

Document public



Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral Basque français et son arrière pays

Observatoire de la Côte Aquitaine

Rapport final

BRGM/RP-57054-FR

février 2009



Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral Basque français (64)

Observatoire de la Côte Aquitaine

Rapport Final

BRGM/RP-57054-FR
février 2009



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

Peter-Borie M., Lucassou F., Aubié S.



Vérificateur :

Original signé par N. Pedron
Date : 20/02/2009

Approbateur :

Original signé par Ph. Dutartre
Date : 09/03/2009

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

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

Mots clés : Aquitaine, Côte Basque, Littoral, Hydrogéologie, Suivi, Observatoire Côte Aquitaine

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

PETER-BORIE M., LUCASSOU F., AUBIE S. (2009) – Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral basque français et son arrière pays, Observatoire de la Côte Aquitaine – Rapport BRGM/RP-57054-FR, 55 p, 34 illus.

Synthèse

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

Elle fait suite aux études pluri-disciplinaires réalisées sur le littoral de la Côte Basque qui ont permis de mettre en évidence la nécessité d'améliorer les connaissances sur les circulations d'eau souterraines en lien avec les phénomènes d'instabilités. Cette étude vient compléter celle réalisée en 2004 sur l'état des connaissances hydrogéologique et hydraulique (rapport BRGM/RP-53372-FR).

Les marno-calcaires à faciès flysch du Crétacé supérieur forment les deux-tiers des reliefs littoraux actuels du Pays Basque français. Ces roches ont subi, au cours du Néogène, une ou des phases d'altération à l'origine du développement d'altérites argilo-silteuses. La transition de la roche-mère saine à l'altérite se fait par l'intermédiaire d'un horizon karstifié, caractérisé par la présence de conduits de type karstique dans lesquels subsiste parfois encore l'altérite en place.

Ces altérites sont le siège de nombreux et fréquents mouvements de terrain qui participent à l'érosion du littoral. Or, l'eau est fréquemment reconnue comme facteur déclenchant les instabilités de terrain. Il est donc nécessaire, dans le cadre de l'étude d'instabilités, de déterminer un bilan hydrogéologique. Les premières mesures effectuées ont conduit à des résultats importants.

Deux types de nappes ont été mis en évidence dans la zone étudiée : des nappes perchées au sein des altérites et une ou des nappes localisées dans l'horizon karstifié semi-captives sous les altérites.

Les quelques mesures et analyses faites grâce à la mise en place d'un réseau de suivi à minima ont permis d'observer une grande disparité dans les résultats illustrant ainsi la complexité du système aquifère au sein de l'horizon karstifié. L'écoulement des nappes, le plus souvent semi-captives sous les altérites, se fait préférentiellement au sein des conduits. Les niveaux piézométriques et débits associés de la ou des nappes de l'horizon karstifié apparaissent reliés aux précipitations dans un délai très court ; les zones de lapiez où affleure l'horizon karstique peuvent alors former les zones d'infiltration. En outre, les falaises littorales, qui, de par leur géométrie, peuvent être à l'origine d'un fort gradient hydraulique, drainent une partie de ces écoulements souterrains.

Ces premiers résultats nécessitent cependant d'être complétés par des suivis au cours de périodes plus longues et la mise en place d'un réseau de piézomètres (et/ou qualitomètres) plus dense et plus homogène, de façon à être en mesure, *in fine*, de quantifier les apports d'eau aux reliefs côtiers.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	9
1.1. CADRE DE L'ETUDE.....	9
1.2. OBJET DE L'ETUDE	9
2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.....	11
2.1. LOCALISATION DU SECTEUR ETUDIE.....	11
2.2. GEOLOGIE SIMPLIFIEE	12
2.3. CLIMAT REGIONAL DU PAYS BASQUE FRANÇAIS	13
2.3.1. <i>Climat du littoral basque</i>	14
2.3.2. <i>Les précipitations</i>	14
2.3.3. <i>Les températures</i>	15
2.3.4. <i>Synthèse</i>	16
3. HYDROLOGIE	17
4. HYDROGEOLOGIE	23
4.1. ETAT DES CONNAISSANCES	23
4.2. CONSTITUTION DU RESEAU.....	25
4.3. PHYSICO-CHIMIE DES NAPPES DE LA COTE BASQUE	27
4.3.1. <i>Types de données</i>	27
4.3.2. <i>Résultats des analyses</i>	28
4.3.3. <i>Calcul des indices de saturation</i>	31
4.3.4. <i>Analyse en composantes principales (ACP)</i>	31
4.3.5. <i>Influence de la distance à la côte</i>	35
4.3.6. <i>Conclusion</i>	36
4.4. REPONSES DU SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE AUX PRECIPITATIONS.....	36
4.5. ETUDE PIEZOMETRIQUE.....	40
4.5.1. <i>Essai d'estimation d'une carte piézométrique</i>	41
4.6. HYPOTHESE SUR L'ORIGINE ET LE DEVELOPPEMENT DE LA OU DE(S) NAPPE(S) DE L'HORIZON KARSTIFIE	49
4.7. MODELE SYNTHETISANT LES CIRCULATIONS HYDROGEOLOGIQUES	50
5. CONCLUSION	53
6. BIBLIOGRAPHIE.....	55

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation du Pays Basque et du secteur étudié (Euskal Herria = Pays Basque).....	11
Illustration 2 : Altérite du flysch à silex de Guéthary	12

Illustration 3 : Altération du flysch à Saint-Jean-de-Luz	13
Illustration 4 : Précipitations mensuelles moyennes et températures aux stations météorologiques de : a. de Biarritz-Anglet (1956-2008) ; b. de Ciboure (Pointe de Socoa ; 1921-2008, pas de données de 1939 à 1945 ; données MétéoFrance 2008)	14
Illustration 5 : Différence entre les précipitations journalières enregistrées à Socoa et celles enregistrées à Biarritz	15
Illustration 6 : Réseau hydrographique de la Côte Basque	18
Illustration 7 : Noms et caractéristiques principales des fleuves côtiers basques	19
Illustration 8 : Localisation des bassins versants topographiques primaires, secondaires et tertiaires des fleuves du littoral basque	20
Illustration 9 : a. Réseau hydrographique principal de la Côte Basque et bassins versants topographiques associés ; b. directions principales des cours d'eau et du littoral	21
Illustration 10 : Carte du réseau hydrographique et des principaux aquifères (Winckel et al., 2004)	23
Illustration 11 : Localisation des points d'eau des communes du littoral basque issus de la BSS avec notification de la présence d'eau au moment de la foration (Winckel et al., 2004)	25
Illustration 12 : Localisation des piézomètres, puits et sources intégrés dans le réseau de suivi des nappes souterraines dans le domaine du flysch sur fond de carte lithologique	26
Illustration 13 : Carte de localisation des différents types de points d'eau analysés (piézomètre, puits ou source)	28
Illustration 14 : Diagramme d'analyse d'eau de type de Piper des puits, piézomètres et sources analysés sur la Côte Basque	29
Illustration 15 : Synthèse des analyses chimiques réalisées sur les puits, piézomètres et sources de la Côte Basque	30
Illustration 16 : Position des variables (à gauche) et des individus (à droite) dans le plan principal (axes I et II)- ACP sur l'ensemble des données	32
Illustration 17 : Position des variables (à gauche) et des individus (à droite) dans le plan principal (axes I et II) – ACP après suppression du point N°130, du pH et de la température	33
Illustration 18 : Position des variables dans le plan principal (axes I et II) – ACP sur les points peu discriminés, après suppression du pH et de la température	34
Illustration 19 : Position des individus dans le plan principal (axes I et II) – ACP sur les points peu discriminés, après suppression du pH et de la température	34
Illustration 20 : Carte des battements des nappes	37
Illustration 21 : a. Variations de l'altitude des niveaux piézométriques par rapport au minimum mesuré de août 2007 à mai 2008 et précipitations efficaces au cours de cette période ; b. localisation des ouvrages (légende : voir illustration 32)	38
Illustration 22 : Relation entre les débits de deux sources et les précipitations	39
Illustration 23 : Relation entre le niveau piézométrique et la surface topographique	40

Illustration 24 : Détermination des paramètres a et b nécessaire à l'estimation de la surface piézométrique (Wyns, 1999)	41
Illustration 25 : Carte de la surface enveloppe des rivières pérennes et points d'eau mesurés.....	43
Illustration 26 : Carte de l'écart-type de krigeage sur les altitudes de la surface enveloppe des talwegs.....	43
Illustration 27 : Variogramme obtenu à partir des points de la BD CARTHAGE sur la zone d'étude selon les 4 directions principales.....	44
Illustration 28 : Variogramme moyen obtenu à partir des points de la BD CARTHAGE sur la zone d'étude et modèle associé.....	45
Illustration 29 : Relation entre les paramètres a et b aux points de données piézométriques	46
Illustration 30 : Carte des résidus (en valeur absolue) de la régression linéaire aux points de données (bthéorique – bréel)	46
Illustration 31 : Surface piézométrique estimée et bassins versants topographiques	47
Illustration 32 : Carte des différences entre les altitudes des niveaux topographiques et piézométriques (anomalies négatives en rouge-orange).....	48
Illustration 33 : Carte des venues d'eau sur le littoral (et à proximité) et bassins versants des fleuves côtiers	49
Illustration 34 : Bloc diagramme conceptualisant les grands principes d'écoulement souterrain au sein du profil d'altération	51

Liste des annexes

Annexe 1 Carte géologique géologique simplifiée (d'après P.Razin, 1989, modifiée).....	57
Annexe 2 Rappels sur le fonctionnement d'un karst	61
Annexe 3 Calcul des indices de saturation avec le logiciel PhreeqC (USGS)	65
Annexe 4 Rappels sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP)	71
Annexe 5 Graphiques représentant l'influence de la distance à la côte.....	75
Annexe 6 Logs de forage des piézomètres implantés sur la Côte Basque	79
Annexe 7 Saisie d'une fiche descriptive d'ouvrage dans une base de données Access	89
Annexe 8 Suivi piézométrique	93
Annexe 9 Rappels sur la géostatistique et la méthode du krigeage Présentation du logiciel GDM	99

1. Introduction

1.1. CADRE DE L'ETUDE

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

Elle fait suite aux études pluri-disciplinaires réalisées sur le littoral de la Côte Basque qui ont permis de mettre en évidence la nécessité d'améliorer les connaissances sur les circulations d'eau souterraines en lien avec les phénomènes d'instabilités. Cette étude vient compléter celle réalisée en 2004 sur l'état des connaissances hydrogéologique et hydraulique (rapport BRGM/RP-53372-FR).

