu'à 3.19 m. Soit sur une épaisseur d'environ 2 m. Sur cet ouvrage comme sur le piézomètre 4, lors de la foration, des difficultés ont été rencontrées à l'avancement, notamment pour ressortir le train de tiges.

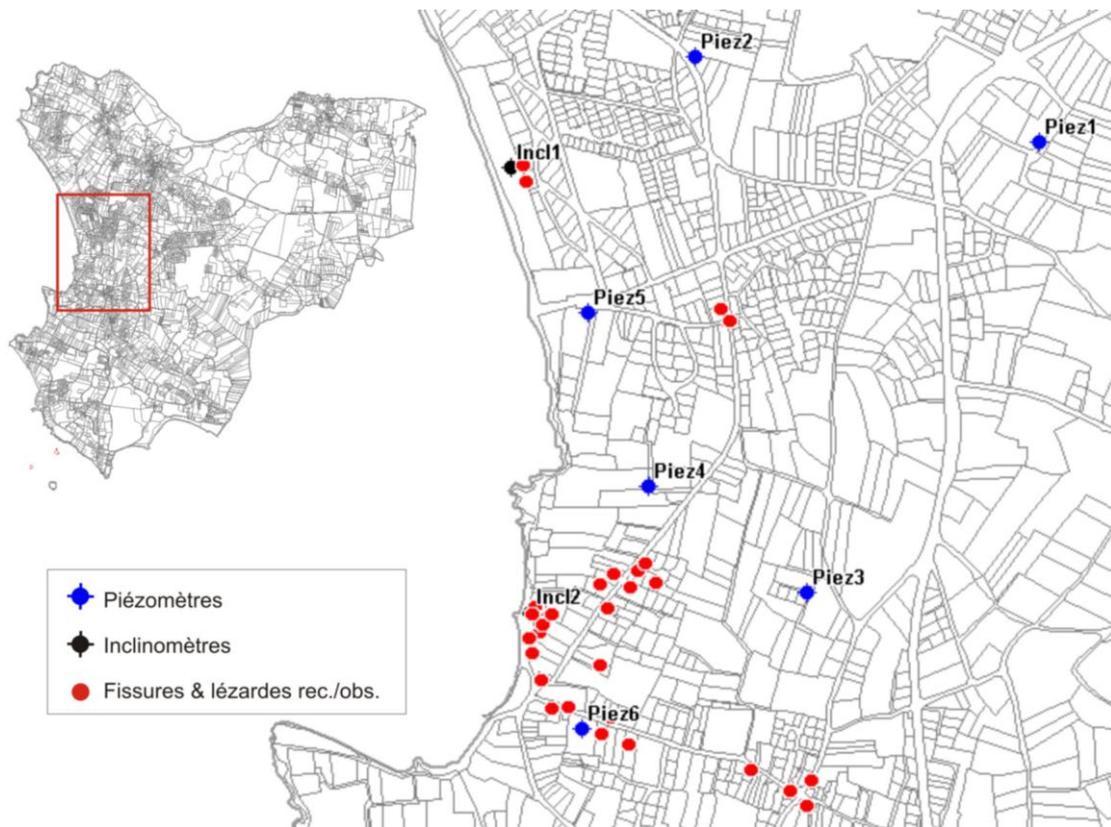


Illustration 13 – Localisation des ouvrages réalisés (forages) et des fissures/lézardes recensées et observées sur la commune de Pénestin (56)

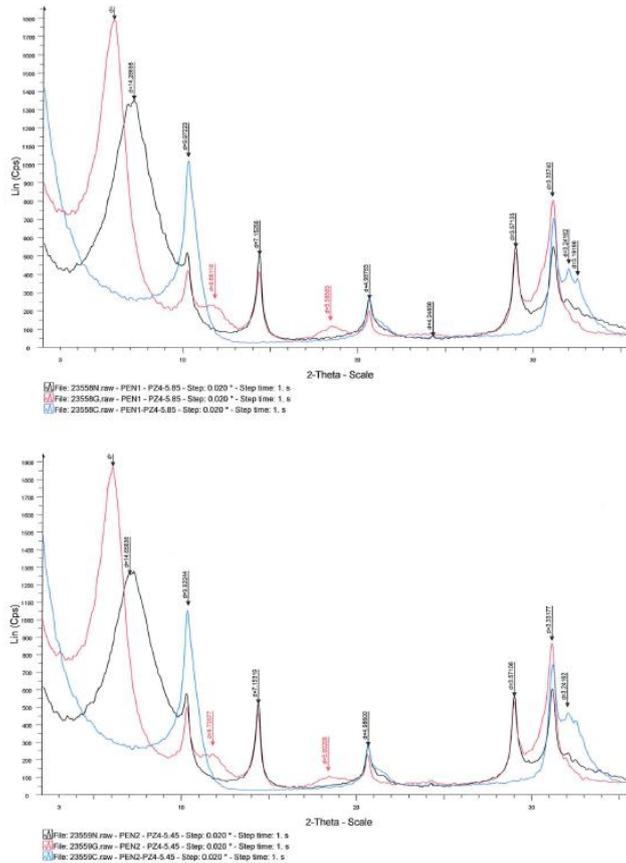
Sur les piézomètres : 1, 2 et 5 et sur l'inclinomètre 1, cette formation argileuse n'a pas été identifiée. Des niveaux plus ou moins argileux, associés à des sables ou limons, peuvent être présents au sein des terrasses alluviales mais nous n'avons pas observés de niveaux argileux sensus stricto, leurs épaisseurs n'excèdent pas les deux mètres et leur caractéristique lithologique n'est pas la même, ce qui les exclut d'une implication particulière dans le phénomène d'aléa retrait-gonflement.

Ainsi sur ces 4 ouvrages, il est intéressant de noter la variation importante d'épaisseur de la formation alluviale allant de 5.50 m environ sur le piézomètre 1 à 14.50 m sur le piézomètre 2.

Sur les deux ouvrages restants, les piézomètres 3 et 6, la formation alluviale est quasi inexistante, hormis sur le piézomètre 3 où il a été possible d'observer 0.60 m d'argiles vertes kaki plastiques. Ainsi faisant suite à des limons orangés correspondant certainement aux colluvions cartographiés sur la carte géologique au 1/50 000 (feuille La Roche-Bernard), les deux profils s'encaissent dans les altérites argilo-limoneuses (allotérites) telles que celles qu'il est possible d'observer sur la falaise de la Mine d'Or.

Cette formation argileuse a été échantillonnée pour être analysée au Rayons X afin de connaître sa minéralogie.

Les deux analyses aux rayons X réalisées (illustration 14), montrent que cette formation argileuse est composée de : 88-89 % de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés smectites/chlorites), 4 à 5 % d'illite et 7 % de kaolinite.



Les apports de la cartographie géologique ont été multiples.

1 - Les altérites (argiles d'altération telles qu'il est possible de les observer au niveau de la falaise de la Mine d'Or), ont été identifiées sur la partie nord-est de la commune, au niveau des lieux-dits de Berniquet, et Rochefort, puis plus au sud, au-dessus du lieu-dit : Sainte-Foy et enfin au sud-est de la commune au niveau des lieux-dits de Kerfalher et Brécéan (illustration 18).

2 - La formation géologique argileuse vert-kaki identifiée en forage (piézomètre 4 et inclinomètre 2) a été identifiée à l'affleurement. Au sud de la plage de la Poudrantaïs, un conglomérat ferrugineux recouvre en discordance angulaire les micaschistes. Ce conglomérat passe latéralement et verticalement à une formation argilo-limoneuse de couleur vert kaki (illustration 15 A et B).



*Illustration 15 – A : Passage latéral et vertical du conglomérat ferrugineux à la formation argilo-limoneuse vert kaki, formation qui cache la faille N110/120 ; B – Détail du conglomérat, fragment de micaschistes ; C – Discordance entre le conglomérat et les micaschistes qui cache ici les accidents N020.*

3 - La faille de Kerfalher, orientée N110 / 120 (au niveau de la Poudrantaïs), est ici cachetée par cette formation tertiaire (illustration 15 A). En effet, ni cet accident tectonique, ni d'autres accidents parallèles à cette faille, n'ont été observés affectant les conglomérats et la formation argileuse sus-jacente. Ainsi entre la faille et la formation géologique sédimentaire, on observe des dépôts de pente du même âge que la formation argileuse, soulignant le fait que cette formation sédimentaire vient combler une paléo-topographie existante.

4 - La cinématique de cette faille (N110 / 120) et de ce fait, la cinématique des accidents ayant la même orientation, a pu être observée dans un autre secteur, le long des falaises Est de la pointe du Bile. Assez clairement, on peut observer que ces accidents sont des failles dites « normales », où c'est la partie Nord-Est qui s'est effondrée, ce qui confirme la préservation du profil d'altération que l'on retrouve à la Mine d'Or et son absence sur la partie Sud-Ouest (illustration 16). Les différents auteurs supposaient une telle cinématique mais elle n'avait pas encore été illustrée clairement (cf. contexte géologique pour une revue).

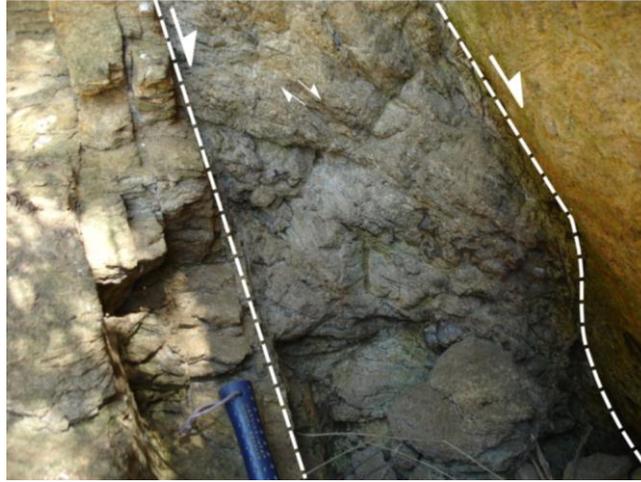


Illustration 16 – Faille N110/120 au niveau des falaises Est de la pointe du Bile

5 - Les diapirs d'argiles d'altération des micaschistes sous-jacents que l'on peut observer au niveau de la falaise de la Mine d'Or, semblent se localiser à l'aplomb de plans de failles orientés N020 à N030 et sub-verticaux. L'observation de la microtectonique sur la falaise et notamment dans les micaschistes peu ou pas altérés, montre un jeu extensif défini par la présence de petits grabens (illustration 17 A, B et C).

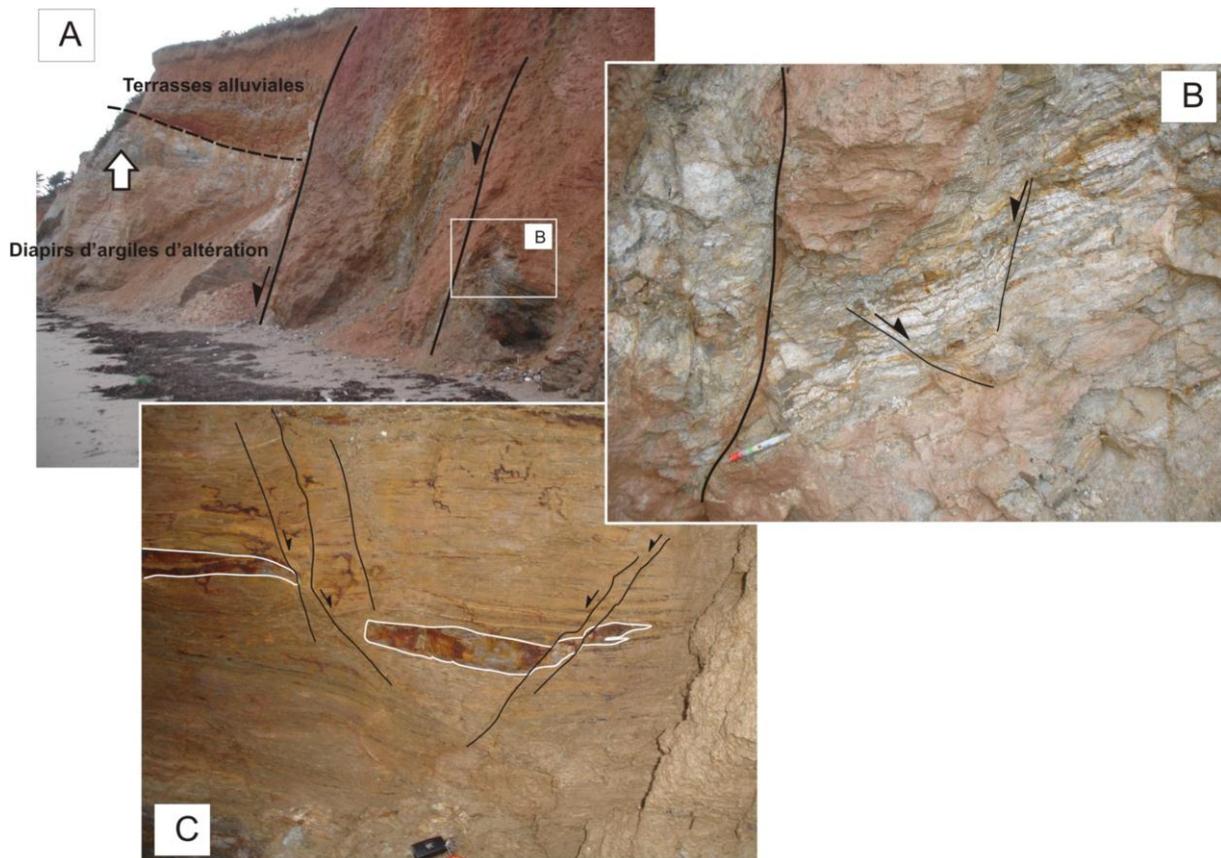


Illustration 17 – A – Diapir d'argiles d'altération (argilocinèse) et faille N020/030 ; B – Détail en bordure de la faille N020/030, la foliation métamorphique des micaschistes est décalée ; C – Même figure qu'en B, mais au niveau d'un filon de quartz parallèle à la foliation.

6 - Au niveau du lieu-dit Le Foy, deux dalles de silcrètes de 0.5 m d'épaisseur et de 1 à 2 m<sup>2</sup>, ont pu être observées. Elles attestent ainsi l'existence du profil d'altération dans

le Nord-Est de la commune et reconnu à l'aide de tarière à mains mais aussi de dénivelés topographiques dont l'origine pourrait être tectonique.

#### **4.1.3. La carte géologique et la carte des argiles**

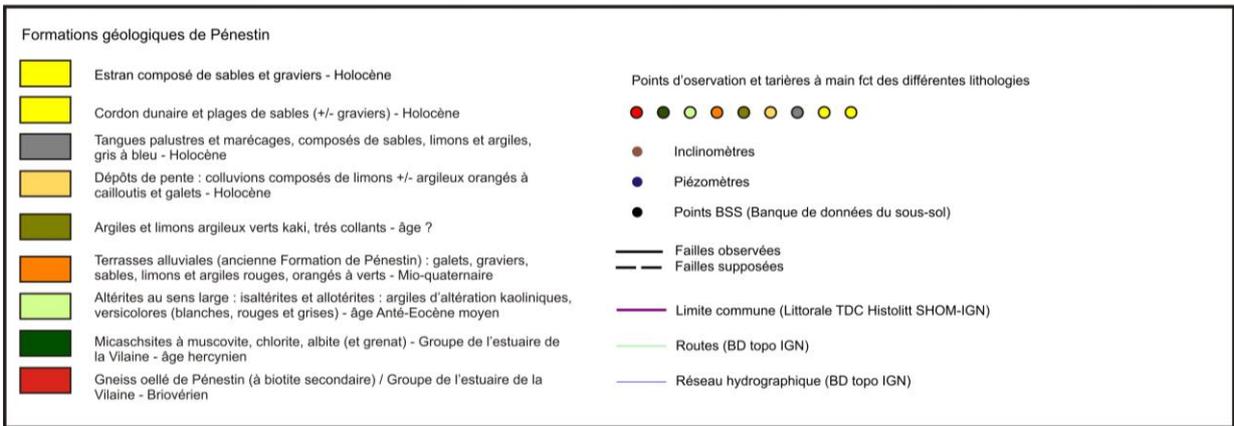
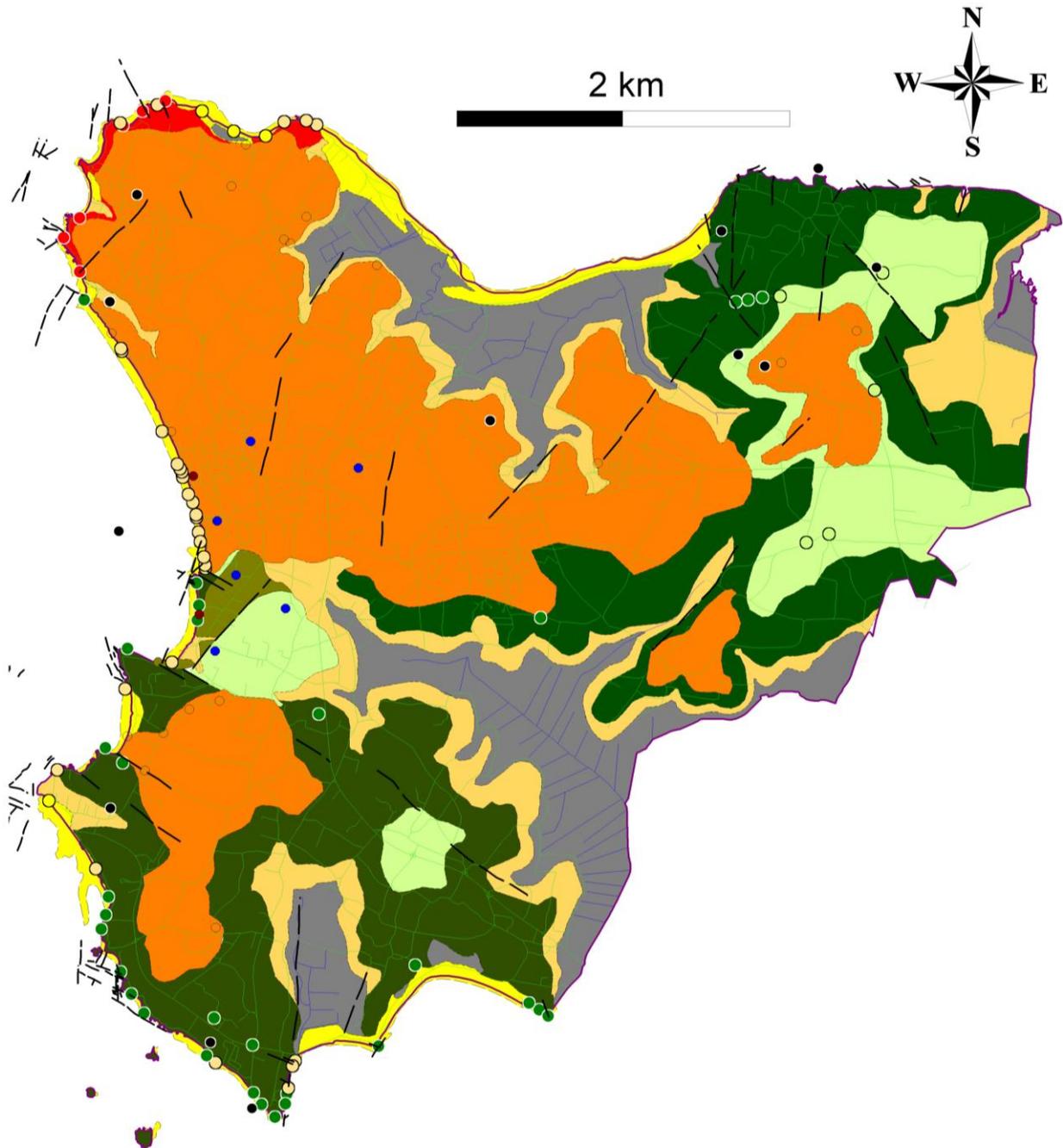
Compte tenu des observations faites lors du lever géologique, et décrites ci-dessus et des données récoltées lors de la réalisation des forages, il a été possible de proposer une cartographie plus précise de la commune de Pénestin.