1.2. OBJET DE L'ETUDE

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

- le Flysch à silex de Guéthary (Coniacien inférieur), le Flysch marno-calcaire de Socoa (Coniacien supérieur à Santonien moyen) et le Flysch d'Hayzabia, comprenant la Turbidite de Makila et les Marno-calcaires de Loya (Santonien supérieur à Campanien moyen) qui affleurent sur le littoral,
- le Calcaire d'Ablantz et de Villa Rosa (Cénomanien supérieur à Turonien inférieur) et le Calcaire de Béhobie (Turonien moyen à supérieur), présents dans l'arrière-pays proche.

Ces roches ont subi, au cours du Néogène, une ou des phases d'altération à l'origine du développement d'altérites argilo-silteuses, dont l'étude a fait l'objet de rapports précédents (rapport BRGM/RP-56064-FR et rapport BRGM/RP-57055-FR). La transition de la roche-mère saine à l'altérite se fait par l'intermédiaire d'un horizon karstifié, caractérisé par la présence de conduits de type karstique dans lesquels subsiste parfois encore l'altérite en place. Dans les faciès les plus carbonatés ; l'épaisseur d'altérites peut atteindre plusieurs dizaines de mètre.

Ces altérites sont le siège de nombreux et fréquents mouvements de terrain qui participent à l'érosion du littoral. Or, l'eau est fréquemment reconnue comme facteur déclenchant les instabilités de terrain (Cojean, 1994, Cuesta et al., 1999, Tullen, 2002, Martins-Campina, 2004). Il est donc nécessaire, dans le cadre de l'étude d'instabilités, de déterminer le bilan hydrogéologique à l'échelle du versant, ou, si cela s'avère nécessaire, à l'échelle régionale et de déterminer, dans la mesure du possible, les

zones d'infiltration qui alimentent le versant, le trajet et les vitesses des écoulements souterrains et les zones d'exutoire. Ce rapport expose les résultats des suivis piézométriques et de physico-chimie des eaux effectués sur le littoral. Il se compose de trois parties principales : le rappel des conditions géologiques et géographiques du site, les caractéristiques hydrologiques et enfin, les études hydrogéologiques.

2. Contexte géographique et géologique

2.1. LOCALISATION DU SECTEUR ETUDIE

La Côte Basque, longue d'environ 40 km, est située dans le département des Pyrénées Atlantiques (64), entre l'embouchure de l'Adour au nord et celle de la Bidassoa au sud (frontière espagnole). Du nord au sud, on rencontre 8 communes le long du littoral de la province du Labourd (Illustration 1) : Anglet, Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz, Ciboure, Urrugne et Hendaye. Ce littoral est caractérisé par un paysage de falaises pouvant atteindre 50 m de hauteur, de baies, de plages et de collines dans l'arrière-pays.

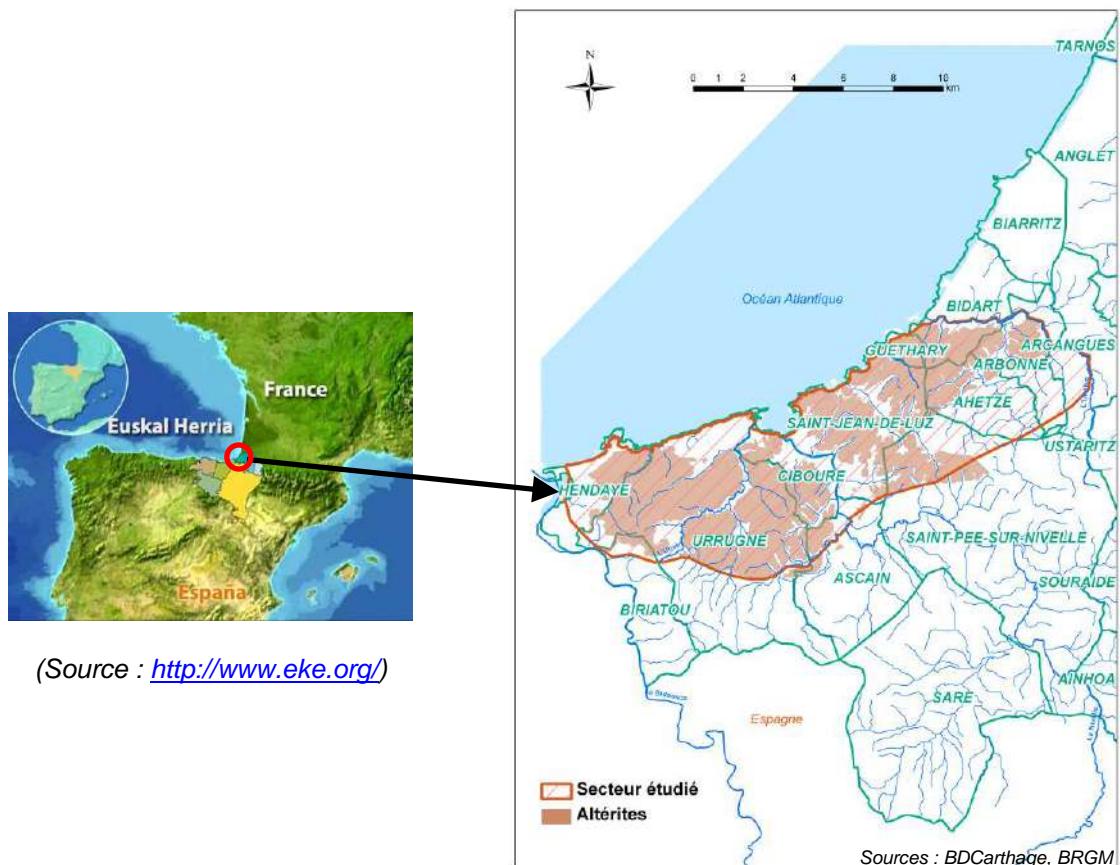


Illustration 1 : Localisation du Pays Basque et du secteur étudié (Euskal Herria = Pays Basque)

Le littoral basque étant très fortement urbanisé (115 000 habitants répartis sur les 8 communes littorales, selon les chiffres INSEE de 2007) et très touristique, il subit une forte pression démographique et financière.

2.2. GEOLOGIE SIMPLIFIEE

La carte géologique mise à jour du littoral basque est disponible en Annexe 1. La majeure partie des terrains rencontrés sur la Côte sont des calcaires marneux à faciès flysch (appelés, par abus, « flyschs ») résultant de la consolidation de dépôts turbiditiques du Crétacé supérieur. Ils sont constitués par une alternance de niveaux calcaires, marno-calcaires et argileux. Leur structure, due à la tectonique pyrénéenne, s'avère très complexe. Sur le littoral, l'étude s'intéresse notamment au Flysch à silex de Guéthary, du Coniacien inférieur. Il est constitué de calcaires blancs, massifs, interrompus par des interbancs marneux et des niveaux siliceux noirs (accidents siliceux de type chaille, abusivement désignés sous le terme de « silex »). Ce flysch est altéré sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. C'est cette formation superficielle résultante qui est particulièrement étudiée (Illustration 2).



Illustration 2 : Altérite du flysch à silex de Guéthary

Les altérites sont des formations superficielles résiduelles résultant de l'altération et de la fragmentation sur place de roches saines, c'est-à-dire les calcaires et marno-calcaires à faciès flysch sur le littoral basque (Illustration 3). Elles présentent un faciès argileux, avec des reliquats de roche-mère (calcaire, bancs de chailles fracturés parallèles à la stratification). Elles conservent la structure de la roche mère (stratification) mais diminuent fortement de volume (décalcification).



Illustration 3 : Altération du flysch à Saint-Jean-de-Luz

L'analyse chimique des niveaux argileux de ces altérites a montré qu'elles sont majoritairement composées de silice et dépourvues de CaCO_3 (rapport BRGM/RP-57055-FR). D'autre part, ces argiles plastiques sont très sensibles à l'eau (illite, montmorillonite), ce qui accentue les instabilités de terrain (phénomène de retrait/gonflement, solifluxion, glissement).

Ces formations de surface, d'extension considérable, constituent un support pour les aménagements anthropiques. Or, les mouvements de terrain dépendent de la nature et de la structure des roches dans lesquelles ils se produisent. C'est pourquoi la connaissance des propriétés des altérites apparaît comme essentielle.

2.3. CLIMAT REGIONAL DU PAYS BASQUE FRANÇAIS

La position géographique du Pays Basque lui confère un climat de type océanique atténué (MétéoFrance, 2008). En effet, sa position méridionale dans le Golfe de Gascogne le met à l'abri des perturbations océaniques les plus puissantes, et la proximité des montagnes pyrénéennes lui assure un climat doux et humide tout au long de l'année. Au printemps et en été, les vents d'ouest à nord-ouest sont dominants; l'effet de foehn en amont des reliefs pyrénéens a alors pour conséquence de fortes précipitations sur le Pays Basque français. Cet effet s'inverse lorsque le vent souffle du Sud, l'hiver et l'automne. Les masses d'air humide se sont alors déchargées sur le versant espagnol des Pyrénées. Une fois les sommets franchis, l'air subit une compression qui le réchauffe : le vent qui souffle du Sud apporte sur le Pays Basque français un air chaud et relativement sec (conséquence en aval des reliefs de l'effet de foehn).

2.3.1. Climat du littoral basque

L'illustration 4 présente les diagrammes ombrothermiques calculés à partir des données météorologiques moyennes des stations de Biarritz (code station : 64024001, période couverte : 1956-2008) et de Socoa (code station : 64189001, période couverte : 1921-2008, MétéoFrance, 2008).

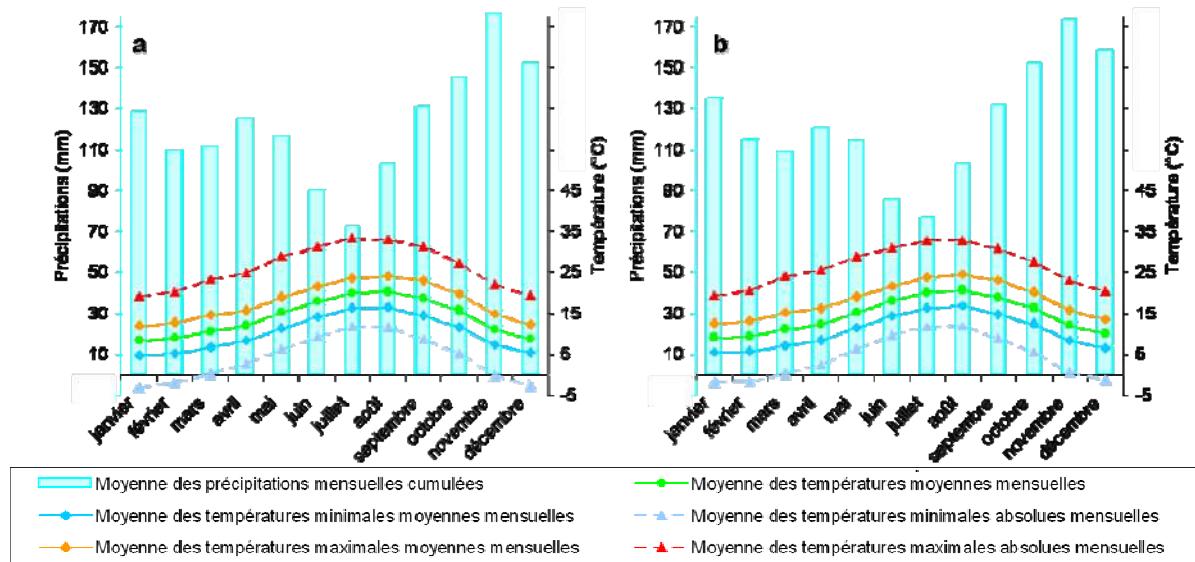


Illustration 4 : Préférences mensuelles moyennes et températures aux stations météorologiques de : a. de Biarritz-Anglet (1956-2008) ; b. de Ciboure (Pointe de Socoa ; 1921-2008, pas de données de 1939 à 1945 ; données MétéoFrance 2008)

2.3.2. Les préférences

Les préférences mensuelles moyennes se répartissent, à Biarritz, entre un minimum moyen en juillet de 73 mm et un maximum moyen en novembre de 177 mm. A Socoa, elles évoluent de façon quasi identique, entre 77 mm en juillet et 174 mm en novembre. Les moyennes des préférences totales annuelles sur ces périodes sont de 1462 mm à Biarritz et de 1479 mm à Socoa. Cependant, bien qu'à l'échelle mensuelle ou annuelle, les préférences soient équivalentes au droit de ces deux stations, à pas de temps journalier, de fortes disparités peuvent apparaître : à titre d'exemple, sur l'illustration 5, qui présente les différences de préférences journalières entre les stations de Socoa et de Biarritz au cours de l'année 2004, on observe des variations relativement fréquentes (40 jours de pluies avec des différences supérieures à 5 mm) pouvant atteindre 30 mm.

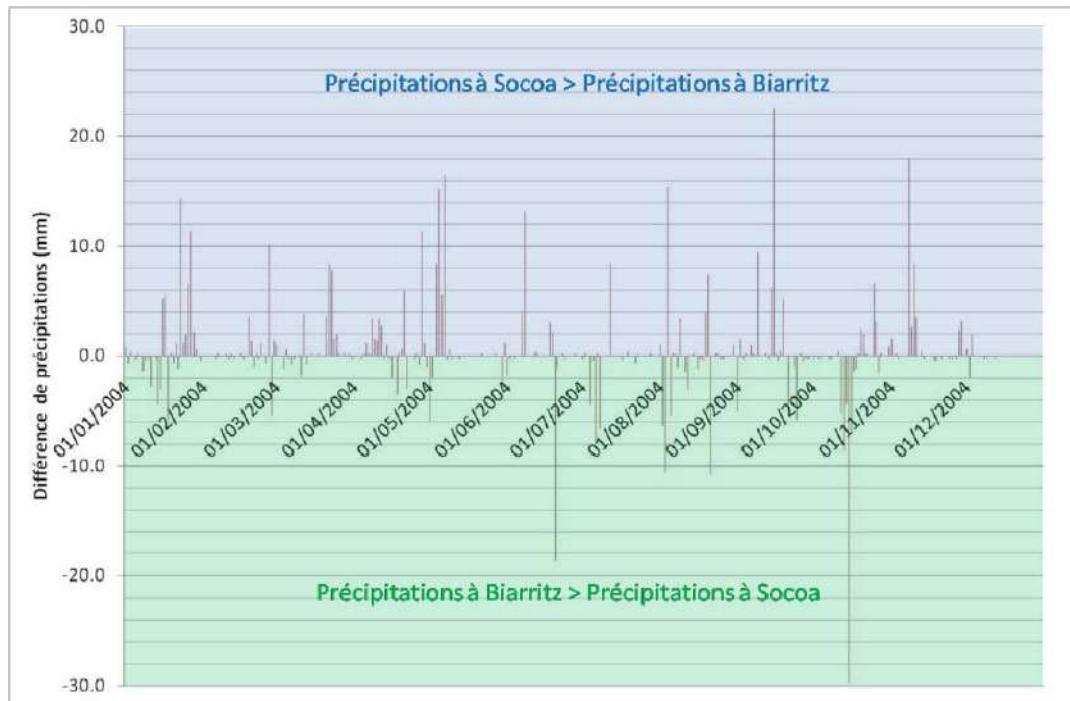


Illustration 5 : Différence entre les précipitations journalières enregistrées à Socoa et celles enregistrées à Biarritz

Ces disparités sont interprétées comme étant les conséquences de la localisation des pluies et des averses orageuses, comme cela est fréquemment observé sur le terrain.

Au cours des périodes couvertes par les chroniques des précipitations de MétéoFrance (2008) relevées à la station de Socoa (de 1921 à 1939 puis de 1945 à juin 2008), certaines années sont remarquables par les extrema atteints. A Socoa, les années 1921 et 1948 ont été particulièrement sèches, caractérisées par des précipitations annuelles inférieures à 1000 mm, avec respectivement 831 mm et 519 mm. Au contraire, les années 1923, 1927, 1930, 1960 et 1979 ont été particulièrement arrosées avec, chaque fois, plus de 1900 mm d'eau tombés dans l'année.

2.3.3. Les températures

Les températures moyennes mensuelles à Socoa fluctuent en moyenne entre 8,9°C lors du minimum hivernal, en janvier, et 20,6°C en août. A Biarritz, l'écart entre extrema moyens est similaire, avec 8,2°C en janvier et 20,2°C en août. Les hivers sont doux (conséquence de l'effet de foehn) alors que les étés sont relativement frais. Les températures moyennes annuelles sont de 13,8°C à Biarritz et de 14,3°C à Socoa.

L'étude des valeurs extrêmes mensuelles des températures permet de mettre en évidence la présence, d'une part, de températures supérieures de 10,0°C à la moyenne saisonnière en période estivale et, d'autre part, de périodes de gel en hiver. Les maxima absolus estivaux sont les plus élevés, en moyenne, en juillet à Biarritz

(33,1°C) et en août à Socoa (32,7°C). Les minima absolus sont les plus bas à Biarritz avec, en moyenne, -2,9°C en janvier et différent de 1,1°C par rapport à Socoa, avec -1,8°C en février. Les températures record sur les périodes étudiées sont, à Biarritz et à Socoa, respectivement de 40,6°C et de 40,2°C, enregistrées en août 2003 (période caniculaire sur toute la France) pour les maxima, et de -12,7°C (janvier 1985) et de -12,0°C (février 1956) pour les minima.