Cette nouvelle carte géologique de la commune intègre les formations géologiques superficielles dont l'une d'entre elles avaient été mises sous la forme de formation géologique composite e-Fx, et qui faisaient défaut sur certaines parties du territoire, mais elle intègre aussi les observations structurales, et propose ainsi une mise en carte en relation avec l'histoire géologique du secteur (illustration 18).

Le résultat de l'acquisition des nouvelles données géologiques est présenté ci-dessous (illustration 18 à gauche).

A partir de cette nouvelle carte géologique dont l'échelle de validité est le 1/10 000, l'extraction des formations argileuses (ou marneuses), de la commune de Pénestin, donne lieu à quatre formations géologiques argileuses distinctes :

- 1 - Les Tangues palustres et marécages, composés de sables, limons et argiles de couleur gris à bleu ;
- 2 – Les Dépôts de pente situés au-dessus des premiers topographiquement, composées de limons argileux orangés à cailloutis et galets arrondis ;
- 3 – Les Argiles et limons argileux verts kaki, très collants identifiés dans cette étude;
- 4 – et enfin les altérites au sens large, isaltérites et allotérites, composées d'argiles et limons d'altération, kaoliniques et versicolores (blanc, rouge et gris) ;
- 5 – Les terrasses alluviales : galets, graviers, sables, limons et argiles, ne figurent plus comme une formation argileuse. La plupart des affleurements et les résultats des sondages montrent qu'il n'y a pas de niveaux d'argiles individualisés. La fraction fine (argileuse) est associée à des niveaux de sables ou limons et jamais avec des épaisseurs conséquentes, hormis dans le secteur des argiles et limons argileux verts kaki (point 3 ci-dessus) et dont il a été possible d'individualiser la formation.



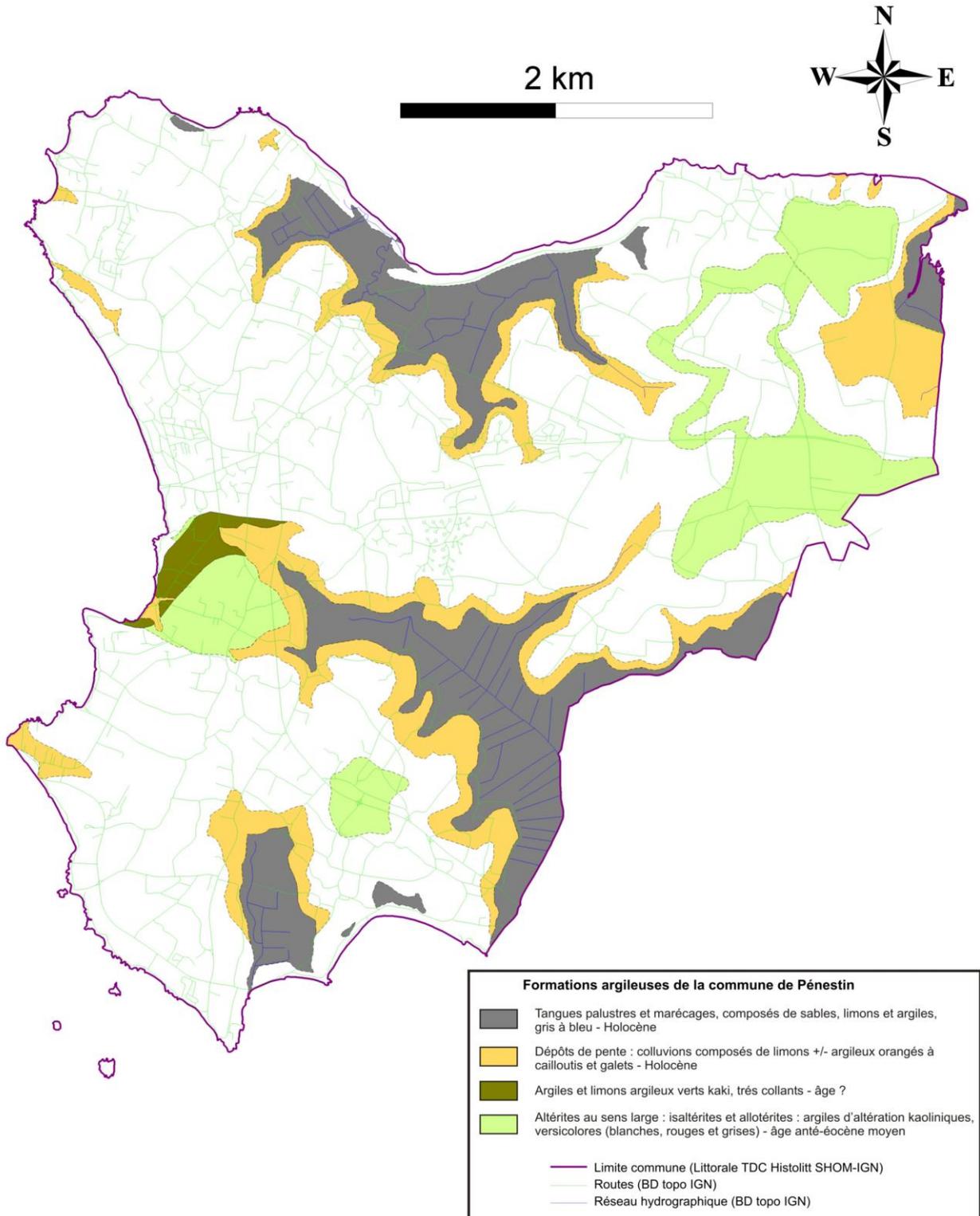


Illustration 18 – Carte géologique de détail au 1/10 000 et carte géologique des formations argileuses extraite pour la commune de Pénestin(56) I

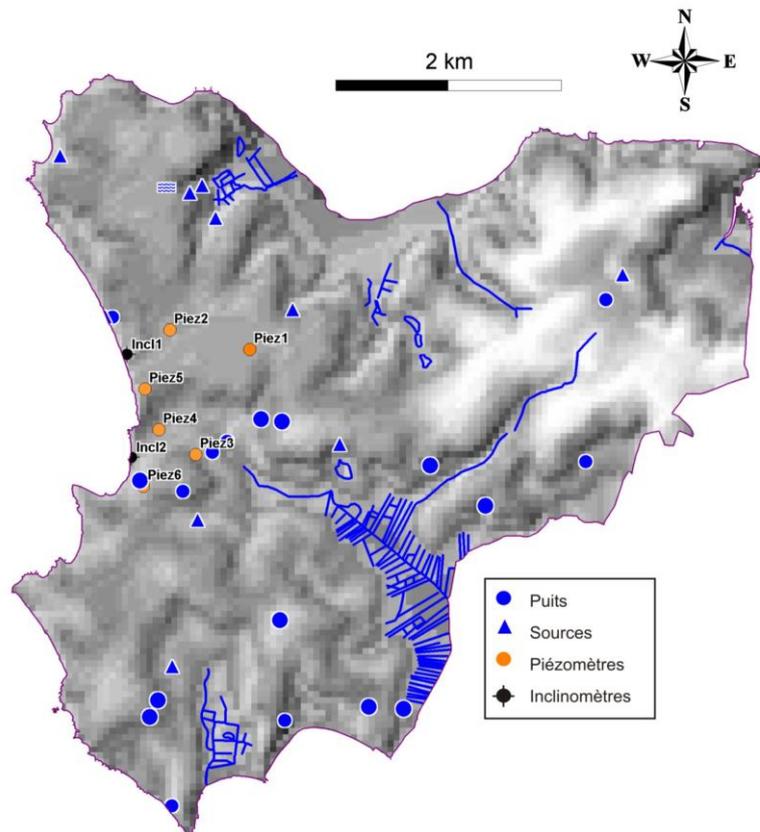
## 4.2. LES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les réseaux hydrographiques qui drainent la commune de Pénestin, sont surtout situés au nord et au sud (illustration 19).

Au nord, le réseau hydrographique, avant de rejoindre la Vilaine au niveau de son estuaire, traverse et alimente un marais maritime, parallèle au fleuve, et séparé par un cordon dunaire de sables et graviers. Ce marais s'étend d'Est en Ouest, depuis le Haut-Pénestin à Tréhiguier et remontant jusqu'à Le Toquem.

Au Sud, l'un des marais maritimes est orienté Nord-Sud entre Le Bile, le Lesté et Pradun, alors que le second : le marais de Kerseguin est plus étendu et remonte jusqu'au bourg depuis la Baie de Pont-Mahé.

Entre les marais maritimes du nord et ceux du sud, il existe un seuil de 16 m d'altitude NGF qui sépare à l'ouest, un plateau d'altitudes comprises entre 15 et 25 m NGF et au Nord-Est, un plateau d'altitude pouvant atteindre les 40 m NGF (illustration 19).



*Illustration 19 – Réseau hydrographique, puits et sources de la commune de Pénestin et localisation des ouvrages réalisés dans cette étude.*

De nombreuses sources et puits sont présents sur le territoire de la commune. Les sources comme les puits se situent parfois à mi-pente sur le plateau ouest. Certains puits captent, , les parties les plus basses de la nappe alluviale, avant que l'eau ne devienne saumâtre ou trop influencée par les marées ainsi certaines sources, comme celle de la Mine d'Or, correspondent à des résurgences de cette nappe alluviale.

Depuis le marais maritime Nord jusqu'à la falaise de la Mine d'Or, des petits talwegs découpent la topographie, avec la même direction N020/030.

Les ouvrages réalisés dans le cadre de cette étude sont situés autour du secteur sinistré de la commune et autour de la falaise de la Mine d'Or.

#### 4.2.1. Les données de forage

Les données géologiques et hydrogéologiques récoltées au cours de la foration sont résumées sur les coupes de chaque ouvrage mises en annexe 1.

Le résultat intéressant de la foration, sur le plan hydrogéologique, est la mise en évidence de deux nappes superposées.

En effet, sur les piézomètres 1, 2 et 4 et sur l'inclinomètre 1, des venues d'eau ont été observées à des profondeurs variables dans les formations géologiques détritiques de la terrasse alluviale mio-quaternaire.

Dans les piézomètres 3, 5 et 6, et dans l'inclinomètre 2, les venues d'eau ont été observées dans les altérites des micaschistes (isaltérites et allotérites) sous-jacentes.

Dans l'inclinomètre 1, les venues d'eau ont été observées dans les deux niveaux géologiques (terrasses et altérites), séparées par un passage complètement sec.

**La nappe de la terrasse alluviale :** Dans les terrasses alluviales, les venues d'eau étaient localisées le plus souvent dans les niveaux les plus grossiers de la passe de forage, comme des sables grossiers ou des conglomérats de graviers et/ou à la base même de la formation géologique. Ainsi la profondeur de cette nappe est fonction de l'épaisseur de la terrasse alluviale et de l'épaisseur de la couche aquifère.

Par exemple sur le piézomètre 2, l'épaisseur totale de la formation alluviale est de 14.5 m alors que sur l'inclinomètre 1, elle est de 7 m. Au niveau de la falaise de la Mine d'Or, la formation alluviale montre des variations d'épaisseur, dues à la présence de diapirs d'argiles d'altération sous-jacentes. En s'éloignant de la falaise vers l'intérieur du bourg, le piézomètre 2 montre ainsi que la formation alluviale peut avoir des épaisseurs supérieures en la faveur de ces diapirs. Avec une orientation N020/030 des diapirs, la formation alluviale peut décrire ainsi une forme en fuseau de même direction que les diapirs, avec des directions de circulation depuis la falaise vers le bourg.

De la même façon, sur l'inclinomètre 1, la base de la formation alluviale est à 7 m de profondeur (9.96 m NGF), et parallèlement à la falaise, la limite entre la terrasse et les altérites, descend progressivement au niveau de la mer où se situe le lieu-dit « la source ou la plage de la source ». Ainsi, la nappe de la terrasse alluviale s'écoule depuis l'inclinomètre 1 vers la source, suivant la pente définie par la base de la terrasse alluviale. Le lieu-dit de « la source ou de la plage de la source », correspond à la résurgence de la nappe de la terrasse alluviale.

**La nappe des altérites :** Au cours de la foration, lorsque l'outil est entré dans les altérites meubles (allotérites) sous-jacentes à la terrasse alluviale, les altérites étaient sèches et pulvérulentes. Après quelques mètres forés, elles sont devenues de plus en plus humides jusqu'à ce qu'apparaissent des circulations d'eau avec de très faibles débits.

Ces venues d'eau confirment la présence d'une nappe phréatique, de très faibles débits, et valident le schéma conceptuel d'aquifères de socle de Wyns (1998). Si cet aquifère n'a pas une grande capacité productrice comme celui de la terrasse alluviale, il aura son importance dans la tenue et le fonctionnement mécanique de la falaise de la Mine d'Or (illustration 20).

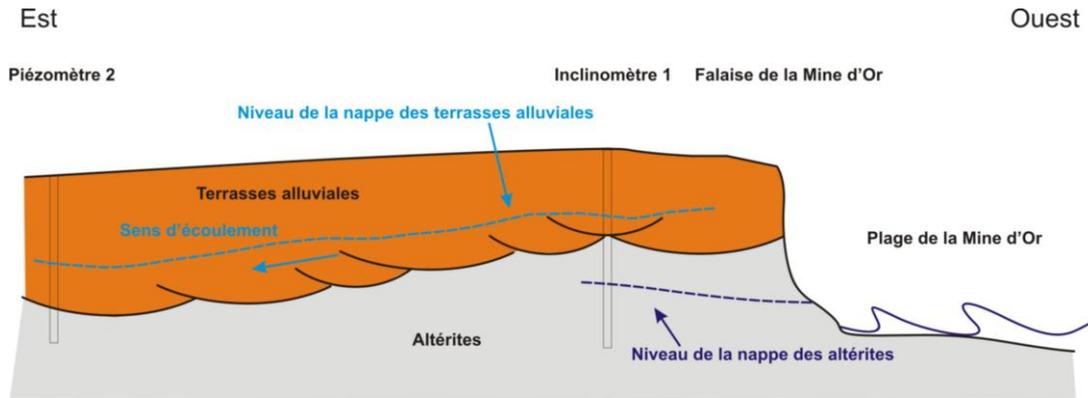


Illustration 20 – Coupe schématique Est-Ouest au niveau de la falaise (Inclinomètre 1), montrant la relation entre la géologie et l'hydrogéologie

#### 4.2.2. Le suivi de la nappe

Le suivi des nappes identifiées lors de la foration, a été réalisé sur une année et tous les deux mois.

Un agent BRGM, est passé faire les relevés de niveaux d'eau, à l'aide d'une sonde piézométrique, sur les six ouvrages réalisées et sur dix puits supplémentaires.

Dans l'évaluation de l'aléa retrait-gonflement, la présence d'une nappe et de son battement, peut être parmi l'un des facteurs déclenchant (Schroetter et al., 2010). L'évolution des niveaux d'eau est représentée sur l'illustration ci-dessous. La nappe de la terrasse alluviale est représentée en pointillé, et celle de la nappe des altérites en trait plein.

Le caractère maritime de la commune (l'influence des marées), semble être important sur le niveau des nappes phréatiques que ce soit sur celle de la terrasse alluvionnaire comme sur celle des altérites.

#### ***L'interprétation de l'évolution des nappes***

Les données relatives du suivi des nappes sur la commune de Pénestin, ne semblent pas être suffisantes pour que puissent être établie une interprétation univoque. Les pas de temps entre les relevés du BRGM, la variation du niveau de la mer et l'inertie du milieu souterrain en relation avec les pluies efficaces, ne permettent pas d'avoir une interprétation cohérente.

Lors du montage du projet, le BRGM avait évalué les coups trop onéreux pour l'équipement de piézomètres avec centrale d'acquisition automatique au regard des résultats qui pouvaient être attendus.