La proximité de la station de Socoa de la mer peut expliquer les différences de températures extrêmes et moyennes entre Socoa et Biarritz, notamment grâce à l'effet tampon de la masse d'eau océanique.

2.3.4. Synthèse

Dans l'ensemble, les saisons sur le littoral basque sont assez bien marquées : les contrastes de températures de plus de 10°C marquent bien l'hiver et l'été et, les précipitations abondantes caractérisent l'automne. Avec ses étés humides et ses hivers doux, la Côte Basque bénéficie d'un climat tempéré océanique modifié par la présence des Pyrénées. Les précipitations annuelles sont abondantes, supérieures à 1,4 m au cours d'une année, et les températures moyennes sont élevées, supérieures à 13°C.

En outre, on constate au cours de la période étudiée une augmentation significative des températures moyennes, particulièrement importante en période estivale (avec un taux annuel maximal en août de 0,058°C/an).

3. Hydrologie

Le réseau hydrographique du littoral basque est relativement dense avec 173 km de rivières et de fleuves répartis sur l'ensemble des communes du littoral basque français. La constance des précipitations fait que les cours d'eau sont généralement pérennes. Les fleuves côtiers basques qui concernent la zone d'étude sont, du Nord vers le Sud (Illustration 6) :

- L'Adour (de *atur*, en basque, signifiant cours d'eau), dont l'embouchure, artificiellement creusée par l'homme à la fin du XIXème siècle (Deserces, 1973), se situe à cheval sur les communes d'Anglet et de Tarnos ;
- L'Uhabia, à Bidart ; *Ur habia* signifie littéralement « trou d'eau » ;
- Le Baldareta, à Cénix, sur les communes de Guéthary et de Bidart ;
- Le Grand Isaka (le grand fossé), parfois nommé Antereneko Erreka (ruisseau d'Anterenea, du nom d'un lieu-dit qu'il traverse) à Parlementia, commune de Saint-Jean-de-Luz ;
- La Nivelle à Saint-Jean-de-Luz ;
- L'Unxin à Ciboure ;
- Le ruisseau de Mentaberry (« ruisseau de la nouvelle auberge ») à Hayzabia sur la commune d'Urrugne ;
- La Bidassoa, qui forme une ria à la frontière espagnole.

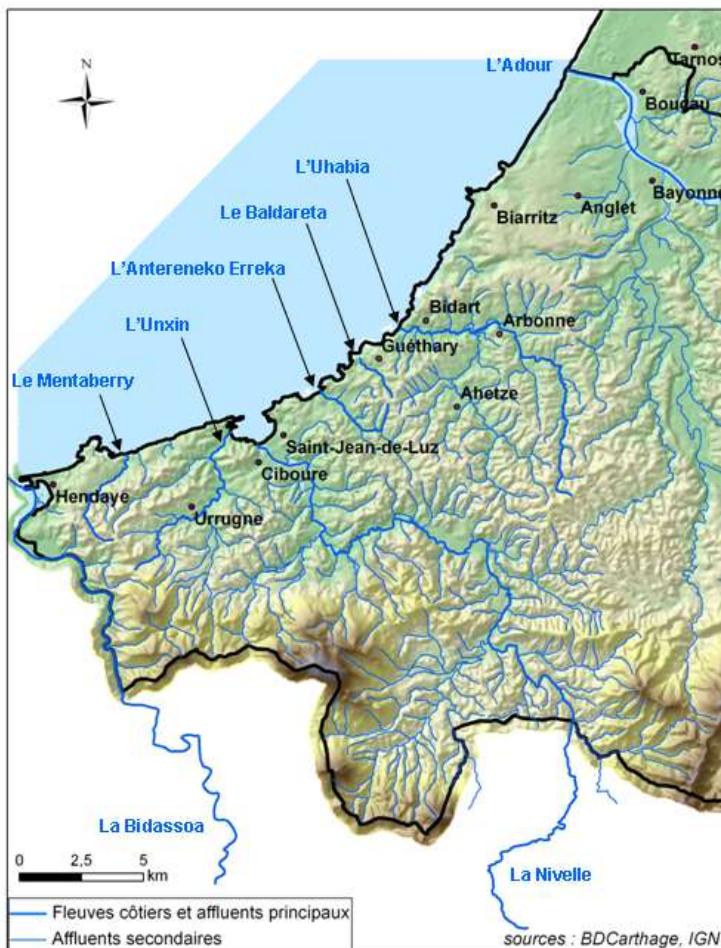


Illustration 6 : Réseau hydrographique de la Côte Basque

Mis à part l'Adour, les fleuves côtiers se terminent par des estuaires peu profonds argilo-sableux. L'influence des apports amont, venant des reliefs pyrénéens, est particulièrement sensible sur la Nivelle et la Bidassoa qui prennent leur source du côté espagnol des Pyrénées. Leurs affluents écoulent à la fois des eaux de pluie mais aussi celles résultant de la fonte printanière des neiges pyrénéennes. La Nivelle présente des débits spécifiques élevés (environ 50 l/s/km²), des étiages relativement soutenus et des crues aussi violentes que brutales qui témoignent d'un bassin versant à forte pluviosité, à substrats imperméables et à fortes pentes (Bichot et Leroi, 1996).

Les bassins versants topographiques de sept des huit fleuves côtiers et de leurs affluents ont été tracés. Le bassin versant de l'Adour n'a pas été étudié car ce fleuve ne draine pas les altérites du littoral.

Ces tracés ont été réalisés grâce aux cartes IGN au 1/25 000, aux orthophotos littorales de 2000, au MNT (Modèle Numérique de Terrain) à 50 m, au MNT européen à 500 m et à la BD CARTHAGE (Base de Données sur la CARtographie THématique des AGences de l'eau et du ministère de l'Environnement).

Sept bassins versants topographiques primaires (correspondants aux sept fleuves) ont été tracés. Ils se subdivisent en bassins secondaires et en bassins tertiaires (Illustration 7 et 8).

Fleuve côtier	Source		Embouchure	Longueur (km)	Surface du bassin versant topographique (km ²)
	Localisation	Altitude (m)			
Adour	Pic du midi de Bigorre (col du Tourmalet, Hautes-Pyrénées)	1931	Anglet-Tarnos	309	17 020
Uhabia	Goizbide (sous le nom d'Apalagako Erreka, commune d'Ustaritz)	133	Bidart	15,3	59
Baldareta	Ithurna (Saint-Jean-de-Luz)	50	Guéthary-Saint-Jean-de-Luz	2,2	2,3
Grand Isaka	Meiumentborda (Saint-Jean-de-Luz)	60	Saint-Jean-de-Luz	4,4	11
Nivelle	Urdazubi (Navarre, Espagne, sous le nom d'Ugarana)	45	Saint-Jean-de-Luz-Ciboure	45	138
Unxin	Mont du Calvaire (Urrugne)	392	Ciboure	9,5	32
Mentaberry	La Croix des Bouquets (Urrugne)	120	Urrugne	5,3	5
Bidassoa	Sources Xorroxin, Errazu (Sous le col d'Ispeguy, Navarre, Espagne)	350	Hendaye-Espagne	76	

Illustration 7 : Noms et caractéristiques principales des fleuves côtiers basques

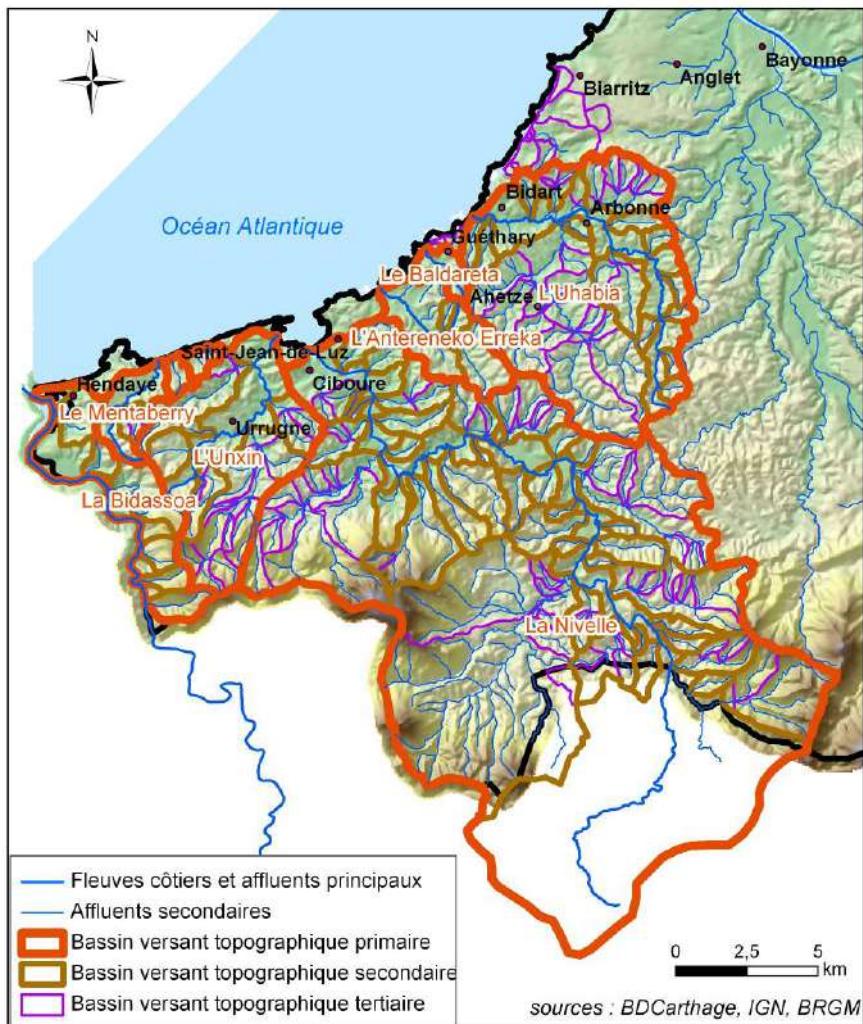


Illustration 8 : Localisation des bassins versants topographiques primaires, secondaires et tertiaires des fleuves du littoral basque

Les réseaux hydrographiques du littoral basque sont remarquables par leur géométrie symptomatique de la nature et/ou de la structure du substratum (illustration 9a). Le réseau hydrographique composé par l'Uhabia et les fleuves côtiers localisés plus au sud apparaît guidé par les discontinuités structurales majeures du substratum. En effet, d'une part, en aval de la confluence avec son principal affluent en rive gauche, l'Alhorgako Erreka, le cours de l'Uhabia suit une direction très rectiligne, est-ouest, coïncidant avec l'axe et la position d'un accident structural majeur. D'autre part, l'Uhabia, au-delà de cette confluence, son affluent majeur et les fleuves côtiers situés entre le Baldareta et le Mentaberry drainent un réseau à géométrie angulaire (Illustration 9b). Ces réseaux s'organisent selon deux directions principales, subperpendiculaires et subparallèles aux directions du littoral. On remarque, en outre, que, sur la commune d'Urrugne, les directions N72°E du littoral et N72°E et N162°E du réseau hydrographique sont proches de celles des familles de discontinuités L (entre

N65°E et N85°E) et T (entre N165°E et N175°E, Razin, 1989) qui découpent le monoclonal d'Urrugne (unité SU1, Illustration 9b). La relation existant entre les directions du réseau hydrographique, du littoral, et des discontinuités majeures n'est ici pas plus développée. Cependant, une étude détaillée de ce phénomène permettrait une meilleure compréhension de l'évolution quaternaire de la région, et représente, à ce titre, une perspective au travail présenté ici.

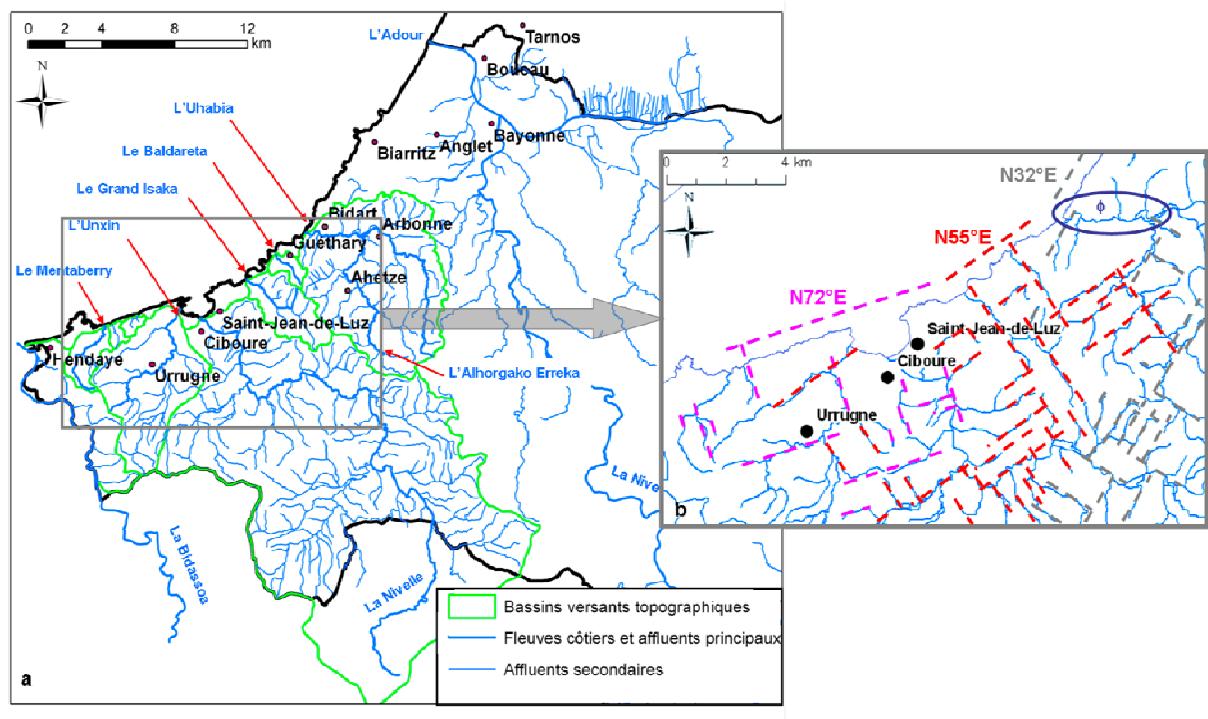


Illustration 9 : a. Réseau hydrographique principal de la Côte Basque et bassins versants topographiques associés ; b. directions principales des cours d'eau et du littoral

4. Hydrogéologie

4.1. ETAT DES CONNAISSANCES

Les marno-calcaires à faciès flysch du Crétacé supérieur du littoral basque appartiennent au domaine hydrogéologique du « flysch crétacé du piémont pyrénéen » (numéro de classification de la Base de Données des Réseaux Hydrogéologiques Français (BDRHF) – V1 : 567A ; illustration 10). Ils sont considérés comme peu perméables : « *Dans ce domaine, l'abondance des termes argileux et marneux empêche le développement de réserves souterraines importantes dans les barres calcaires du flysch. En revanche, on observe de petits aquifères localisés libres de type fissuré ou karstique en fonction des lithologies. Malgré la pluviosité importante, les sources y sont rares et à débits peu importants et irréguliers.* » (Winckel et al., 2004).

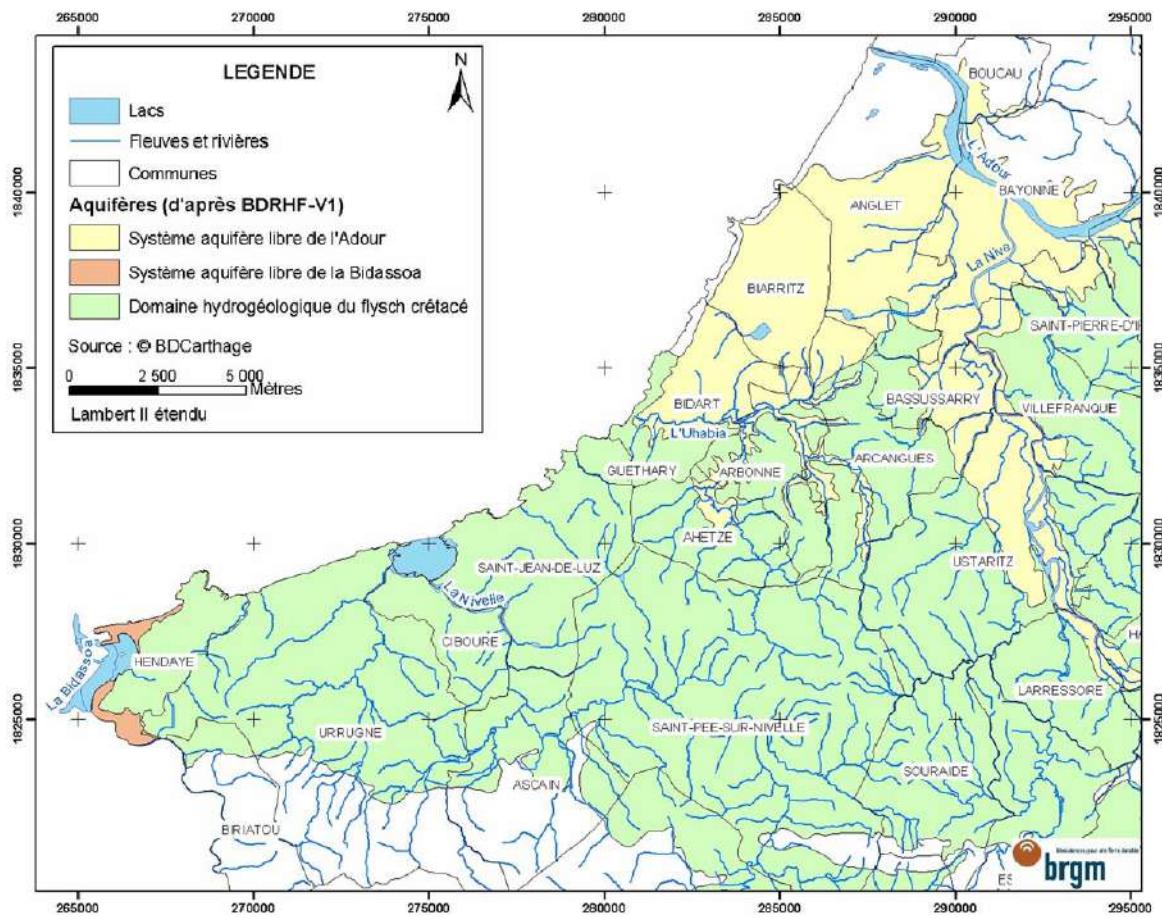


Illustration 10 : Carte du réseau hydrographique et des principaux aquifères (Winckel et al., 2004)