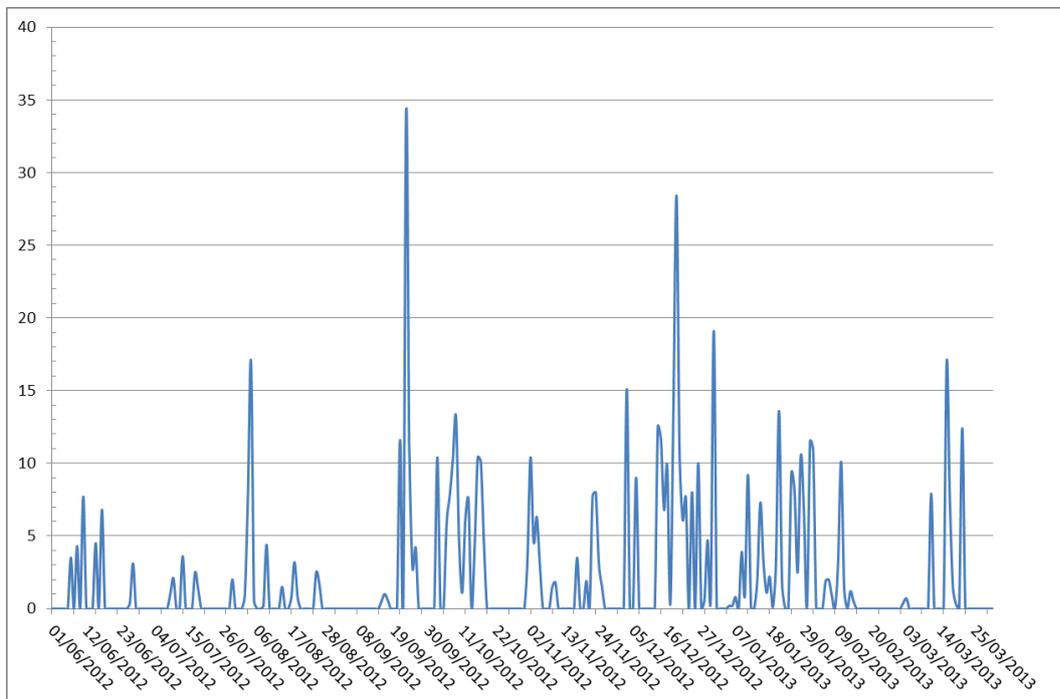
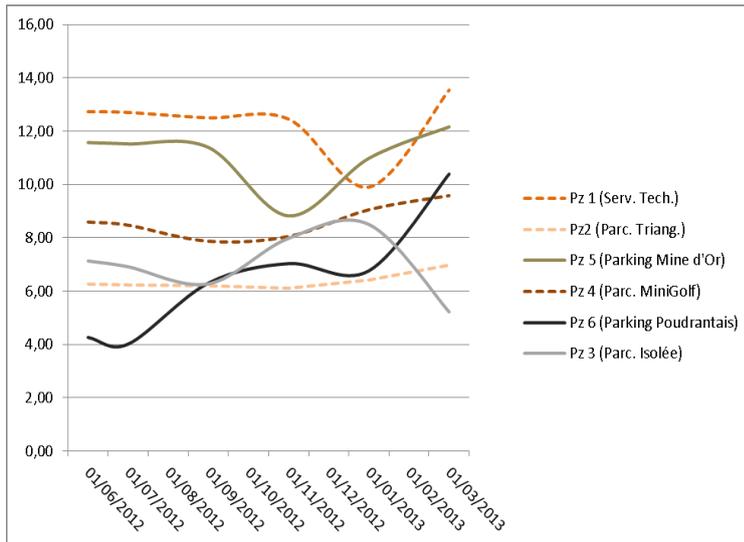


Illustration 21 – Evolution des niveaux des nappes phréatiques autour de la zone sinistrée (pointillé : nappe de la terrasse alluviale ; plein : nappe des altérites) et Relation avec les pluies efficaces (Station de Theix)

### 4.3. LES DONNEES GEOTECHNIQUES

Afin de valider la zone sinistrée et l'aléa, le BRGM avait proposé l'installation de jauges de type « saugnac » sur les habitations, ayant été recensées lors de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux du Morbihan et d'en faire le suivi à la même fréquence que les piézomètres et les inclinomètres.

Une dizaine de jauges ont été installées sur les vingt prévues, en raison de la difficulté à trouver une vingtaine d'habitations disponibles dans le secteur de l'étude, constitué essentiellement d'habitation secondaire.

Le budget restant a été investi dans la caractérisation géotechnique de la nouvelle formation argileuse identifiée lors de l'acquisition des données géologiques.

#### 4.3.1. Le Suivi des jauges de type « saugnac »

Les jauges de type « saugnac » posées, sont de type G1, blanches, en PVC extrudé et dont l'épaisseur de la platine est de 0,7 mm, l'épaisseur de la tirette est de 0,5 mm, et le coefficient de dilatation linéaire est de  $7.10^{-5}$ .

Ce sont des jauges standards qui résistent aux intempéries, avec une mesure qui se fait au moyen d'un vernier au 1/10ème de mm et la fixation est assurée par des auto-adhésives doubles faces et par deux trous percés de  $\varnothing$  4 mm.

Leur installation est peu onéreuse et permet à moindre coût de quantifier les déformations du bâti. Les jauges ont été installées sur des habitations qui avaient subi de fortes déformations et où les ouvertures des lèvres des lézardes avaient été de l'ordre de 2 à 3 cm.

Elles ont aussi été installées sur des habitations qui faisaient partie du recensement mais dont les réparations avaient déjà été réalisées.

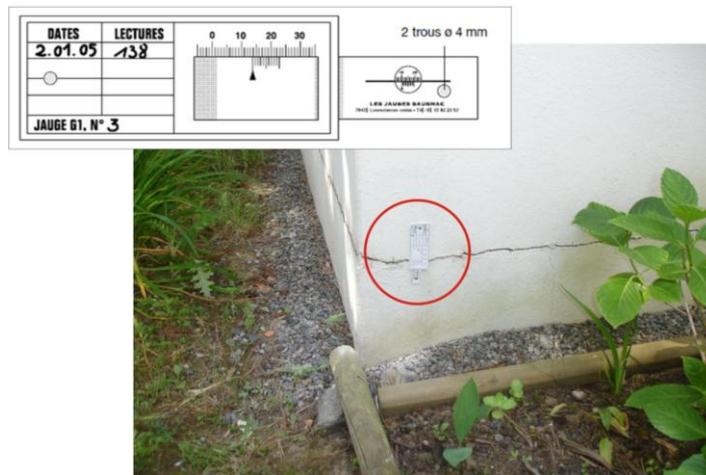


Illustration 22 – Exemple de jauge-saugnac type G1 installée

Les relevés des jauges ont été mis en confrontation avec la pluviométrie moyenne mensuelle. La pluviométrie provient de la station de La Tour-du-Lac pour la période 2012-2013.

L'installation des jauges a été réalisée au mois de juin 2012. Le mois de juin 2012, faisait suite à un mois d'avril très pluvieux sur le sud du Morbihan, avec 137,1 mm sur Vannes, 144,8 mm à la Tour-du-Parc ou encore 97,5 mm à Belle-Ile. La pluviométrie du mois de mai avait été nettement plus faible mais les mois de juillet et août n'avaient pas été des plus cléments avec respectivement : 90,9 et 73,9 mm à Vannes, 83,5 et 63,5 mm à la Tour-du-Parc et enfin, 59,8 et 59,7 mm à Belle-Ile.

Lors de la fixation, le vernier peut ne pas être à zéro et ainsi la mesure de référence peut être 1 mm, -1.5 mm etc.

Les courbes ci-dessous en pointillées sont celles des jauges équipant des lézardes des habitations non traitées alors que celles pleines sont celles équipant des lézardes des habitations sur lesquelles les propriétaires ont déjà fait de gros travaux de reprises d'œuvre.

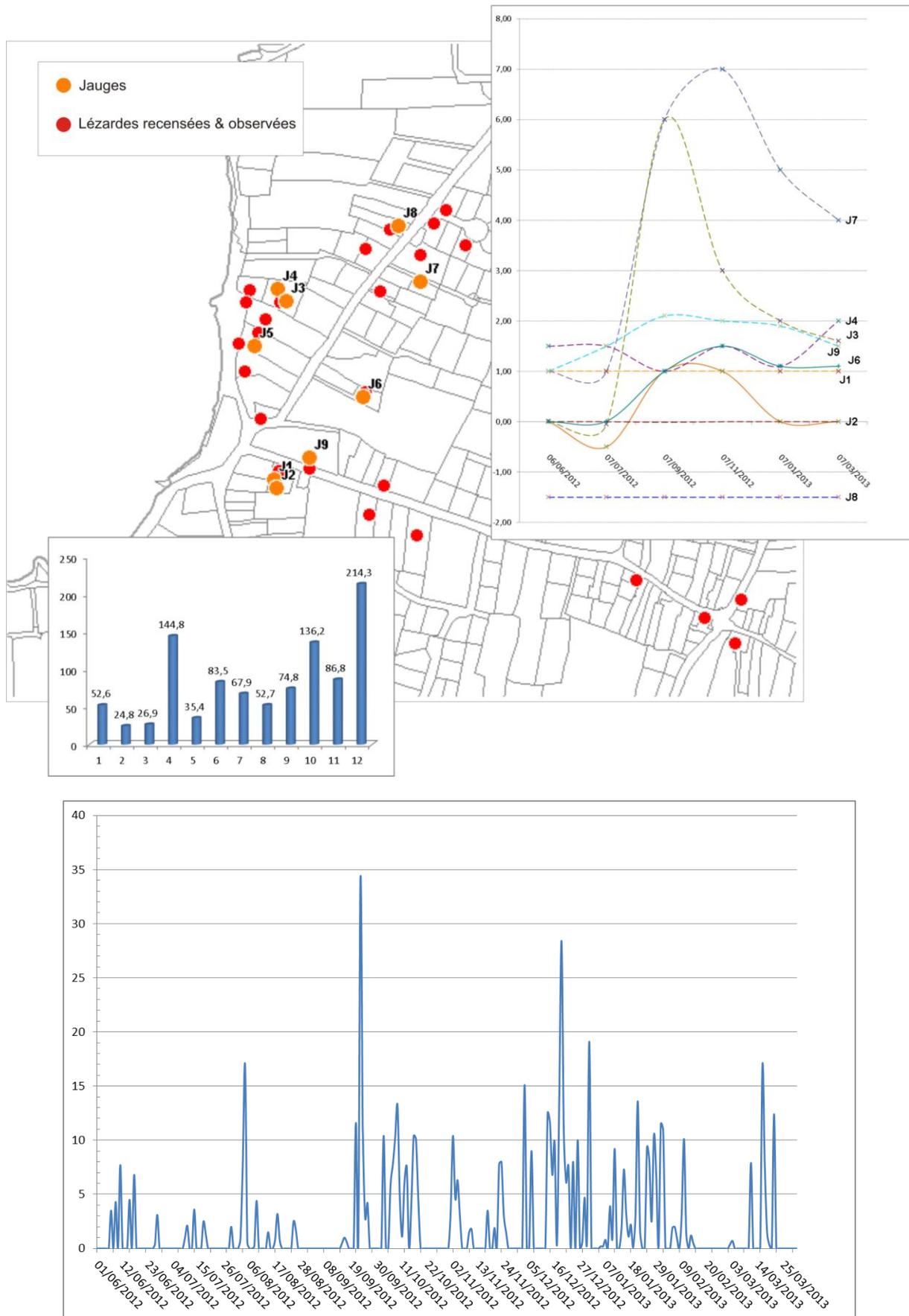


Illustration 23 – Localisation des jauges ; Evolution de l'écartements de lèvres des lézardes sur le secteur de Pénestin sinistré et les pluies efficaces (station de Theix) et la pluviométrie moyenne annuelle (Station de la Tour du Parc) en 2012/2013

Hormis la jauge 4, les jauges 2, 3, 6, 7 et 9 se sont ouvertes entre les mois de juillet et septembre 2012, et le mouvement s'est prolongé pour la jauge 7 jusqu'en novembre 2012. La jauge 4, s'est-elle, pour la même période de l'année, refermée puis réouverte et enfin refermée. Son comportement a été l'inverse des premières. Enfin les jauges 1, 5 et 8, n'ont pas enregistré de mouvements. Les jauges 1 et 5 ont été posées sur des habitations traitées alors que la jauge 8 non.

Même s'il existe quelques disparités de comportements dans les jauges posées, qui peuvent être dues : à des différences de constructions, la position de la fissure suivie et la présence d'autres fissures sur la construction, la présence d'un arbre pouvant accentuer le mouvement différentiel du sol ou encore une gestion des eaux superficielles différente d'une habitation à l'autre ; leurs ouvertures s'est produite en début de période estivale entre les mois de juillet à septembre 2012 (pendant la période la plus sèche même si l'été a été pluvieux) et leur fermeture en fin de période estivale, ce qui semble attester le phénomène d'aléa retrait et gonflement.

#### **4.3.2. Le suivi des inclinomètres**

Les inclinomètres installés au nombre de deux, avaient pour objectif principal, la surveillance pendant au moins une année et tous les deux mois, de la falaise de la Mine d'Or, afin de s'assurer qu'il n'y avait pas potentiellement de mouvement rotationnel de grande ampleur sur le secteur.

En effet, la structure géologique de la falaise composée à la base d'argiles et limons d'altération (allotérites) surmontés par les terrasses alluviales mio-quadernaires de la paléo-Loire et paléo-Vilaine, proposait une géométrie pouvant générer ce type de glissements.

Ainsi, le premier inclinomètre fut installé entre la falaise et les habitations du secteur de falaise où l'observation des plus importants reculs avait été faite (Miossec, 1991 ; Pian et al., 2011), c'est-à-dire au nord de la Mine d'Or alors que le second, l'inclinomètre 2 avait été installé entre le secteur très sinistré et la falaise.

Pour le second, il était apparu probable qu'il puisse exister un glissement lent vers le ruisseau de la Poudrantais plus qu'un mouvement vers la falaise. Hélas, la foration terminée de l'inclinomètre 2, dans les jours qui ont suivis (2 maximum), l'ouvrage a été irrémédiablement endommagé par un véhicule.

Le suivi n'a pu se faire que sur l'inclinomètre 1 au nord de la Mine d'Or.

#### ***Coupe technique de l'inclinomètre et principe de fonctionnement :***

L'inclinomètre 1 est un forage réalisé au Marteau Fond de Trou avec la méthode ODEX, ou dite du forage à l'avancement. Le marteau est équipé d'un taillant excentrique, c'est-à-dire, avec un ergot excentré qui tient le tube et le tubage, et qui sont descendus simultanément.

Pendant la phase de foration, le taillant excentré est ouvert et fore avec un diamètre supérieur au tubage, et supporte le tubage qui reste au-dessus du taillant. Lorsque le forage a atteint la profondeur d'un tube, le sens de rotation est inversé, l'ergot se rétracte, et le taillant excentré se referme au diamètre inférieur du tube.

Le marteau et le taillant sont remontés et un nouveau tubage est visé sur celui resté au fond du trou. Cette méthode permet d'éviter les éboulements, en maintenant les parois du forage.

Ainsi quand la profondeur voulue est atteinte, le train de tige est remonté et le tubage permet d'équiper le forage en toute sécurité.

L'équipement de l'inclinomètre est composé, dans un espace annulaire du forage de  $\varnothing$  140 mm de diamètre, d'un tube en aluminium de  $\varnothing$  90 mm de diamètre, et cimenté sur toute la hauteur du forage (18,5 m).

Tous les 3 m, à la jonction de chaque tube, une gaze grasse étanchéifiée le tube en aluminium de  $\varnothing$  90 mm de diamètre, qui a pour particularité, d'avoir des gouttières « *guide casing* », qui auront pour objectif de guider la sonde équipée de deux roulettes et qui sera descendu dans le tube lors de la prise de mesure (illustration 25).

Les gouttières de guide de la sonde sont au nombre de quatre, deux diamétralement opposés et deux perpendiculaires aux premières. Ainsi la prise de mesures peut se faire dans deux directions de l'espace dont l'une doit être faite dans la direction supposée du mouvement de terrain étudié. Ainsi à l'emplacement de l'inclinomètre 1 (illustration 20), la falaise a pour orientation moyenne (par rapport au nord) : N160 et les gouttières ont permis de faire les mesures suivant la voie A : N082 et la voie B : N 172.

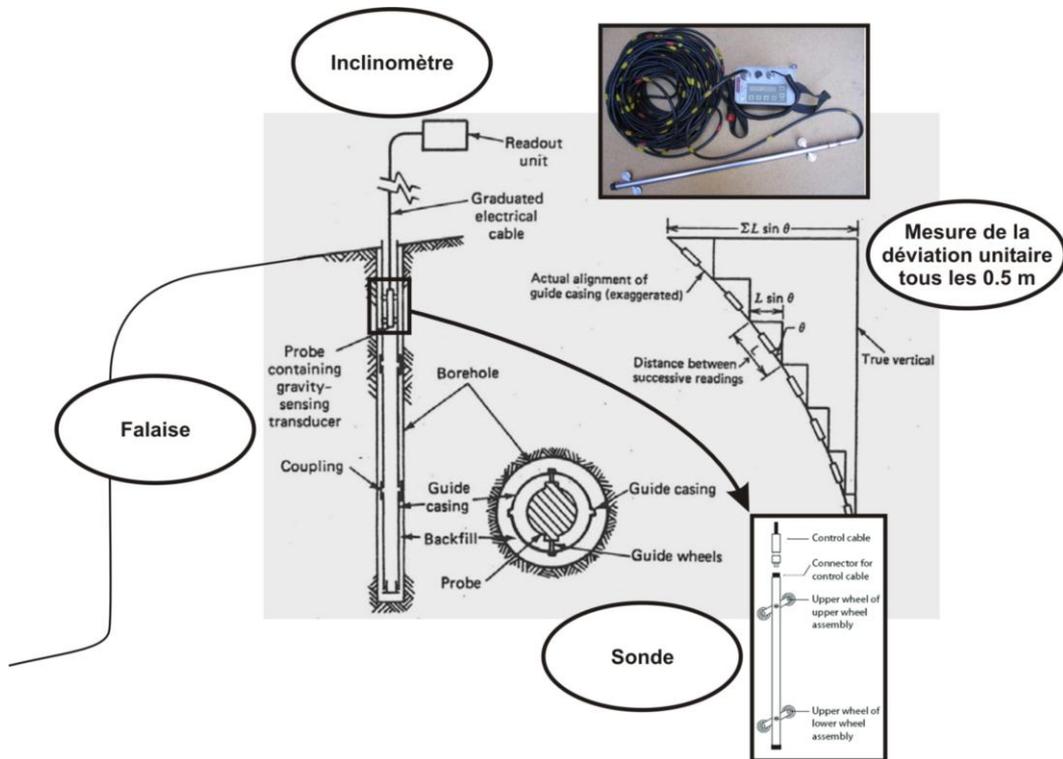


Illustration 24 : Schéma de principe de l'inclinomètre, la coupe technique est donnée en annexe (voir inclino 1 Nord)

La voie A (N082), perpendiculaire à la falaise, est la voie sur laquelle la déformation devrait s'exprimer au mieux. Le relevé de l'inclinomètre sur une année avec un pas de temps de 2 mois, est donné par l'illustration 26, qui représente la déviation entre chaque mesure et la mesure initiale. Lors de la réalisation de l'inclinomètre, l'interface entre la terrasse alluviale et les argiles/limons d'altération avait été notée à 7 m de profondeur, et la nappe avait été notée vers 11 m de profondeur. Les déformations étaient donc attendues à ces profondeurs.

Les résultats présentés sur l'illustration 26, montre qu'il existe de légères déformations le long du tube de l'inclinomètre. Ces déformations se situent à des profondeurs de 1.5, 3, 6.5 et 12.5 m. Pour les premières, les déviations sont de l'ordre du millimètre (+/- 1 mm) et pour la dernière, inférieure au mm. Les déviations observées à 6.5 m et 12.5 m de profondeur,

peuvent correspondre respectivement à des déformations qui se situeraient entre la terrasse alluviale et les altérites sous-jacentes, et au niveau du battement de la nappe phréatique des altérites. Cependant les déviations sont assez faibles.

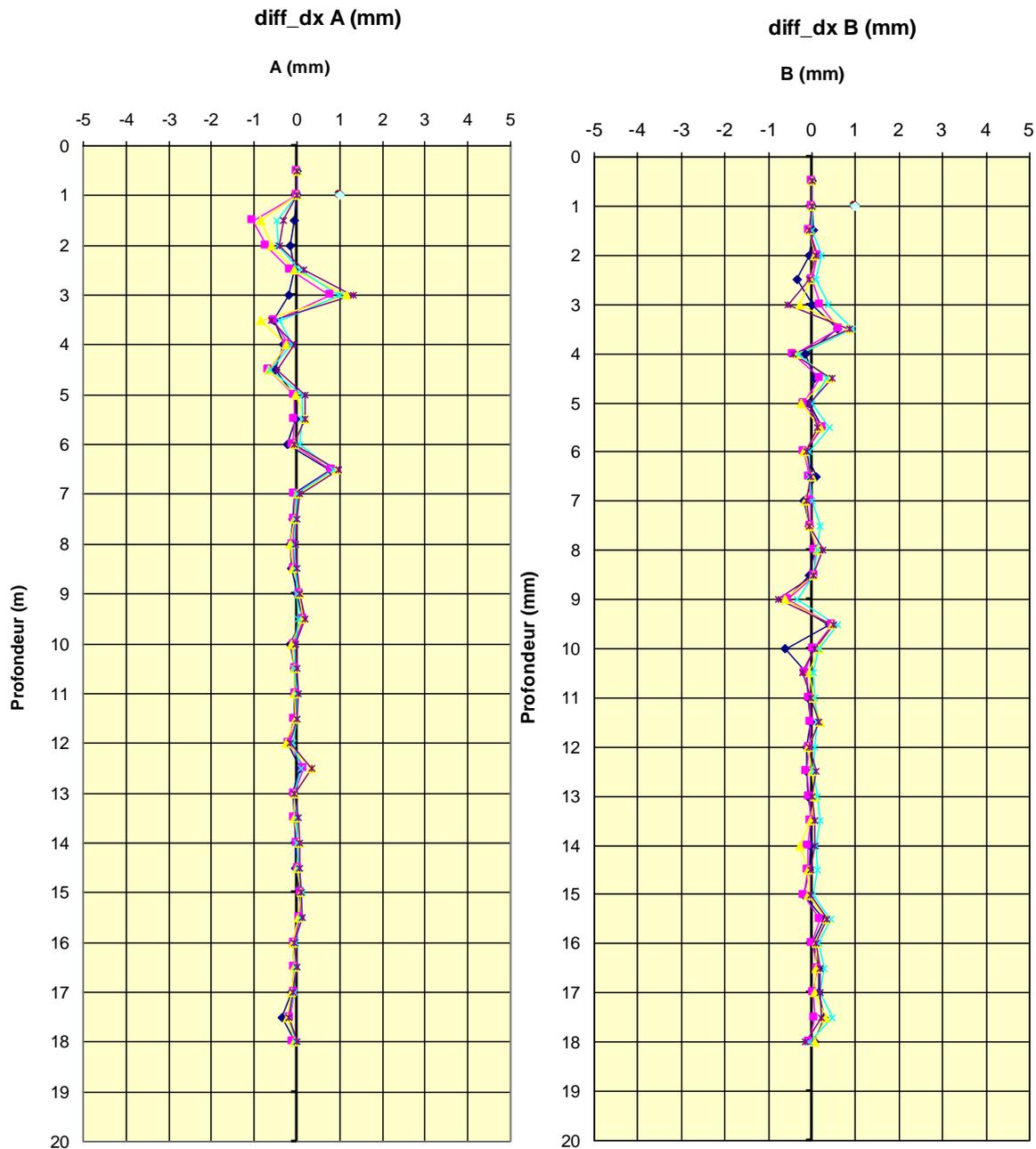


Illustration 25 : Suivi des déformations suivant les voies A et B de l'inclinomètre

Dans l'état des observations faites et mesurées, il ne semble pas y avoir, dans l'intervalle de temps sur laquelle la falaise au Nord de la Mine d'Or a été suivie, de mouvements de terrain de grande ampleur, de type rotationnel. Ces mesures confirment les observations de terrain, où le recul de la falaise à cet endroit semble se faire par à-coup, par chute de pan de falaise de 1 m à 1.5 m d'épaisseur, suivant des plans de glissements verticaux qui ne semblent pas avoir l'espace et le temps de s'enraciner sur un niveau de décollement général.

### 4.3.3. Les analyse de sols

Lors des forages, des échantillons ont été systématiquement prélevés dans le but de pouvoir faire des analyses de sols de type GTR afin de caractériser géotechniquement les formations argileuses encore inconnues.

L'identification en forage de la nouvelle formation argileuse composée des argiles plastiques et collantes, vert-kaki, du piézomètre 4 et de l'inclinomètre 2, est entrée parfaitement dans le cadre de cette démarche.

Trois analyses GTR ont été réalisées, composées :

- de trois valeurs au bleu de méthylène : VBs,
- trois teneurs en eau,
- et de trois indices de plasticité : Ip.

Ces analyses ont montré que cette formation géologique argileuse avait une valeur au bleu de méthylène comprise entre 6.68 et 9.9, soit une valeur moyenne de 7.89 et un indice de plasticité compris entre 17 et 27, soit une valeur moyenne de 20.

Conformément à la méthodologie nationale de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement, nous avons retenu la valeur moyenne de bleu de méthylène pour attribuer la note géotechnique de cette formation argileuse, mais la valeur de l'indice de plasticité aurait donné le même résultat.

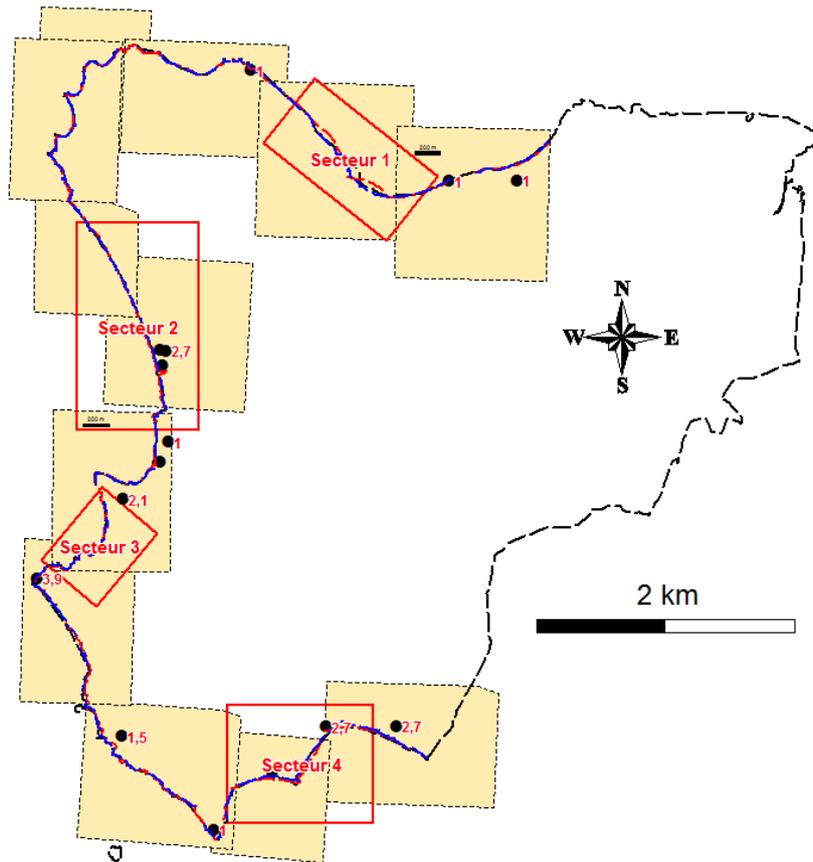
Pour des valeurs de bleu de méthylène, comprises entre 0 et 2.5, la note géotechnique de 1 (faible) était attribuée, entre 2.5 et 6, la note de 2 (moyenne), entre 6 et 8, la note de 3 (forte) et supérieur à 8, la note de 4 (très forte). Ainsi avec une valeur moyenne de 7.89, la note géotechnique de 3 (forte) peut être attribuée à cette formation argileuse sans perdre de vue la valeur maximale mesurée de 9.9.

## 4.4. L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET L'EROSION LITTORALE

Cette partie n'était pas prévue dans l'étude initiale mais à la demande de la DDTM 56 et de la commune, le BRGM a réalisé une estimation de l'évolution du trait de côte sur la période de 1962 à 2000.

La période de 1962 (Campagne CDP3916 du 21-09-1962) a été choisie car elle correspond à une campagne aéroportée, réalisée par l'IGN, dont les sources d'images sont en libre accès et dont les images étaient de très bonne qualité. 13 images ont été géoréférencées à partir de l'ortho-image littoral 2000 (IGN).

Sur l'ensemble du calage de ces treize images, l'erreur entre les deux sources d'images a été évaluée à l'aide de la prise de points homologues entre les deux sources quand il était possible de le faire. La différence d'urbanisation entre les images de 1962 et 2000, a été un obstacle qui n'a pas permis d'avoir une répartition homogène de points. Afin d'avoir une estimation de l'erreur sur l'ensemble de la digitalisation des deux traits de côte, une interpolation de cette erreur dans l'emprise des images a été réalisée. Les points homologues ont été pris à une échelle de 1/200 (illustration 26)



*Illustration 26 : Commune de Pénestin (56) – Trait histolitt V2 et Images de la campagne de 1962 de l'IGN géoréférencées ; Secteurs présentés ci-dessous en rouge et points homologues de l'erreur entre les deux campagnes d'images.*

Les repères géomorphologiques digitalisés ont été pour les côtes sableuses (cordons et autres etc.), les limites de végétation, et pour les côtes rocheuses, la crête de falaise souvent d'ailleurs, soulignée elle aussi par une limite de végétation.

La digitalisation s'est faite au 1/800 sur l'ensemble du linéaire maritime de la commune de Pénestin avec des ajustements au 1/400 lorsque les limites géomorphologiques n'étaient pas assez clairement affichées.

Compte tenu du linéaire important et très contrasté de la commune de Pénestin, nous ne présenterons que 4 secteurs jugés clés dans l'évolution du littoral de la commune.

Le secteur 1 est situé sur la façade nord de la commune qui correspond à l'estuaire de la Vilaine. L'illustration 27, ci-dessous montre l'évolution du trait de côte entre 1962 (en rouge) et 2000 (en bleu) sur ce secteur, dont le trait géomorphologique utilisé est la limite de végétation et dont le trait noir en pointillé correspond au trait de côte HistoLitt V2.0 de l'IGN et du SHOM (correspondant au niveau de mer pour un coefficient de marée de 120 avec une mer belle).

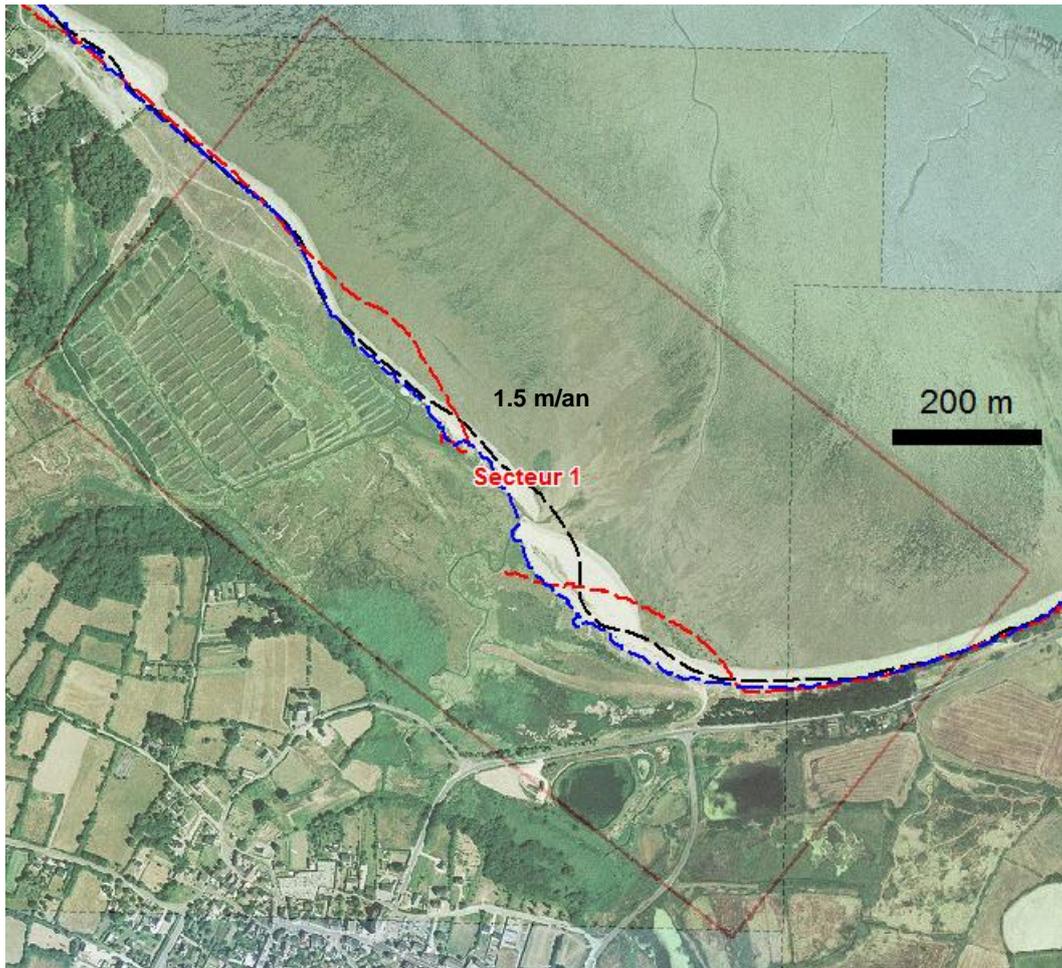


Illustration 27 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 1 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation)

On remarque sur ce secteur, un déplacement de sédiments sablo-graveleux, parallèle au trait de côte. Ce déplacement accumule dans des secteurs de faible énergie hydraulique, des matériaux sablo-graveleux, pour former des bancs. L'un d'entre eux est caractéristique (il est situé au Nord-Ouest de l'illustration 27) où sa dissymétrie souligne un transport vers l'Est (depuis la mer vers l'estuaire). Il en existe un autre exemple encore plus marqué créant une plage « convexe », que nous n'avons pas exposé ici car elle se situe sous le trait de côte HistoLitt donc sous le niveau marin.

La vitesse d'accumulation sédimentaire perpendiculairement à la côte est de 60 m +/- 1 en 40 ans environ soit de 1,5 m/an. En revanche, le transport de long du trait de côte (« longshore ») peut être en première estimation de 200 m en 40 m soit de 5 m/an.

Le secteur 2 correspond à la falaise meuble de la plage de la Mine d'Or (illustration 28). Sur le secteur Nord, l'érosion de la falaise se fait essentiellement par son sommet avec une forte érosion par ravinement, alors qu'à partir de la Source et jusqu'aux demoiselles environ vers le Sud, l'érosion se fait surtout en pieds de falaise.

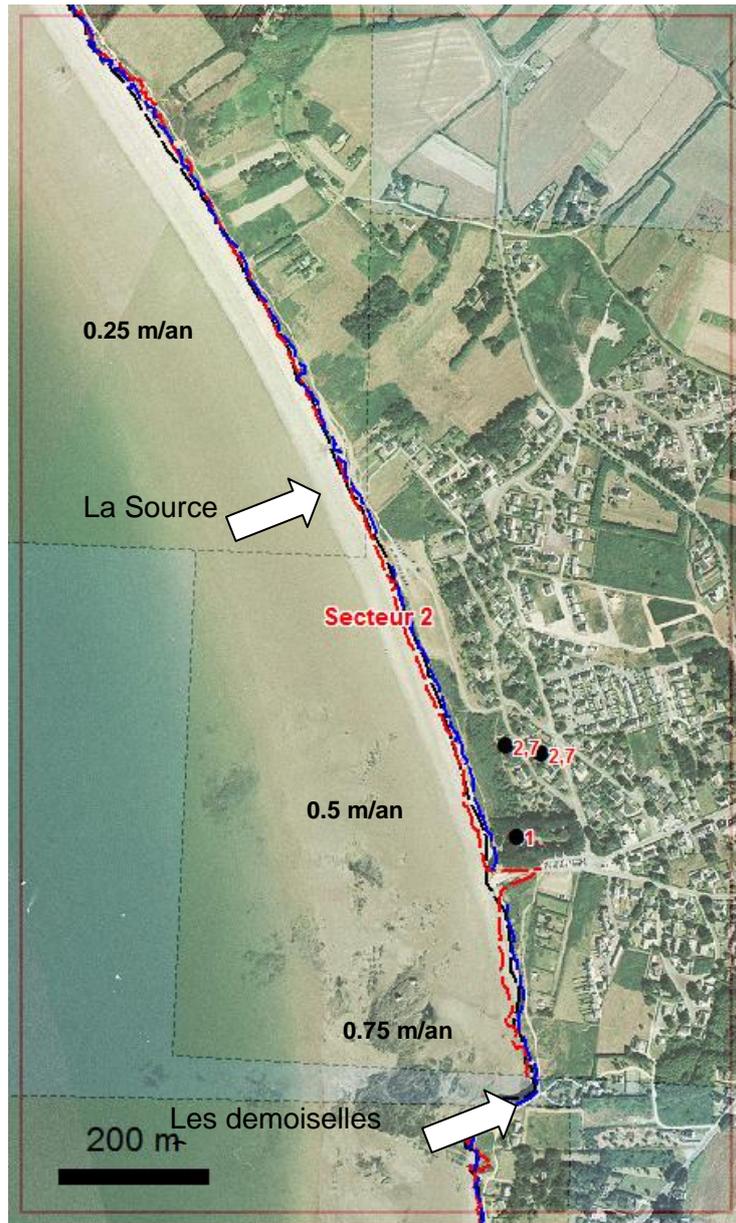


Illustration 28 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 2 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2.0 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation au nord jusqu'à la source et la ligne de crête au sud)

Ceci s'explique par le fait que la terrasse alluviale est plus épaisse au Nord qu'au Sud. Ainsi, sur la partie nord, la falaise est composée sur toute sa hauteur de la terrasse alluviale alors que sur la partie sud, la falaise est composée de 50 % d'argiles et limons d'altération et de 50 % de terrasse alluviale.

La géométrie 1 de la falaise au nord, entraîne une stabilisation de la falaise, en adoptant une pente à 45° sur laquelle s'installe la végétation continentale alors que la géométrie 2 de la falaise au sud de la Source, reste en permanence instable par le fait que la mer déblaie à chaque niveau marin haut le pied de falaise.