L'eau souterraine est, aujourd'hui, peu ou pas exploitée et l'on comprend pourquoi : la réserve de Xoldokogaina à Urrugne, sur l'Unxin, et deux réserves sur la Nivelle, desservent en eau potable toute la zone d'Hendaye jusqu'à Saint-Jean-de-Luz ; plus au Nord, Bidart et Guéthary sont alimentés par la Nive (Station d'Exhaure à Ustaritz). Cependant une observation attentive des pratiques locales et les résultats de récentes études ont permis de mieux appréhender le fonctionnement hydraulique et les axes de circulations préférentiels des eaux souterraines au sein de ces altérites et marno-calcaires. :

- au début du siècle dernier, la population rurale puisait encore l'eau aux sources ou aux puits (sources : témoignages oraux de nombreux habitants des communes d'Urrugne, d'Arbonne et de Saint-Jean-de-Luz),
- l'alimentation en eau de Guéthary était assurée, de 1912 à récemment, par la station de pompage de Ithurria (de « *iturri* » : source) qui prélève l'eau dans le massif des marno-calcaires à faciès flysch crétacés (communication orale, mairie de Guéthary),
- la toponymie est un indice précieux : de nombreux lieux-dits, sites ou villages portent un nom faisant référence à l'eau (« *Ur* » en basque) : Urrugne, en basque, se dit Urruña et signifie : « l'emplacement de l'eau » (le suffixe *-ena* est généralement utilisé pour attribuer un lieu au mot) ; de nombreuses sources sont en effet présentes sur cette commune,
- l'étude de mouvements de terrain rocheux a permis d'identifier un système karstique qui arrose les falaises de la commune d'Urrugne (Borie, 2004 ; Winckel *et al.*, 2004),
- des venues d'eau ont été enregistrées lors de la foration d'ouvrages aujourd'hui recensés dans la Base de Données du Sous-Sol (BSS ; illustration 11), ainsi que lors de la campagne de forages réalisée à l'automne 2007 dans le cadre de la mise à jour de la carte géologique de Bayonne : l'eau provenait alors soit des altérites soit de l'horizon karstifié. Dans les deux cas, elle était fréquemment captive sous des niveaux plus imperméables comme l'a démontré la remontée des niveaux piézométriques au cours des forations.

Afin d'améliorer la connaissance sur l'eau souterraine qui circule potentiellement dans le complexe géologique formé par les marno-calcaires à faciès flysch et l'altérite associée, un réseau piézométrique a été mis en place à partir de l'été 2007.

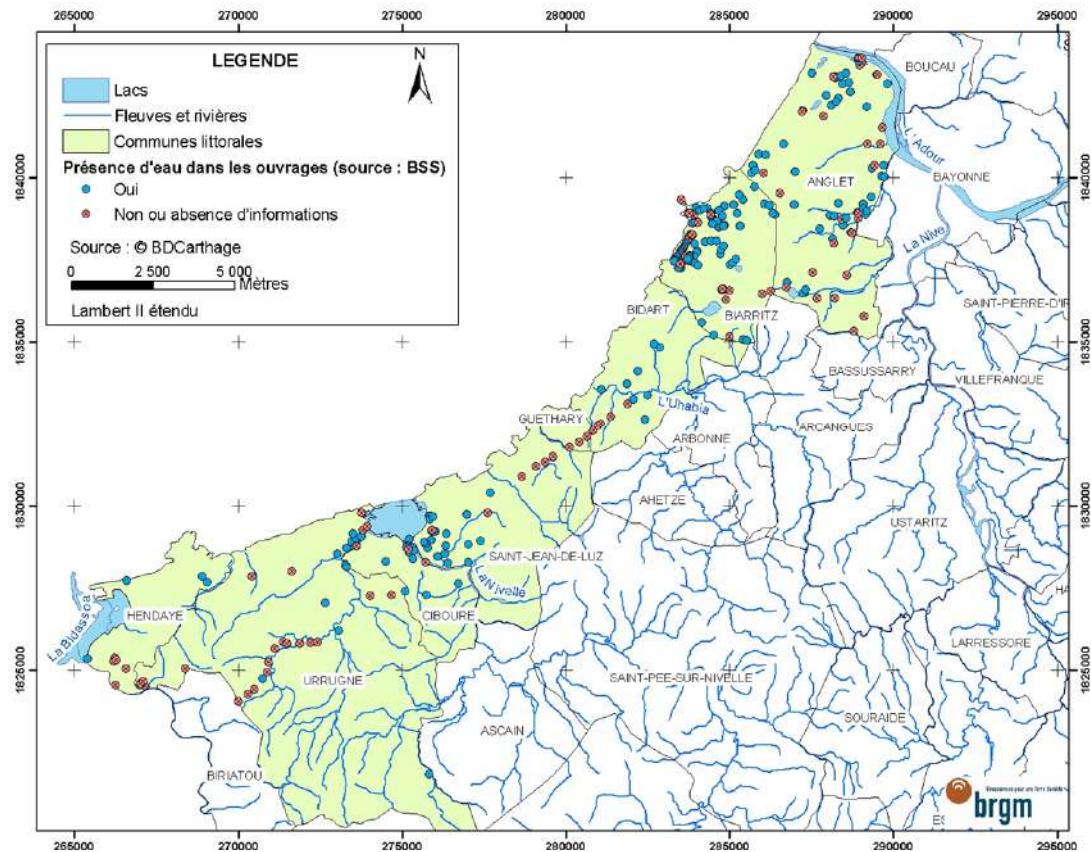


Illustration 11 : Localisation des points d'eau des communes du littoral basque issus de la BSS avec notification de la présence d'eau au moment de la foration (Winckel et al., 2004)

4.2. CONSTITUTION DU RESEAU

Un réseau de six piézomètres a été mis en place par le BRGM en juin 2007, cinq font l'objet d'un suivi (le sixième est situé en rive droite de l'Adour). Sept autres piézomètres, implantés par des bureaux d'études sont également suivis, ce qui représente un réseau de **dix piézomètres**. Il faut noter que six de ces piézomètres sont secs.

La localisation et les logs de forage de ces piézomètres, avec les niveaux statiques et dynamiques se trouvent en Annexe 6.

En complément de ces quelques piézomètres, des puits ont été recherchés chez des particuliers sur 8 communes proches du littoral (Ahetze, Arbonne, Arcangues, Bassussarry, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Urrugne). **Trente-sept puits** ont été recensés, grâce aux informations fournies en mairie et directement chez les habitants (notamment dans les fermes), ce qui a permis d'augmenter les points suivis régulièrement (piézométrie et géochimie). Les caractéristiques de ces puits (numéro d'identification, localisation, coordonnées géographiques, type, profondeur, nom du

propriétaire, surface piézométrique, résultats d'éventuelles analyses, référence des photographies, ...) ont été saisies dans une base de données sous le logiciel Access (fiche de saisie en Annexe 7) et sur le SIG de l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

Les témoignages des habitants des communes proches du littoral indiquent que l'eau était prélevée dans les sources ou les nombreux puits avant le raccordement au réseau d'eau potable (très tardif pour certaines communes, en 1958 pour Ahetze et Arbonne par exemple).

Les puits et les forages qui composent le réseau piézométrique sont localisés sur l'illustration 12. Dans le cas des piézomètres, le log lithologique est disponible ; il est alors possible de connaître avec certitude la provenance de l'eau. Dans le cas des trente-sept puits privés qui ont été mis à disposition par des particuliers, l'estimation de l'origine de l'eau a été faite grâce à la connaissance géologique du site et validée par les analyses chimiques. La connaissance géochimique des eaux souterraines est par ailleurs enrichie par le suivi de plusieurs sources localisées au cours de campagnes de relevé systématique des venues d'eau sur le littoral au printemps 2004 (Winckel et al., 2004) et renouvelées au printemps 2006 (illustration 12). En outre, les sources suivies au cours de travaux antérieurs sur le littoral et dans l'arrière-pays proche, dont l'étude a permis de mettre en évidence l'existence d'un aquifère fracturé voir karstique dans le Flysch marno-calcaire de Socoa (Borie, 2004 ; Borie et al., 2004 et 2005), ont été intégrées aux suivis.