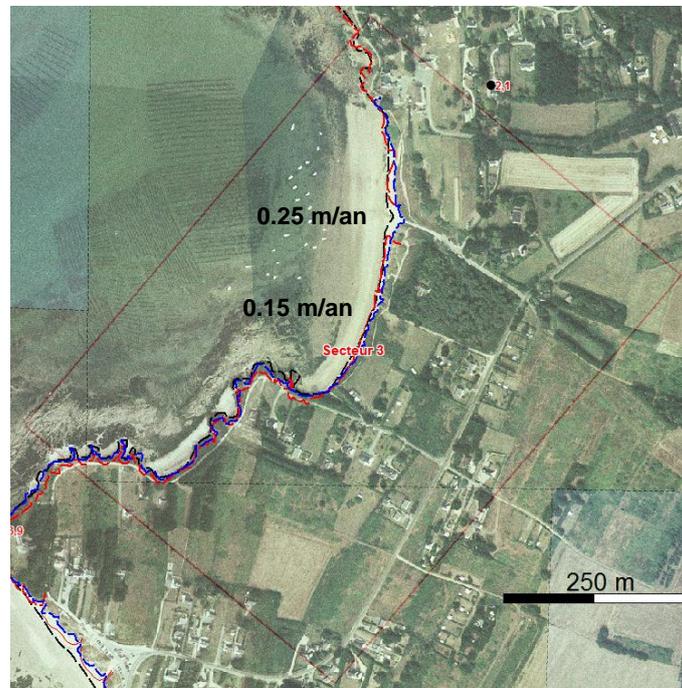
Sur la partie nord, le recul a été mesuré à environ 9 à 10 m +/- 2.7 m en moyenne ce qui fait une vitesse annuelle de 0.25 m/an.

En revanche sur la partie sud, le recul mesuré est compris entre 20 m +/- 2.7 au nord de la descente de la Mine d'Or et 25/30 m +/- 2.7 m au sud jusqu'aux demoiselles. Ainsi la vitesse de recul est décroissante du nord au sud, avec des vitesses moyennes annuelles de 0.5 m /an au nord de la Mine d'Or et 0.75 m/an au sud de celle-ci.

Le trait de côte HistoLitt V2.0, par rapport à la falaise de la Mine d'Or, se positionne sur le sommet de la plage à 1 ou 2 m du pied de falaise.

Au niveau des demoiselles, l'érosion change de modalité. Elle se fait le long de plans de fractures / failles orientés N120 et sub-verticales. Sur une des échancrures, le recul a atteint les 24 m et les enrochements installés pour diminuer l'aléa à cet endroit, semblent avoir été efficaces. Il est cependant important que ceux-ci ne soit pas installés sur des côtes meubles car ils ont un effet inverse sur le trait de côte, en augmentant l'aléa de parts et d'autres de leur situation, en créant un point de résistance mécanique sur un secteur meuble.

Le secteur 3 correspond à la plage de Marescle (illustration 29). L'estran est sableux et passe à une plage composée d'un cordon dunaire qui abrite une petite zone basse. La limite géomorphologique utilisée pour la cinématique a été la limite de végétation.



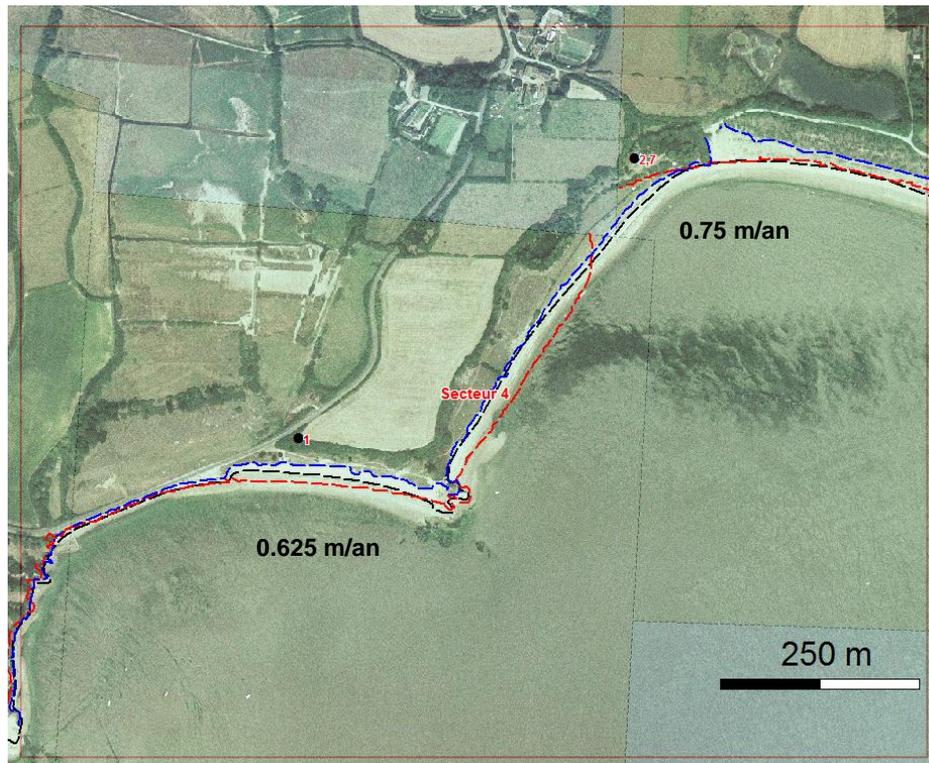
*Illustration 29 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 3 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2.0 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation)*

Le recul du trait de côte est réparti de façon homogène sur l'anse de la plage avec un recul maximum au centre de 10 m environ +/- 2.1 et de 6 m +/- 2.1 sur les bords. La vitesse de recul est donc ici de 0.25 m/an au centre et de 0.15 m/an sur les bords.

Entre les secteurs 2 et 3, mais aussi entre les secteurs 3 et 4 (de Loscolo à la pointe du Bile), l'évaluation de la cinématique du trait de côte reste assez délicate. Les processus d'érosion se superposant parfois entre érosion de tête de falaise et celle le long de plan de faille ou de fracture, empêchent de détacher une évolution claire et il faudrait une étude plus spécifique sur cette thématique.

Enfin, le secteur 4 (illustration 30), montre un bel exemple d'érosion différentielle créé par un ouvrage de protection. Au fond de l'anse du Palandrin, la route longeant le littoral, a été protégée de l'érosion littorale par un enrochement. Alors que la morphologie de la plage en fond baie avait une morphologie à l'équilibre (trait rouge en pointillé à l'Est de l'illustration 30), c'est-à-dire une belle allure concave avec semble-t-il une répartition homogène des sédiments, l'enrochement est venu créer de l'érosion différentielle et un recul de 25 m environ +/- 1. Ainsi ce secteur de la commune de Pénestin, présente un recul des plus importants avec celui de la falaise de la Mine d'Or.

Les vitesses annuelles oscillent entre 0.62 m/an et 0.75 m/an. Cependant le massif dunaire est, soit adossé, soit surmonte une falaise rocheuse, ce qui aura pour effet de limiter l'érosion jusqu'à la falaise rocheuse.



*Illustration 30 : Evolution du trait de côte sur la commune de Pénestin entre 1962 et 2000 : secteur 4 (Trait noir pointillé, trait HistoLittV2.0 (voir texte ci-dessus) ; rouge pointillé, trait 1962 et bleu pointillé, trait 2000, limite géomorphologique : limite de végétation)*



## 5. Interprétations et conclusions

### *L'aléa retrait-gonflement sur la commune de Pénestin*

Comme mentionné au paragraphe 4.1.3, la nouvelle cartographie géologique permet d'extraire une nouvelle carte des argiles sur la commune de Pénestin. Les analyses aux rayons X sur la nouvelle formation argileuse (ou marneuse) complétées des analyses géotechniques, permettent de re-caractériser l'aléa retrait-gonflement. Pour les autres formations géologiques argileuses, ce sont les notes attribuées de la cartographie départementale qui ont été attribuées.

Le sous-sol de la commune de Pénestin, est donc composé des quatre formations argileuses principales qui suivent :

- Formation 1 : les « Tangles palustres et marécages, composées de sables, limons et argiles grises à bleues », d'âge Holocène. Cette formation argileuse compose les marais plus ou moins en eau, de la commune,
- Formation 2 : les « Dépôts de pente : colluvions composés de limons +/- argileux orangés à cailloutis et galets », d'âge Holocène. Cette formation argileuse recouvre les versants des pentes et vient se raccorder à la première formation.
- Formation 3 : les fameux « Argiles et limons argileux vert-kaki, très collants », dont l'âge pourrait être Miocène (?) et qui sont essentiellement situés dans le quartier du Landrin - la Poudrantaïs.
- Enfin, Formation 4 : les « Altérites au sens large, isaltérites et allotérites, composées d'argiles et limons d'altération, kaoliniques et versicolores (blanches, rouges à grises) », d'âge Eocène inf. (?) à anté Eocène inf.

Les notes lithologique, géotechnique et minéralogique permettent de leur attribuer à chacune un niveau d'aléa, moyenne arithmétique des trois (illustration 31), selon la méthodologie nationale (Schroetter et al., 2010).

Formation	NOTATION	DESCRIPTION (Lithologie)	Note Litho.	Note Geotch.	Note Minéralo.	Note Aléa	Aléa R-G
1	TLMz	Tangles palustres et marécages, composés de sables, limons et argiles grises à bleues - Holocène	4	2	3	2	moyen
2	Cz	Dépôts de pente : colluvions, composés de limons argileux orangés à cailloutis et galets - Holocène	2	1	1	1	faible
3	m3a ?	Argiles et limons vert-kaki, très collants - Identifiées dans cette étude - Âge Miocène sup. - Messinien ?	4	3	4	3	fort
4	Ze	Argiles versicolores d'altération (banches, rouges à grises) - Allotérites - Âge Eocène inf. ?	4	1	1	1	faible
		Altérites (Isaltérites et allotérites) potentiellement limons à argiles d'altération (banches, rouges à grises) - Âge Eocène inf. ?	2	-	1	1	faible

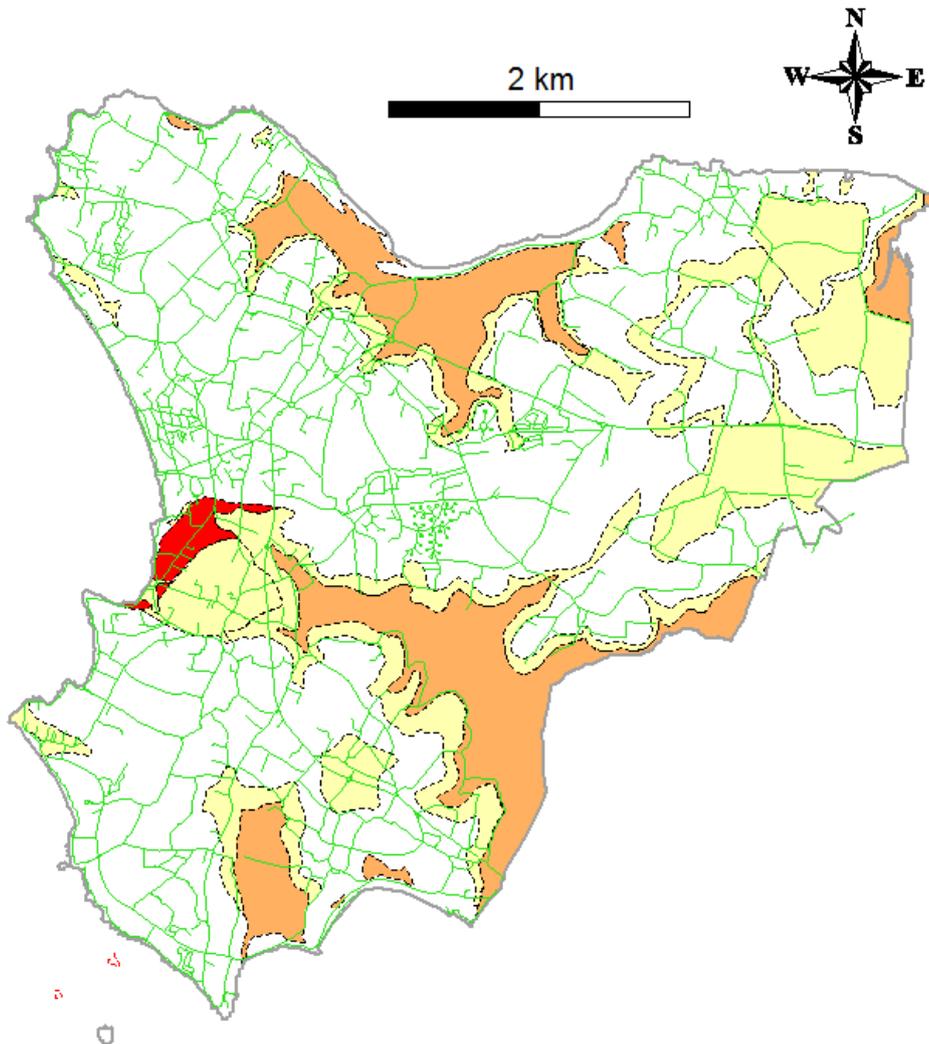
*Illustration 31 – Tableau synthétique des notes lithologique, géotechnique et minéralogique et du niveau d'aléa des formations géologiques argileuses de la commune de Pénestin (56)*

La formation argileuse nouvelle : Formation 3, est la formation avec le plus fort degré d'aléa retrait-gonflement (Fort).

La cartographie de ce même aléa sur le département du Morbihan, avait abouti à une note équivalente pour la Formation 14 (Schroetter et al., 2010): Faciès argileux ou marno-silteux, fossilifères, stratifiés du Pliocène (pA), de Saint-Jean-la-Poterie et pour la Formation 15 de Bétahon. Ces deux formations argileuses avaient elles-aussi présentées un pourcentage élevé de minéraux très gonflants avec 80 à 87 % de smectites.

Pour notre formation 3, située à la base des terrasses alluviales, un âge de 5.2 millions d'années (Miocène sup. : Messinien), a été trouvé (van Vliet et al., 2009). Les argiles de Bétahon sont azoïques (sans fossiles) donc sans âge arrêté alors que la formation de Saint-Jean-la-Poterie, la palynologie et l'étude des paléotempératures ont permis de caler le gisement dans le Pliocène, (à la limite Reuverien – Prétiglien : 2,8 million d'années). Quoiqu'il en soit, le fait que ces argiles semblent avoir les mêmes caractéristiques lithologique, géotechnique et minéralogique, peut prouver qu'elles appartiennent à une même période de sédimentation régionale, ce qui expliquerait ce niveau d'aléa identique entre les 3.

La nouvelle cartographie de l'aléa retrait-gonflement, réduit énormément la superficie de l'aléa moyen de la commune (illustrations 5 et 32), qui est localisé dans les secteurs bas (non constructibles ou généralement inondables) mais en revanche, fait apparaître un secteur en aléa fort dans lequel se localise la quasi-totalité des sinistres de la commune.



*Illustration 32 – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles sur la commune de Pénestin (jaune : faible ; orange : moyen et rouge : fort)*

Compte tenu de la présence de cette formation très sensible au phénomène et de la cinétique des fissures, les sinistres observés peuvent bien être attribués au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.

### **Les mouvements sur la falaise de la Mine d'Or**

L'enregistrement sur l'inclinomètre 1 des mouvements de terrain sur la falaise de la Mine d'Or, montre, au moins sur une année, qu'à l'heure actuelle, il n'y a pas de mouvements avec un recul plus important que 1.5 à 2 m tels que ceux observés sur la falaise.



*Illustration 33 – Falaise de la Mine d'Or proche de la Source : les plans verticaux (flèche blanche) correspondent aux plans de glissement des mouvement de terrain*

Cependant les mouvements de terrain n'ont pas les mêmes typologies sur l'ensemble du littoral de la commune.

- (1) Ainsi au niveau de la falaise de la Mine d'Or depuis « les demoiselles » et jusqu'à « la Source », la superposition des argiles d'altération kaoliniques sous-jacentes à une terrasse alluviale grossière (composée de conglomérats, sables grossiers à fins et limons argileux rouges orangés), génère des glissements de terrain (illustration 33), de 1 à 2 m de recul et de largeurs variables pouvant aller de 5 à 25 m. Une telle géométrie de la falaise (meuble en pied et résistante en tête) et l'existence de deux aquifères superposés (l'un dans les terrasses alluviales et un second dans les altérites), est déstabilisée par l'existence du second aquifère des altérites qui en charge, liquéfie les argiles d'altération.

Ces matériaux fins sont par la suite déblayés par la mer, entraînant un glissement vertical d'un pan de la partie supérieure de la falaise. Au niveau des diapirs d'argiles

d'altération, peut apparaître du ravinement et l'érosion se fait alors par le haut de la falaise (illustration 34).



*Illustration 34 – Diapirs d'argiles d'altération remontant dans la terrasse alluviale et ravinement en tête de falaise (Le Mine d'Or, Pénestin)*

- (2) En revanche, depuis « la Source » et vers le nord, jusqu'à ce que la côte redevienne rocheuse, on observe presque uniquement du ravinement du haut de la falaise composée par les terrasses alluviales. Les matériaux plus grossiers créent une pente de 45° environ sur laquelle s'installe de la végétation. La falaise est alors plus stable et moins livrée à l'érosion littorale.



*Illustration 35 – Falaise depuis la Source et regard vers le nord : Après l'enrochement, développement de végétation sur les pentes générés par l'érosion.*

- (3) Enfin au niveau des falaises rocheuses, les mouvements de terrain sont contrôlés par les directions des failles et fractures de la roche.

Au niveau de Landrin et en allant vers le sud, la direction N120, est l'une des directions préférentielles. D'autres directions ont été observées sur le terrain et elles

ont été tracées à partir de l'OrthoLittorale 2000 (illustration 18). On trouve les directions NS à N020/N030 et des directions N050.

### ***L'aléa érosion littorale sur la commune de Pénestin***

La cinématique du trait de côte sur la commune de Pénestin, réalisée entre la période de 1962 (Campagne IGN CDP3916 du 21-09-1962), et l'ortho-image littoral 2000 (IGN), à partir de repères géomorphologiques pour les côtes sableuses telle que la limite de végétation et pour les côtes rocheuses telle que la crête de falaise, concorde avec les observations de terrain cités ci-dessus.

Ainsi les vitesses de recul calculées pour cette période d'une quarantaine d'années, montrent quelles sont les plus importantes au niveau de la falaise de Mine d'Or avec un recul moyen annuel de 0.75 m/an. Ce recul le plus important correspond donc à une falaise meuble en pied surmontée d'une terrasse alluviale plus résistante en tête, de 18 m environ de hauteur ; ce recul de la falaise se fait par à-coup.

Lorsque la terrasse est plus importante en épaisseur, et qu'elle constitue presque toute la hauteur de falaise, la vitesse de recul diminue, pour avoir une vitesse moyenne de de 0.25 m/an. On observe sur cette partie de la falaise, une pente de 45° sur laquelle s'installe la végétation continentale. L'érosion s'individualise alors plus en tête qu'en pied.

Au niveau des falaises rocheuses, l'érosion change encore de modalité, elle se fait le long de plans de fractures / failles orientés : N020/N030, N050 et N120 et sub-verticales.

Sur les anses dont le fond est caractérisé par un cordon dunaire, le recul du trait de côte est assez homogène avec une vitesse de 0.25 m/an à 0.15 m/an.

Enfin deux secteurs se détachent, des zones d'accumulation dont la vitesse perpendiculairement à la côte est de 1,5 m/an : les côtes nord de la commune dans l'estuaire de la Vilaine et un secteur au sud où l'érosion a des vitesses annuelles similaires à celle de la falaise de la Mine d'Or (entre 0.62 m/an et 0.75 m/an), mais où l'érosion est la conséquence d'un ouvrage de protection.