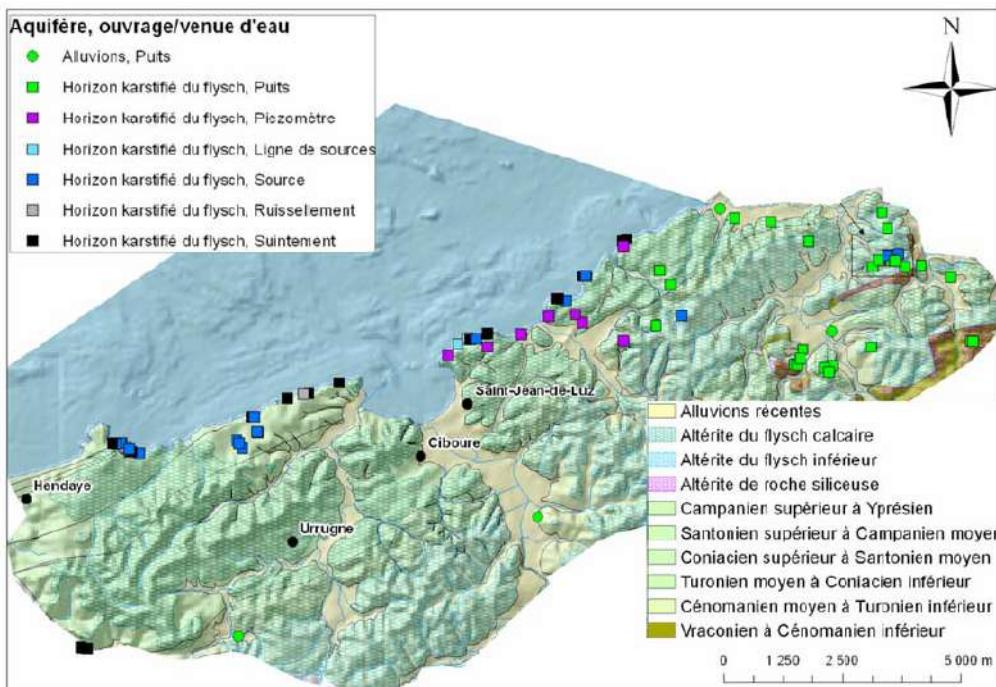


Illustration 12 : Localisation des piézomètres, puits et sources intégrés dans le réseau de suivi des nappes souterraines dans le domaine du flysch sur fond de carte lithologique

4.3. PHYSICO-CHIMIE DES NAPPES DE LA COTE BASQUE

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines permet de déterminer le faciès de l'eau et les éventuelles corrélations entre les différents points suivis (puits, piézomètres ou sources). La mise en évidence de caractéristiques similaires pourra laisser penser que les eaux proviennent d'un même aquifère.

Plusieurs techniques d'études et méthodes de présentation ont été mises en œuvre pour synthétiser les données physico-chimiques et les interpréter :

- les diagrammes de Piper où sont représentées toutes les teneurs en ions majeurs sur un même graphique,
- le calcul d'indices de saturation pour mettre en évidence les minéraux en équilibre dans l'eau,
- les analyses factorielles qui synthétisent l'ensemble des données et mettent en évidence les relations entre variables.

4.3.1. Types de données

Vingt-deux prélèvements (illustration 13) ont été effectués dans des puits, des piézomètres ou des sources, entre septembre 2007 et juin 2008. Lors du prélèvement, les paramètres physiques de l'eau (T° , pH, conductivité et dans certains cas potentiel rédox et oxygène dissous) ont été mesurés *in situ*. L'analyse chimique des échantillons, réalisée à l'Institut Européen de l'Environnement de Bordeaux (IEEB), concerne les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), le titre hydrotimétrique, les matières en suspension, la teneur en silice et l'extrait sec.

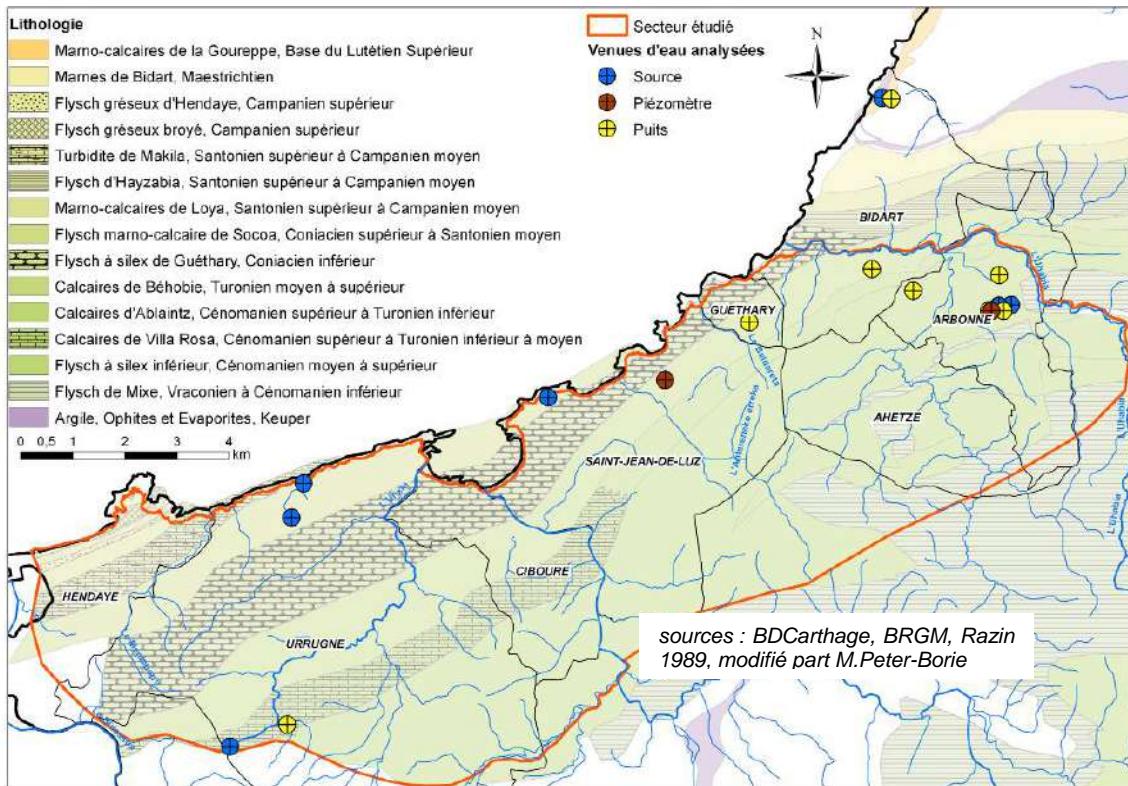


Illustration 13 : Carte de localisation des différents types de points d'eau analysés (piézomètre, puits ou source)

4.3.2. Résultats des analyses

La concentration en ions majeurs donne de nombreuses informations sur le fonctionnement des aquifères. En effet, chaque ion a une origine précise (interne, météorique, anthropique, etc.) et fournit des renseignements sur la lithologie, la présence d'évaporites, l'influence d'eaux superficielles ou marines, etc. (Corbier, 1999).

Les résultats des analyses chimiques ont été présentés sous forme d'un diagramme de Piper (illustration 14). Les analyses des différents points ont été effectuées entre septembre 2007 et mai 2008. Les prélèvements n'ayant pas eu lieu pendant les mêmes saisons, il faudra rester vigilant lors de l'interprétation des résultats.

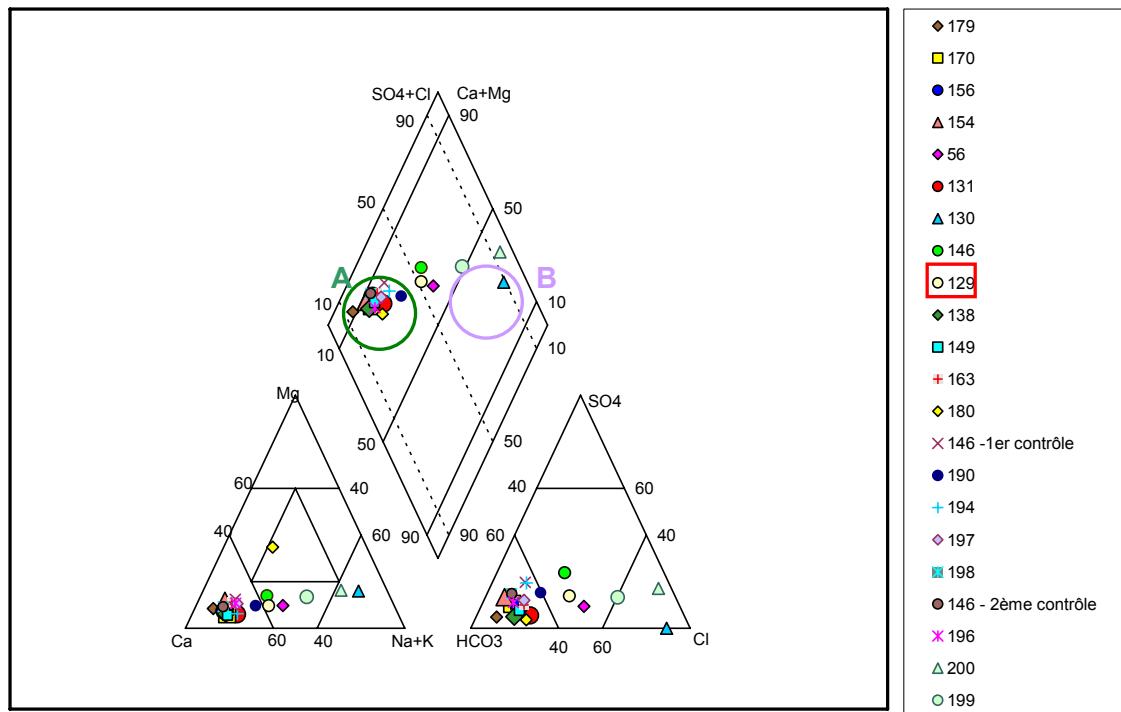


Illustration 14 : Diagramme d'analyse d'eau de type de Piper des puits, piézomètres et sources analysés sur la Côte Basque

On constate que la majorité des eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique (groupe A sur l'illustration 14), en accord avec la nature du terrain (flysch carbonaté) ou chloruré sodique (groupe B) pour celles prélevées en bord de mer (N°56 et 129) dans les formations plio-quaternaires. On est donc en présence de deux aquifères bien distincts et indépendants, l'un dans les flyschs et l'autre dans les formations plio-quaternaires. Cependant les paramètres physico-chimiques des différentes eaux prélevées sont très variables selon la date de mesure et le type de venue d'eau analysée (illustration 15).