## 6. Bibliographie

**Audren C., Jégouzo P., Barbaroux L., Bouysse P.**, 1975, Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille La RocheBernard (449), Orléans : BRGM, Notice explicative avec C. Audren, P. Jégouzo, L. Barbaroux, Ph. Bouysse, J. Barruol, 38 p.

**Brault N., Guillocheau F., Proust, J.N., Nalpas T., Bun J.P., Bonnet, S., Bourquin S.** 2001, Le système fluvio-estuarien pléistocène moyen-supérieur de Penestin (Morbihan) : une paléo-Loire ? Bulletin de la Société géologique de France t. 172, n° 5, pp. 563-572.

**Cagnard, F., Brun, J.P., Gapais, D., 2004**, Compressive deformations of hot analogue lithospheres and possible applications to Precambrian tectonics. *Boll. Geoph. Theor. Appli.* 4, 66-69

**Goubert E., Menier D.**, 2005, avec la collaboration de Quété Y., Alix A-S., Manceau S., Evolution morphosédimentologique de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 2003 : valorisation des campagnes bathymétriques, 104 p.

**Guillocheau F., N. Brault, E. Thomas, J. Barbarand, S. Bonnet, S. Bourquin, J. Estéoule-Choux, P. Guennoc, D. Menier, D. Néraudeau, J.-N. Proust, R. Wyns** (2003). Histoire géologique du Massif Armoricaïn depuis 140 Ma (Crétacé-Actuel). *Association des Géologues du Bassin de Paris*, 40, 1, 13-28.

**Menier D., C. Traini, J.-N. Proust** (2009). L'estuaire de la Vilaine. Dynamique actuelle et sédimentation récente de l'estuaire & les vallées incisées et leur remplissage pléistocène. 12ème congrès Français de sédimentologie, Rennes 2009, livret d'excursion, L'estuaire de la Vilaine, Publ ASF, n°66, 44p.

**Miossec A.**, (1987), Conséquences de la pression touristique sur l'espace physique littoral, *Norwis, Poitiers*, t. 34, n° 133-135, p. 153-163.

**Pian S., Regnaud H., Daire M.-Y, Proust J.-N., Shi B., Menier D., Lopez-Romero E.**, (2011), Integration of Heritage Loss into Vulnerability Assessments of South Brittany Coastline (France) : Implications for Coastal Vulnerability Analyses, *EspacesTemps.net*, 17 p.

**Probert E.**, (2000), Dynamique et gestion du littoral à Pénestin, les plages de la Mine d'Or et du Maresclé, Mémoire de Maîtrise, Université de Nantes, 155 pages.

**Schroetter, J.-M.**, Le Roy, S., Plat, E., Launay, E., Ollivaud, N. (2010), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles du département du Morbihan, BRGM/RP-58041-FR, 160p., 71 ill., 4 ann., 3 Cartes h.t.

**Van Vliet-Lanoë B., Bonnet S., Hallegouët B., Laurent M.**, (1997), Neotectonic and seismic activity in the Armorican and Cornubian Massifs: regional stress field with

glacio-isostatic influence ?, J. Geodynamics Vol.24, Nos 1-4, pp. 219-239, Elsevier Science Ltd.

**Van Vliet-Lanoe B., Hibsich C., Csontos L., Jegouzo S., Hallégouët B., Laurent M., Maygari A., Mercier D., Voinchet P.**(2009), Seismically induced shale diapirism: the Mine d'Or section, Vilaine estuary, Southern Brittany, Int J Earth Sci (Geol Rundsch)

**Wyns R.**, (1998) PRD324. Hydrogéologie des aquifères discontinus. Ressources en eau Margeride Ouest. Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif central), rapport BRGM R40191, Orléans, France, 18 p., 9 figures, 4 planches

## **Annexe 1 : Coupes lithologiques et techniques des forages réalisés au cours de l'étude**

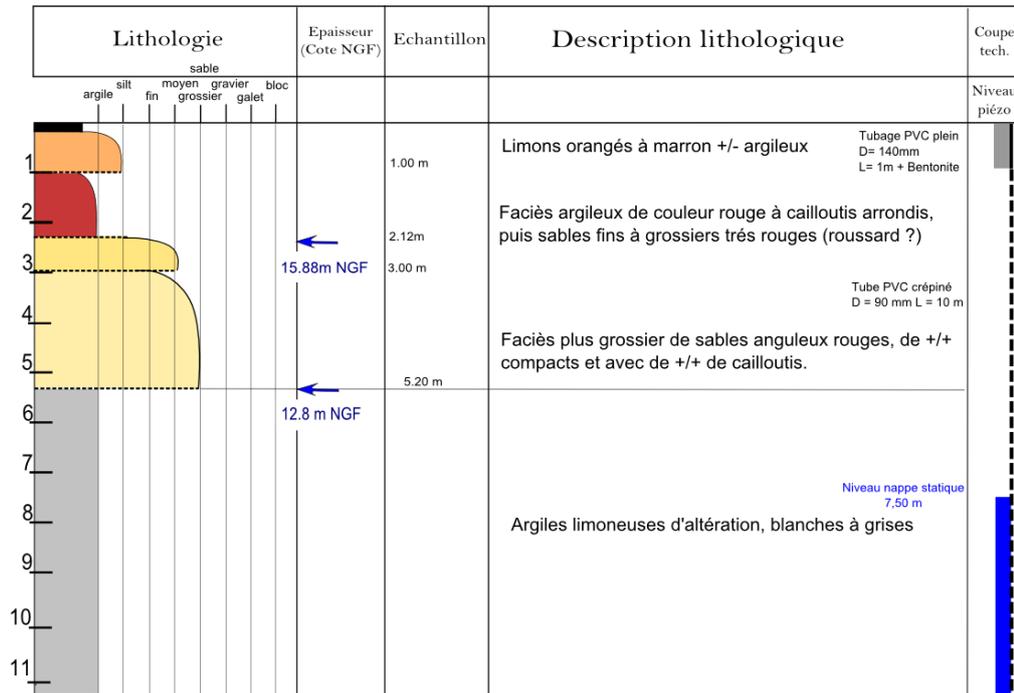


Colonne lithostratigraphique du **Piézomètre 1**  
Pénestin, 56



Date: 17/04/2012  
Alt: 18m  
Profondeur: 11m  
← : Arrivée d'eau

Coupe technique. Forage à l'ODEX  
 ■ : Bouchon de Bentonite  
 ■ : Massif filtrant de sable grossiers  
 ■ : Niveau piézométrique



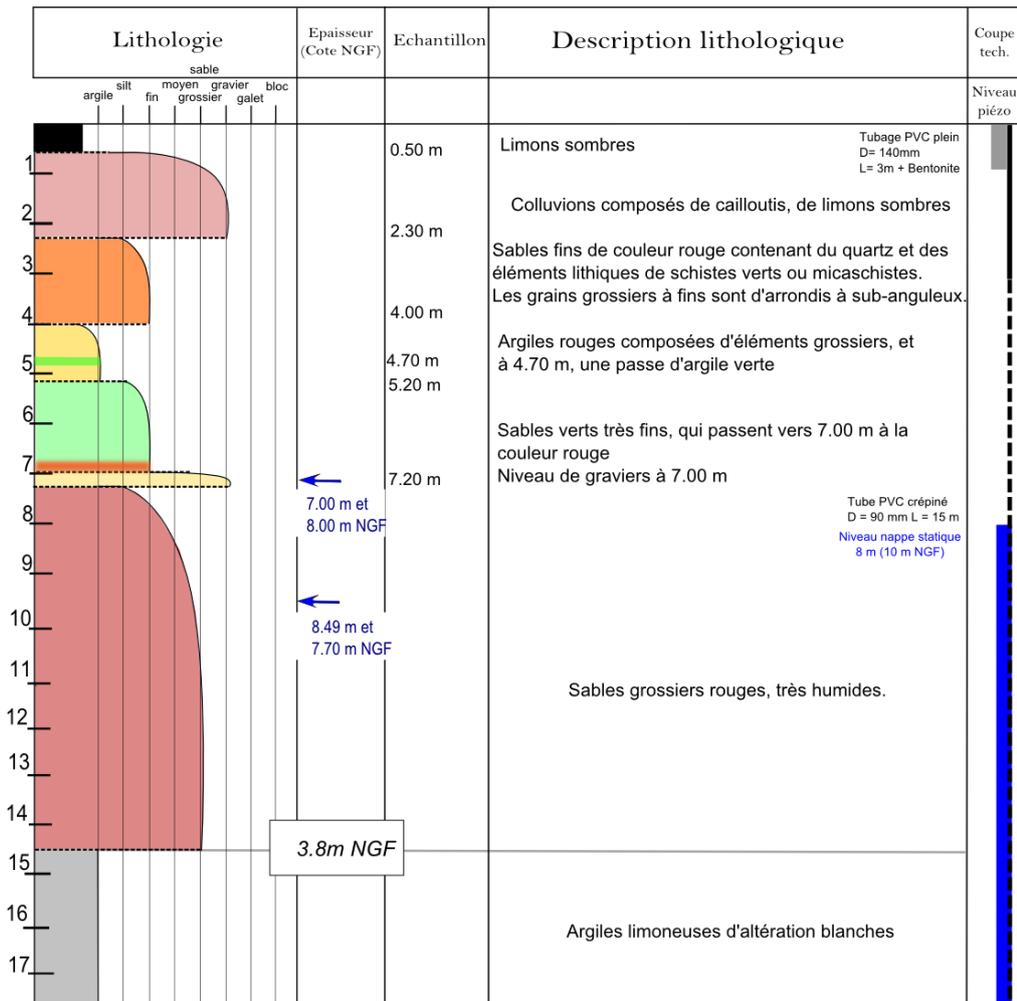
## Colonne lithostratigraphique du Piézomètre 2 Pénestin, 56



Date: 17/04/2012  
Alt: 15m  
Profondeur: 18m

Coupe technique. Forage à l'ODEX

- : Bouchon de Bentonite
- : Massif filtrant de sable grossiers
- : Niveau piézométrique





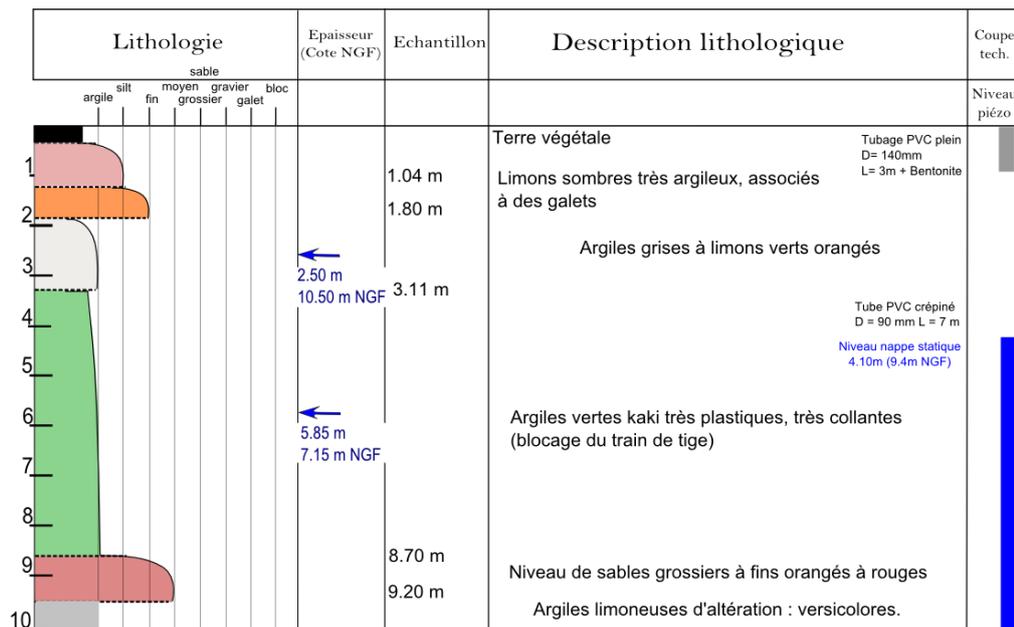
Colonne lithostratigraphique du **Piézomètre 4**  
Pénestin, 56



Date: 18/04/2012  
Alt: 13.5m  
Profondeur: 10m

Coupe technique. Forage à l'ODEX

- : Bouchon de Bentonite
- : Massif filtrant de sable grossiers
- : Niveau piézométrique

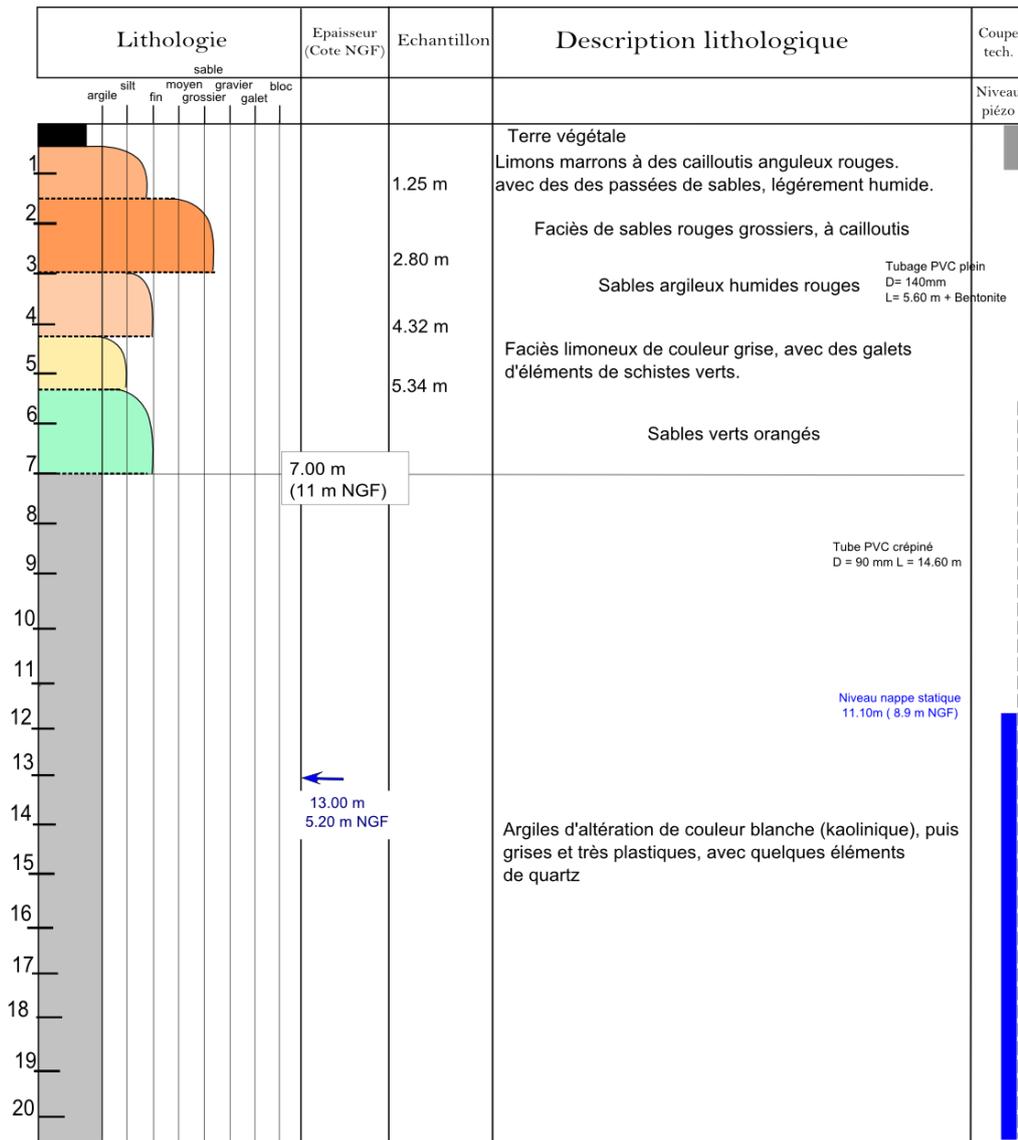


Colonne lithostratigraphique du **Piézomètre 5**  
Pénestin, 56



Date: 18/04/2012  
Alt: 18m  
Profondeur: 20m

Coupe technique. Forage à l'ODEX  
 ■ : Bouchon de Bentonite  
 ■ : Massif filtrant de sable grossiers  
 ■ : Niveau piézométrique



Colonne lithostratigraphique du **Piézomètre 6**  
Pénestin, 56



Date: 18/04/2012  
Alt: 13m  
Profondeur: 13m

Coupe technique. Forage à l'ODEX

- : Bouchon de Bentonite
- : Massif filtrant de sable grossiers
- : Niveau piézométrique

Lithologie	Epaisseur (Cote NGF)	Echantillon	Description lithologique	Coupe tech.
				Niveau piézo
<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> <span>argile</span> <span>silt fin</span> <span>sable moyen grossier</span> <span>gravier galet</span> <span>bloc</span> </div>				
1	0.74 m		Terre végétale Limons orangés d'altération très argileux. <div style="text-align: right; font-size: x-small;">                         Tubage PVC plein                          D= 140mm                          L= 3.00 m + Bentonite                     </div>	
2	1.44 m		Allotérites de couleur marron avec de nombreuses paillettes micacées.	
3	3.84 m		Niveau nappe statique 3.20m ( 9.8 m NGF)	
4	← 9.1m en NGF		Allotérites très oxydées (battement de la nappe ?)	
5				
6			Tube PVC crépiné D = 90 mm L = 10.00 m	
7	← 6m en NGF			
8			Isaltérites meubles de couleur orangée et composées d'éléments schisteux altérés de couleur gris-marron	
9				
10	9.78 m			
11			Isaltérites : éléments de schistes sombres (zone fissurée ?)	
12				
13				

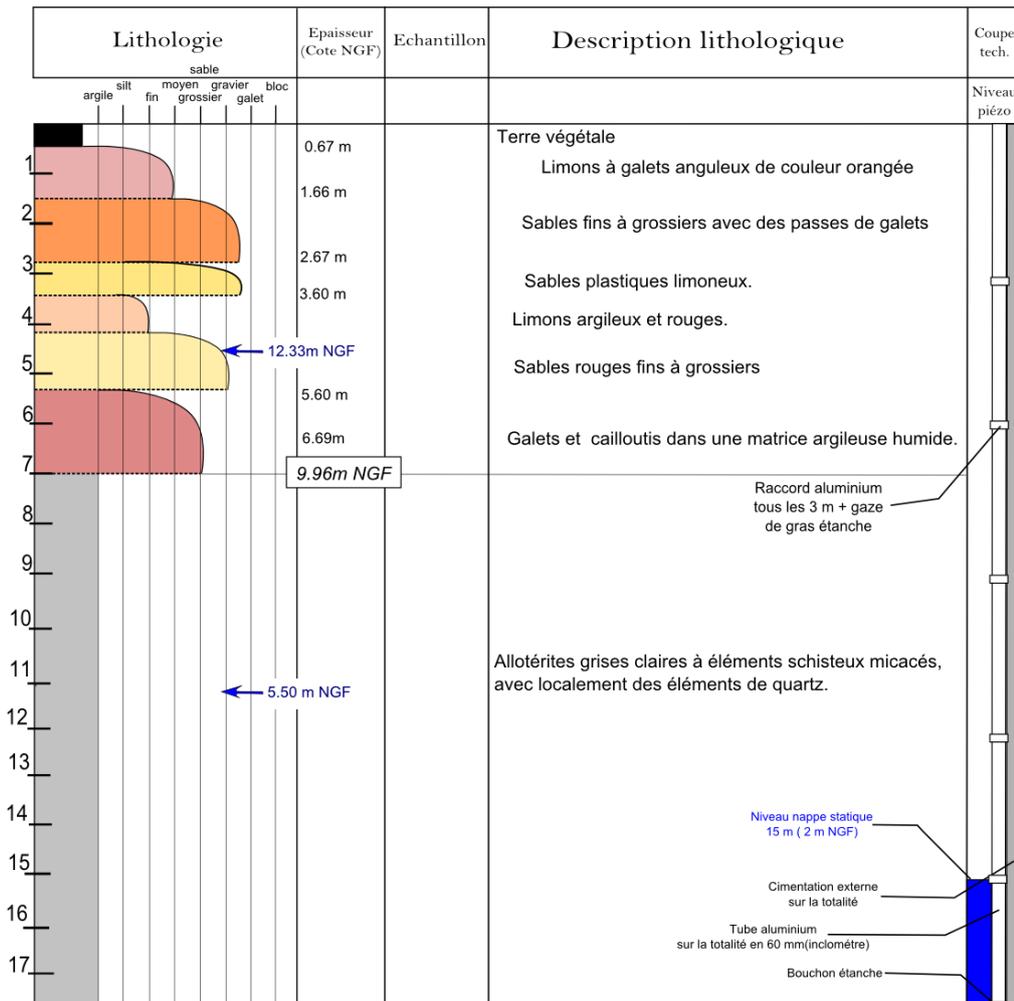
Colonne lithostratigraphique du **Inclinomètre 1 (NORD)**  
Pénestin, 56



Date: 26/04/2012  
Alt: 17m  
Profondeur: 20m

Forage à l'ODEX  
Diamètre: 115

← Arrivée d'eau





Colonne lithostratigraphique du **Inclinomètre 2 (SUD)**  
Pénestin, 56

Date: 26/04/2012

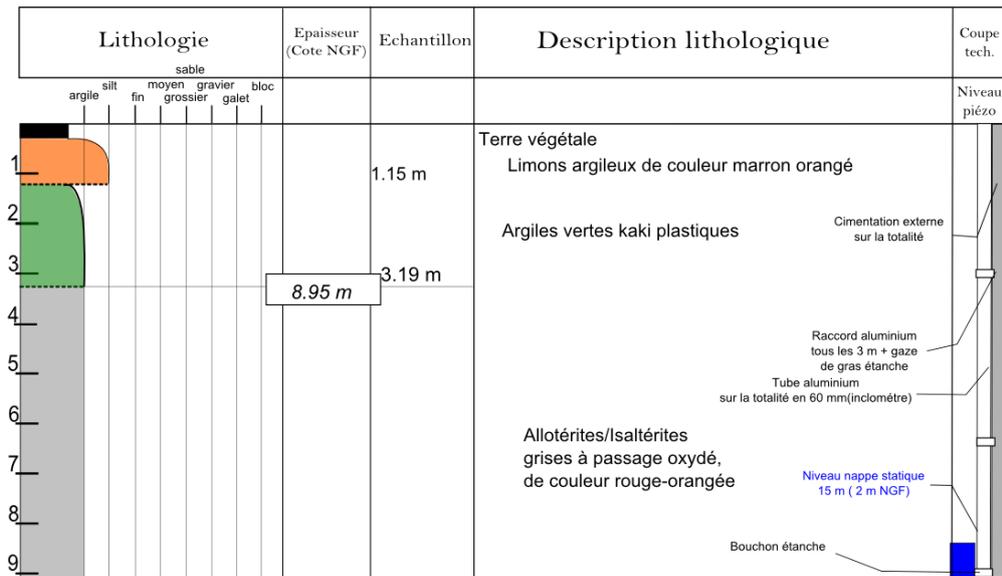
Alt: 10.65m

Profondeur: 9m

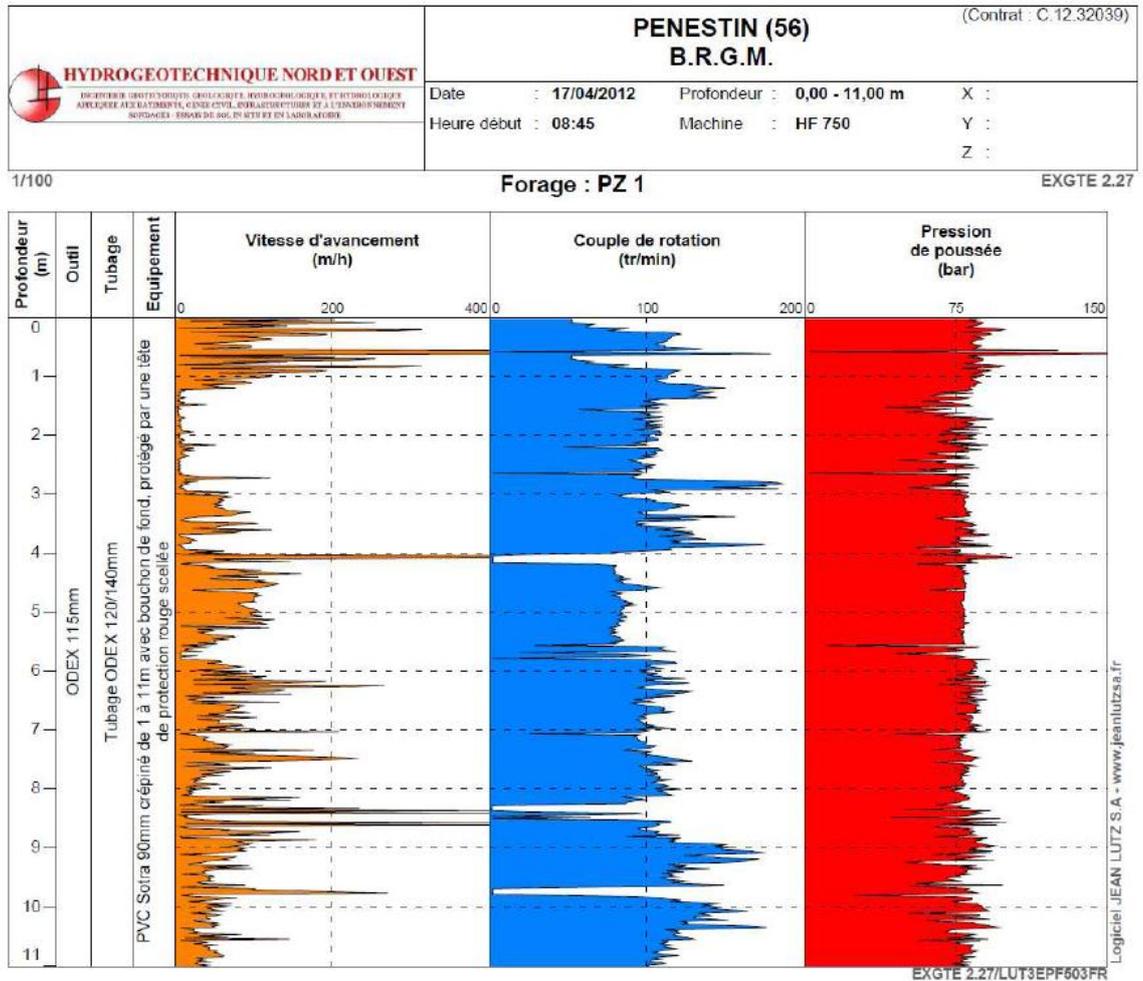
Forage à l'ODEX

Diamètre: 115

← Arrivée d'eau



## Annexe 2 : Données de foration brutes, Analyses géotechniques et aux rayons X

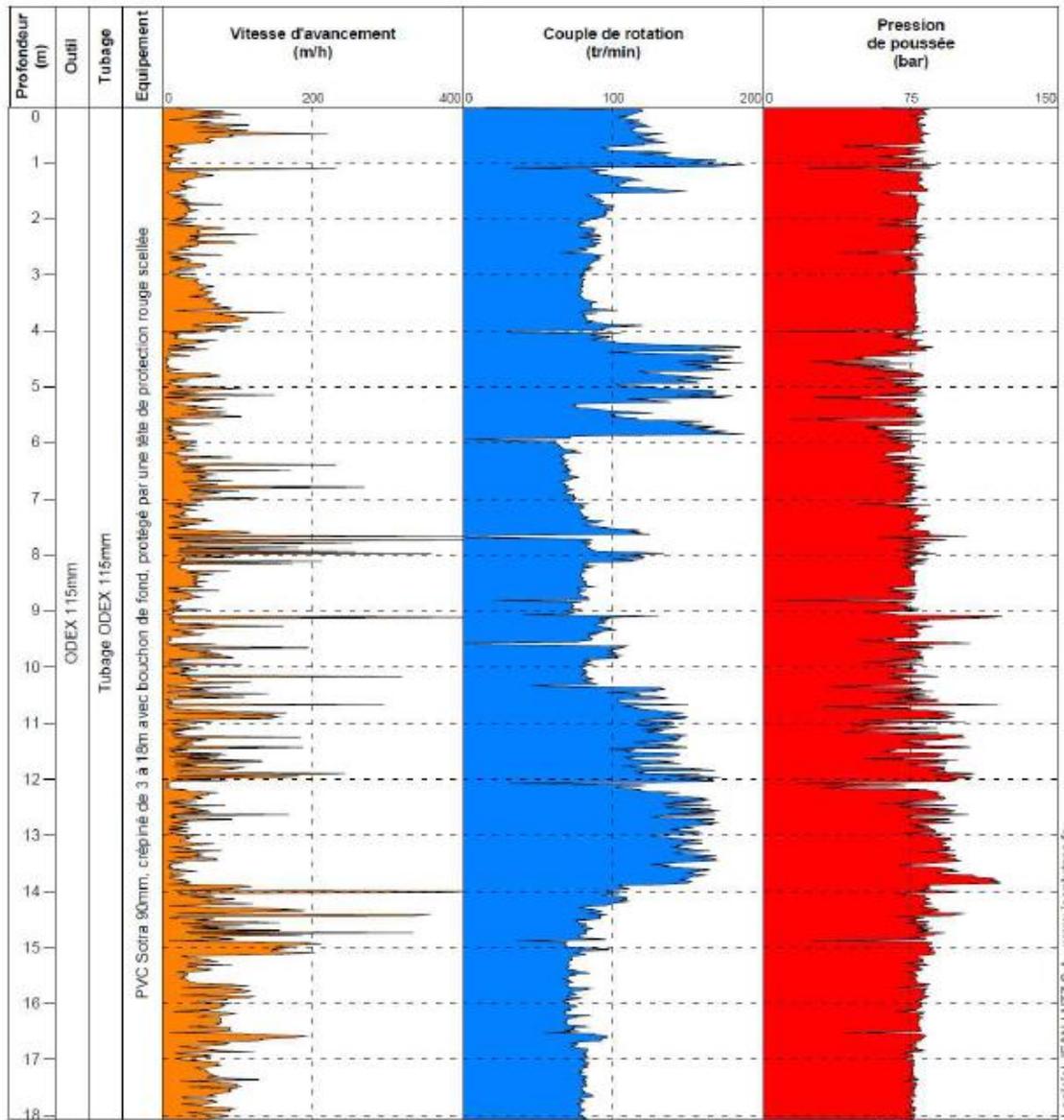


 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORD ET OUEST</b> <small>INGÉNIEUR GÉOLOGUE, GÉOLOGUE, INGÉNIEUR GÉNIEUR ET OPÉRATEUR          APPLIQUÉ AU BÂTIMENT, CIVIL, INDUSTRIEL, STRUCTUREL ET À L'ÉQUIPEMENT          MÉTALLIQUE - BUREAU DE SOLS ET DE GÉOLOGIE</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>		(Contrat : C.12.32039)
	Date : 17/04/2012	Profondeur : 0,00 - 18,06 m	X :
Heure début : 15:44	Machine : HF 750	Y :	Z :

1/100

**Forage : PZ 2**

EXGTE 2.27



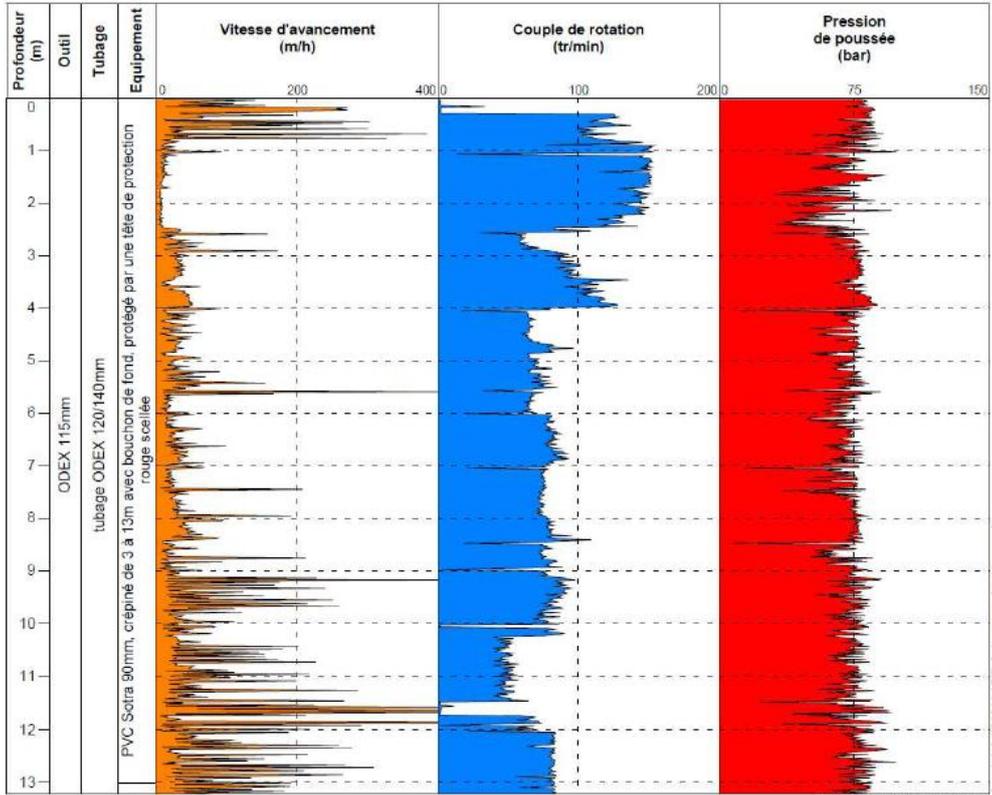
EXGTE 2.27/LUT3EPF503FR

 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORDET OUEST</b> <small>INGÉNIEUR GÉOTECHNIQUE, GÉOLOGUE, SPÉCIALISÉ EN GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE          APPLIQUÉS AUX BÂTIMENTS, BÂTIMES CIVILES, INDUSTRIES ET TRAVAUX DE RECONSTRUCTION          SONDAGES, ESSAIS DE SOLS IN SITU ET EN LABORATOIRE</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>			(Contrat : C.12.32039)
	Date : 24/04/2012	Profondeur : 0,00 - 13,20 m	X :	
Heure début : 08:55	Machine : HF 750	Y :	Z :	

1/100

**Forage : PZ 3**

EXGTE 2.27



Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeanlutz.fr

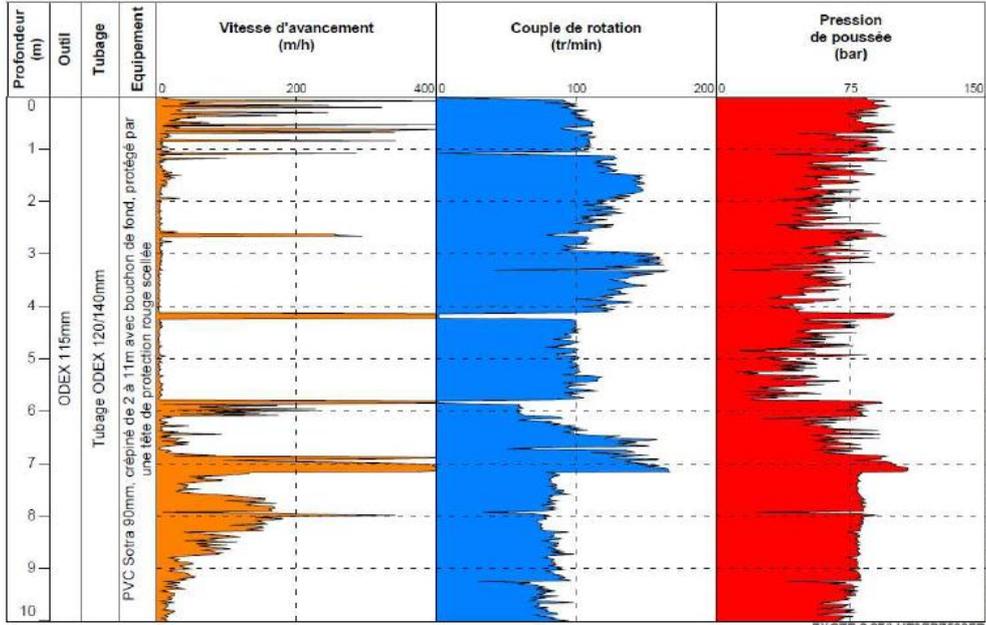
EXGTE 2.27/LUT3EPF503FR

 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORD ET OUEST</b> <small>INGÉNIEUR GÉOTECHNIQUE, GÉOLOGUE, HYDROGÉOLOGUE, ET HYDROLOGUE          APPLIQUÉS AUX BÂTIMENTS, L'INDUSTRIE, L'ÉNERGIE, L'ÉQUIPEMENT ET À L'ÉQUIPEMENT          MÉCANIQUE, BARRAGE DE PNEUMATIQUES ET DES LABORATOIRES</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>			(Contrat : C.12.32039)
	Date : 19/04/2012	Profondeur : 0,00 - 10,00 m	X :	Y :
Heure début : 16:09	Machine : HF 750	Z :		

1/100

Forage : PZ 4

EXGTE 2.27

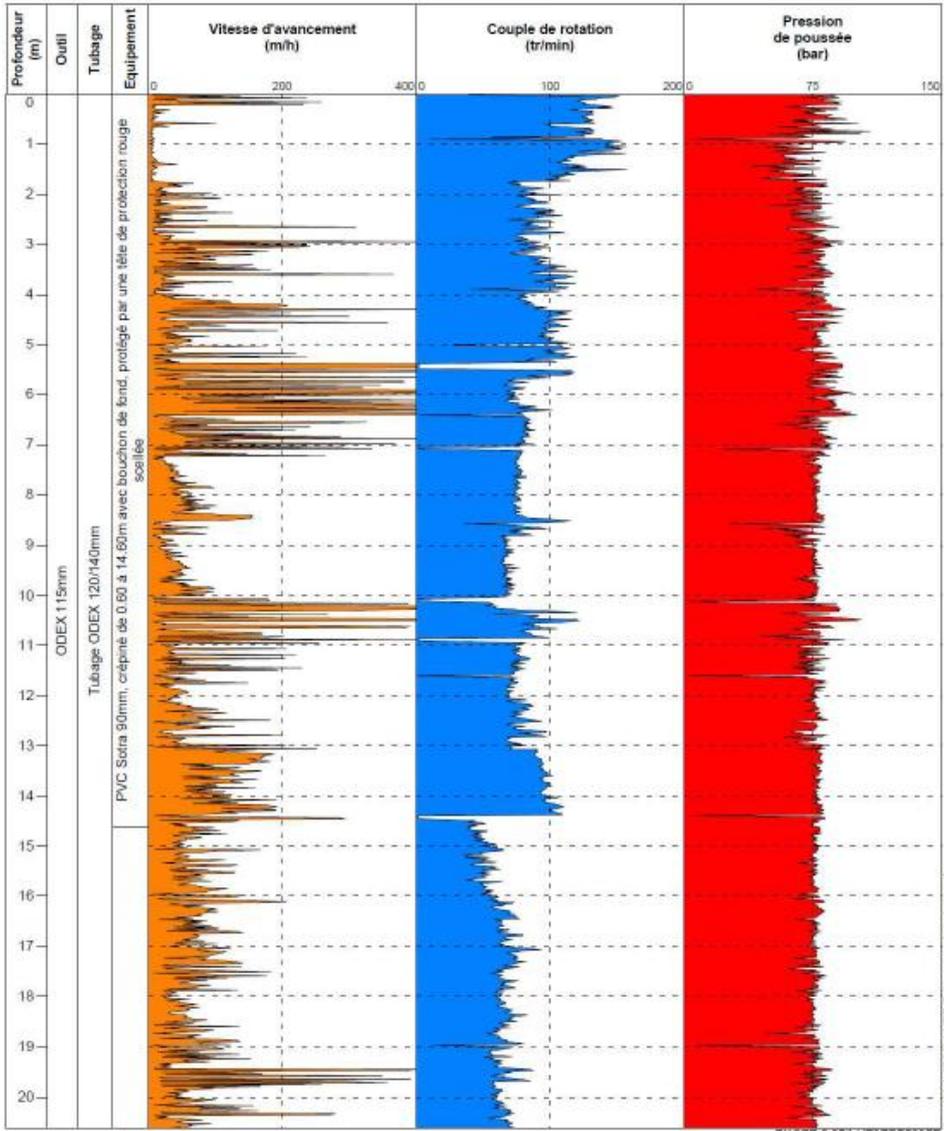


 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORDE ET OUEST</b> <small>UNIVERSITÉ D'ARTS ET MÉTIERS PARIS, INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES EN GÉOLOGIE ET GÉOPHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE BRITANNE ET NORMANDIE, UNIVERSITÉ DE CAEN, UNIVERSITÉ DE LILLE, UNIVERSITÉ DE LYON, UNIVERSITÉ DE NANTES, UNIVERSITÉ DE STRASBOURG, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>			(Contrat : C.12.32039)
	Date : 19/04/2012 Heure début : 08:47	Profondeur : 0,00 - 20,60 m Machine : HF 750	X : Y : Z :	

1/100

Forage : PZ 5

EXGTE 2.27

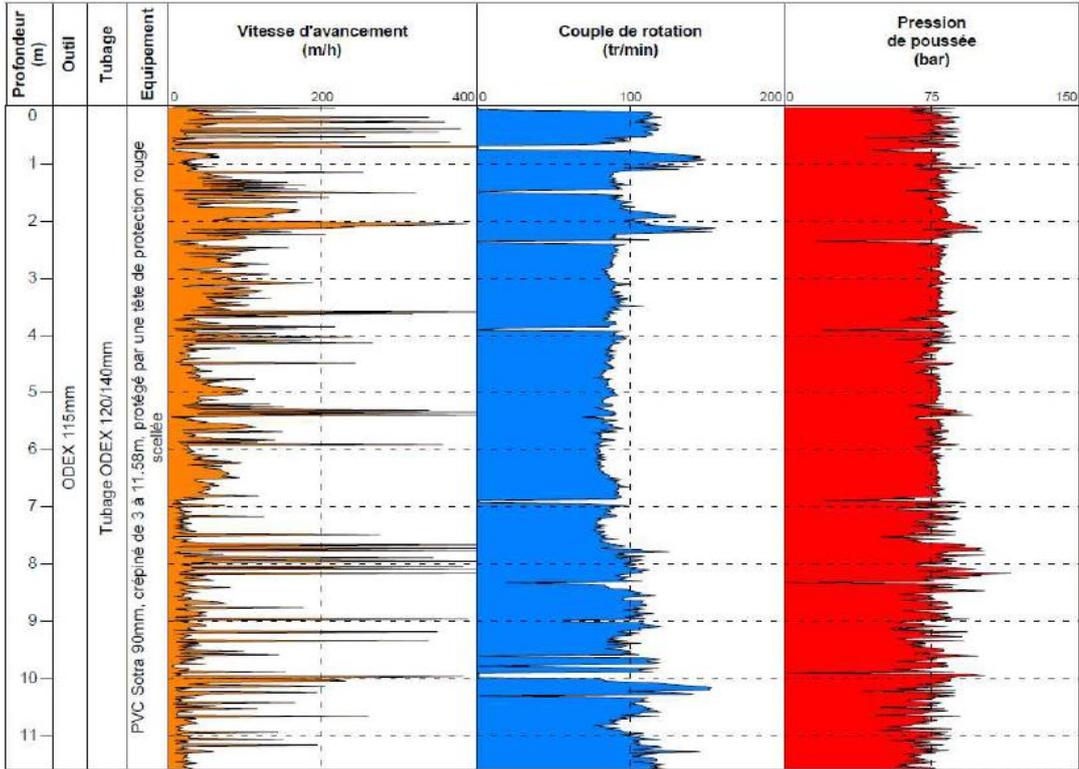


 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORD ET OUEST</b> <small>PREMIER INSTITUT DE GÉOLOGIE, GÉOLOGIE, HYDROGÉOLOGIE ET FONDATIONS          APPLIQUÉES À L'AMÉNAGEMENT, GÉNIE CIVIL, FORAGES/ÉQUIPEMENTS ET À L'ENVIRONNEMENT          ROUTIER - 53100 DE BÉZONNÈS ET EN LABORATOIRE</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>			(Contrat : C.12.32039)		
	Date : 23/04/2012	Profondeur : 0,00 - 11,58 m	X :	Heure début : 14:23	Machine : HF 750	Y :

1/100

Forage : PZ 6

EXGTE 2.27

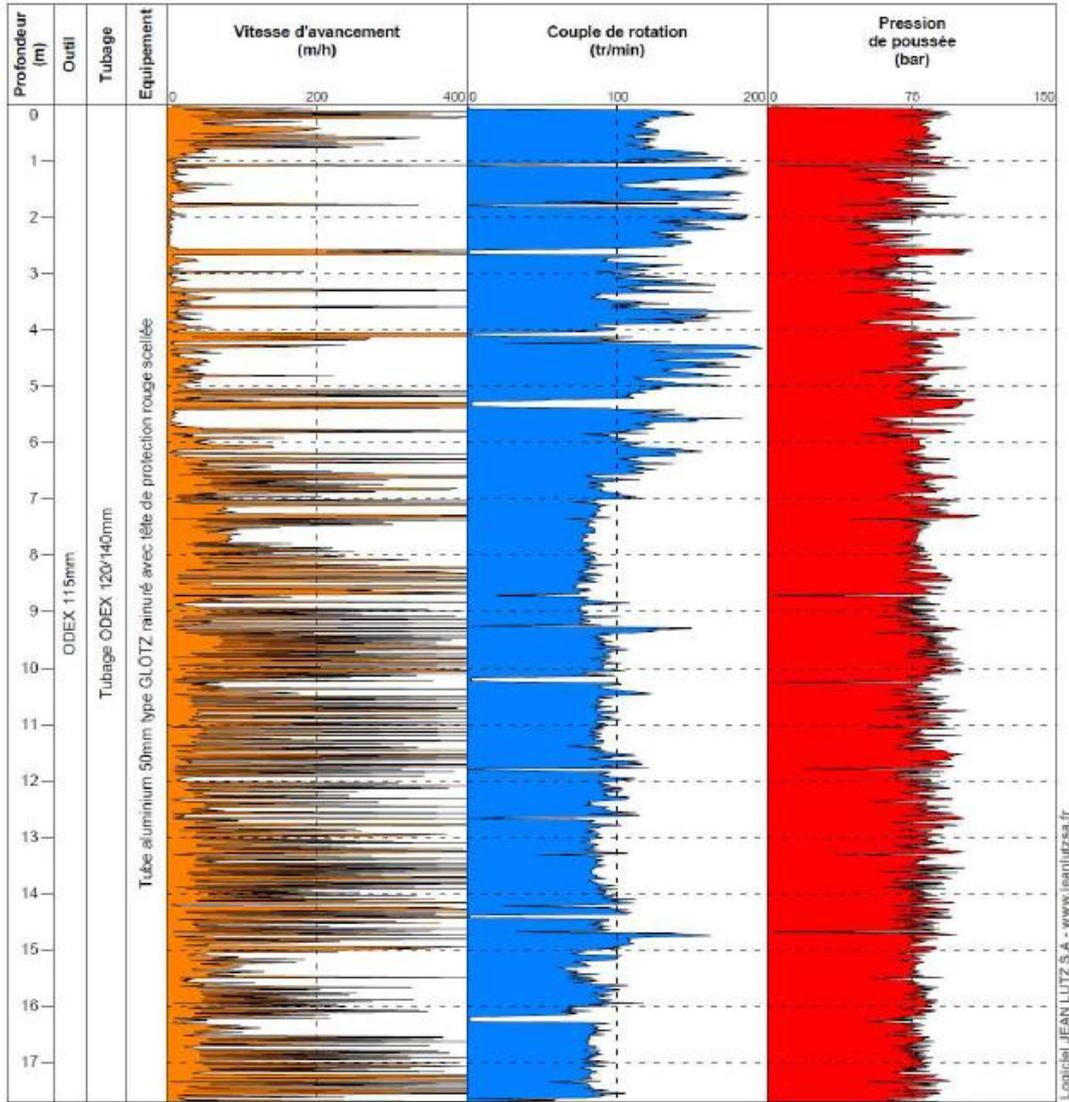


 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORD ET OUEST</b> <small>DE DÉTERMINER LES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS, DES FONDATIONS ET DES OUVrages          ARTISANAL AUX DIMENSIONS, DES CIVILS, DES BÂTIMENTS ET A L'INDUSTRIE          SOUS-TRAVERSÉ - ÉCRANS DE SOL, ENVOI ET DE LABORATOIRE</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>			(Contrat : C.12.32039)
	Date : 26/04/2012	Profondeur : 0,00 - 17,70 m	X :	
Heure début : 11:14	Machine : HF 750	Y :		
		Z :		

1/100

Forage : INCLINO N°1

EXGTE 2.27



EXGTE 2.27/LUT3EPF503FR

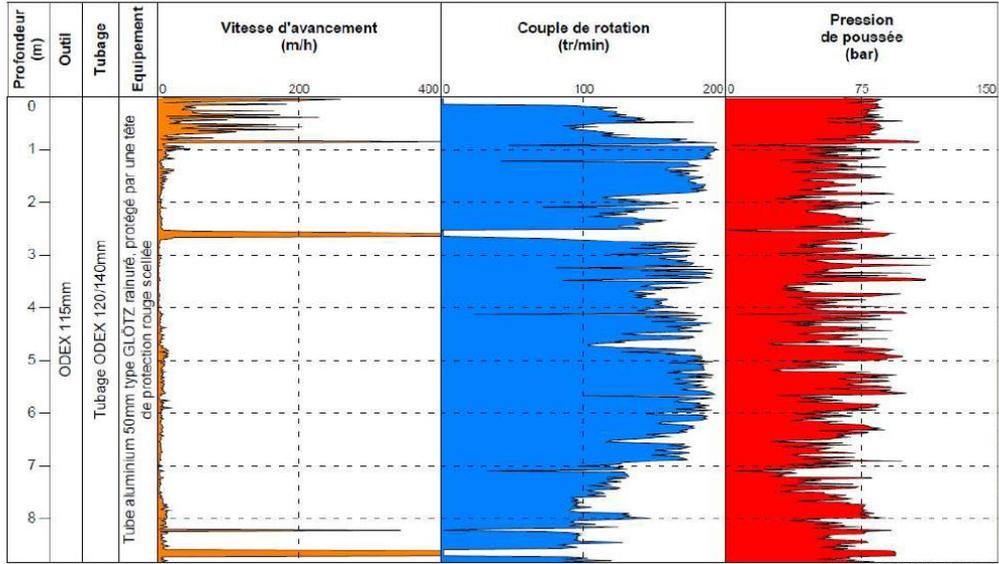
Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeanlutzsa.fr

 <b>HYDROGÉOTECHNIQUE NORD ET OUEST</b> <small>INGÉNIEUR GÉOTECHNIQUE, GÉOLOGUE, HYDROGÉOLOGUE, ET HYDROLOGUE          APPREHENSIF ANNÉE 2010, CHIFFRE CIVIL, DÉPARTEMENTS ET À L'ÉTRANGER          MOULINS - BUREAU DE SOLS, D'ÉTUDES ET DE LABORATOIRE</small>	<b>PENESTIN (56)</b> <b>B.R.G.M.</b>			(Contrat : C. 12.32039)
	Date : 24/04/2012	Profondeur : 0,00 - 8,82 m	X :	
Heure début : 15:55	Machine : HF 750	Y :		
		Z :		

1/100

Forage : INCLINO N°2

EXGTE 2.27





**1. Nature de l'essai :**

La fraction phylliteuse des échantillons est déterminée par diffractométrie des rayons X à partir de lames orientées normales, glycolées pendant 12 heures en tension de vapeur puis chauffées à 490°C pendant 4 heures. Les proportions sont estimées à partir de l'aire des pics. Il faut bien tenir compte que les pourcentages indiqués sont des valeurs relatives des phases phylliteuses présentes dans la fraction dite « < 2 microns » de l'échantillon.

Une phase dite « amorphe aux rayons X » peut être : une phase non cristallisée ou une phase cryptocristalline.

**2. Appareillage et conditions expérimentales :**

Appareillage : Diffractomètre SIEMENS D5000 automatisé

Conditions expérimentales :

- Balayage 2 à 36°2 $\theta$
- Vitesse de balayage de 0,02°2 $\theta$ /seconde
- Temps de comptage : 1 seconde par pas
- Echantillon fixe
- Tube au Cobalt ( $\lambda$  K $\alpha$ 1  $\approx$  1,789 Å)

Traitement des diagrammes : Logiciel DIFFRAC<sup>plus</sup>

**3. Résultats d'analyse**

Echantillon PEN-PZ4-5.85 :

- inter stratifié smectite/chlorite : ~89%
- illite et/ou micas : ~4%
- kaolinite : ~7%

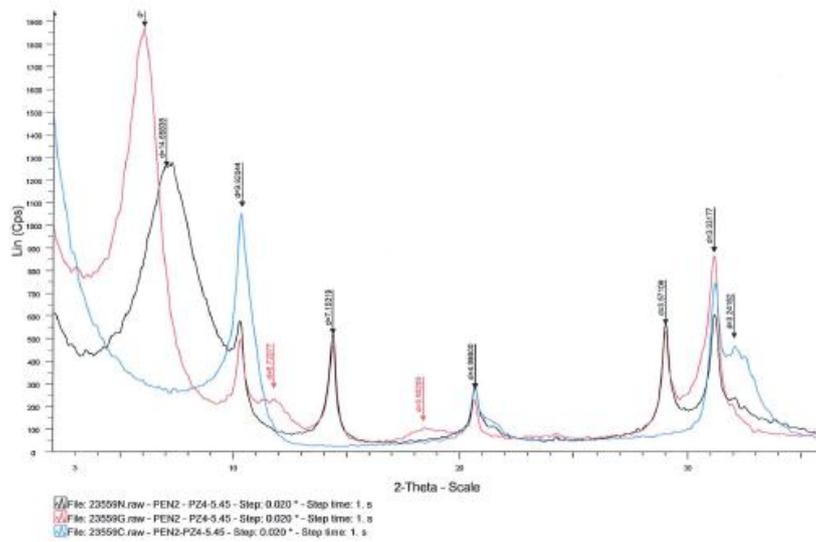
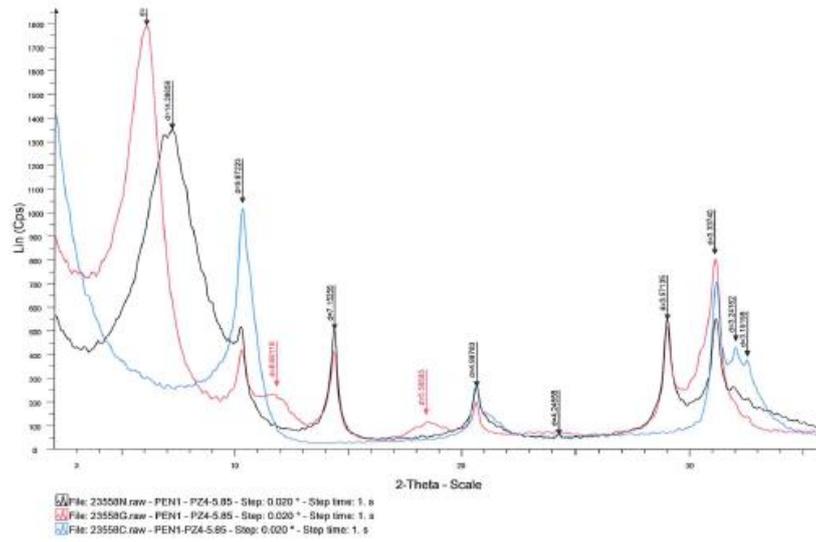
Echantillon PEN2-PZ4-5.45 :

- inter stratifié smectite/chlorite : ~88%
- illite et/ou micas : ~5%
- kaolinite : ~7%

**4. Observations**



RAPPORT D'ESSAIS 12-1-114-A







Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

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

**Direction Régional Bretagne**  
2, rue de Jouanet  
Atalante Beaulieu  
35700 – Rennes - France  
Tél. : 02 99 84 26 70 – Fax : 02 99 84 26 79