Concentration (mg/L)	Eaux bicarbonatées calciques				Eaux chlorurées sodiques			
	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<i>Ca</i>	17,9	154,0	85,1	35,9	30,2	164,0	112,3	54,7
<i>Mg</i>	3,2	10,2	6,5	1,8	13,8	118,0	35,9	41,1
<i>Na</i>	8,9	36,6	20,6	8,2	91,4	967,0	277,3	345,0
<i>K</i>	1,1	8,5	2,8	2,2	4,0	42,2	13,0	14,8
<i>HCO₃</i>	85,8	424,0	244,7	95,9	24,2	425,5	260,9	155,2
<i>SO₄</i>	3,4	52,6	32,0	15,2	0,0	96,2	53,3	30,9
<i>Cl</i>	15,2	65,7	33,8	14,7	175,0	1700,0	497,2	601,7
<i>SiO₂</i>	7,6	22,1	12,4	3,7	4,2	9,0	6,4	2,0
<i>T (°C)</i>	11,7	16,7	14,2	1,5	11,2	14,4	13,4	1,1
pH	5,9	7,6	6,7	0,4	7,1	8,3	7,5	0,4
Conductivité (µS/cm)	206,0	927,0	532,0	190,8	787,0	4640,0	1829,4	1429,5

Illustration 15 : Synthèse des analyses chimiques réalisées sur les puits, piézomètres et sources de la Côte Basque

➤ Eaux bicarbonatées calciques

La température varie autour d'une moyenne de 14,2°C, ce qui correspond globalement à la température moyenne annuelle de l'air (13,8°C à Biarritz).

Les valeurs de conductivité sont très dispersées, ce qui indique une minéralisation variable.

➤ Eaux chlorurées sodiques

Ces eaux sont fortement chargées en sodium et chlorures, ce qui semble indiquer une forte influence marine (pénétration d'eau de mer et mélange avec l'eau douce ou plus probablement par lessivage du sol contaminé par les embruns). Peu de points de ce genre ont été analysés, ce qui ne permet pas de tirer de conclusions précises.

➤ Point particulier : piézomètre N°146

L'eau prélevée dans le piézomètre N°146 à Arbonne se distingue des autres (encadré en rouge sur l'illustration 14), y compris des venues d'eau analysées à proximité : elle présente des caractéristiques particulières (température élevée, pH acide, faible conductivité, teneur plus élevée en Na et Cl, ...). Ce phénomène suggère une origine de l'eau différente de celle des ouvrages voisins et donc probablement la présence d'un système complexe avec plusieurs petits aquifères superposés plus ou moins connectés. Le secteur fait donc l'objet d'études plus approfondies, à savoir des analyses chimiques de contrôle au niveau du piézomètre et une étude des sources présentes à proximité.

D'autres analyses seront nécessaires pour déterminer l'origine de cette particularité. Des traçages permettraient vraisemblablement de déterminer le ou les exutoires de la nappe.

Un calcul d'indice de saturation a été réalisé afin de déterminer plus précisément la nature des minéraux en équilibre dans cette eau ainsi que les roches lessivées par l'eau.

4.3.3. Calcul des indices de saturation

L'indice de saturation (IS) représente l'écart à l'équilibre thermodynamique. Un indice de saturation nul signifie que l'eau est en équilibre avec le minéral étudié. L'eau sera sous saturée si $IS < 0$ (dissolution du minéral) et sursaturée si $IS > 0$ (précipitation du minéral). Les calculs ont été réalisés grâce au logiciel PhreeqC diffusé par l'US Geological Survey. Les résultats détaillés sont donnés en Annexe 3.

➤ Eaux bicarbonatées calciques

Le calcul d'indice de saturation réalisé pour les eaux bicarbonatées calciques « classiques » (correspondant à la majorité des analyses) confirme l'équilibre avec la calcite (pas avec la dolomite) et les silicates (calcédoine).

➤ Point particulier : piézomètre N°146

Le piézomètre N°146 situé à Arbonne (Annexe 6) a particulièrement été étudié, comme indiqué précédemment (cf. chapitre 4.6.2). Les indices de saturation indiquent que l'eau est en équilibre avec la silice mais sous-saturée en calcite. Or l'équilibre avec la calcite s'établit assez rapidement au contact d'une roche carbonatée. On peut donc conclure que cette eau n'a pas circulé dans le flysch carbonaté. Elle n'a été en contact qu'avec des alumino-silicates. Par ailleurs, le contact avec des évaporites est exclu à cause de la sous-saturation en halite et gypse. Ainsi, il est plausible que cette eau ait circulé dans les altérites, plus probablement dans un banc sableux ou un niveau de chailles fracturé, plus perméables que les niveaux argileux. Il s'agit d'un résultat important qui confirme la présence de circulations d'eau au sein des altérites.

Les résultats obtenus pour le piézomètre N°146 confirment la complexité et l'hétérogénéité du milieu étudié. Ceci ouvre différentes perspectives d'études plus approfondies de cette zone particulière.

4.3.4. Analyse en composantes principales (ACP)

Grâce à l'analyse en composantes principales, on peut mettre en évidence des groupes de variables et d'individus à partir d'une matrice de données (analyses physico-chimiques ici). La méthodologie est expliquée en Annexe 4.

Une ACP a été réalisée sur les résultats des prélèvements afin de pouvoir distinguer d'éventuelles corrélations entre les paramètres physico-chimiques et les points d'eau. Le logiciel XLSTAT a été utilisé pour traiter l'ensemble des données.

Une première ACP a été effectuée sur l'ensemble des 22 points d'eau analysés et pour les 10 paramètres physico-chimiques suivants : teneurs en ions majeurs (nitrates exclus), conductivité, pH et température (illustration 16).

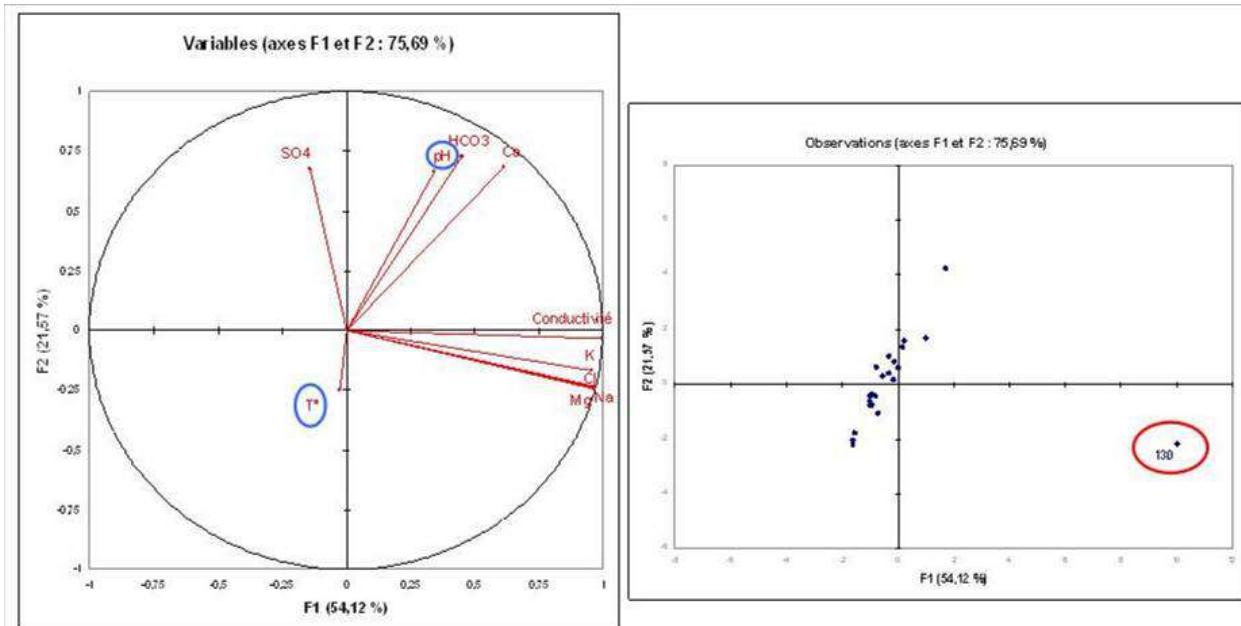


Illustration 16 : Position des variables (à gauche) et des individus (à droite) dans le plan principal (axes I et II)- ACP sur l'ensemble des données

Les deux premiers facteurs expliquent 75% de la variance totale. Cette première analyse ne permet pas de déterminer plusieurs groupes de variables et d'individus. En effet, un point excentré (N°130, très fortement influencé par la mer, en rouge sur la carte des individus) empêche l'étalement des points. De même, certaines variables éloignées du cercle de corrélation sont mal représentées (température et pH, en bleu). De nouvelles ACP ont donc été réalisées en éliminant ces variables et les points isolés fortement typés (illustration 17).

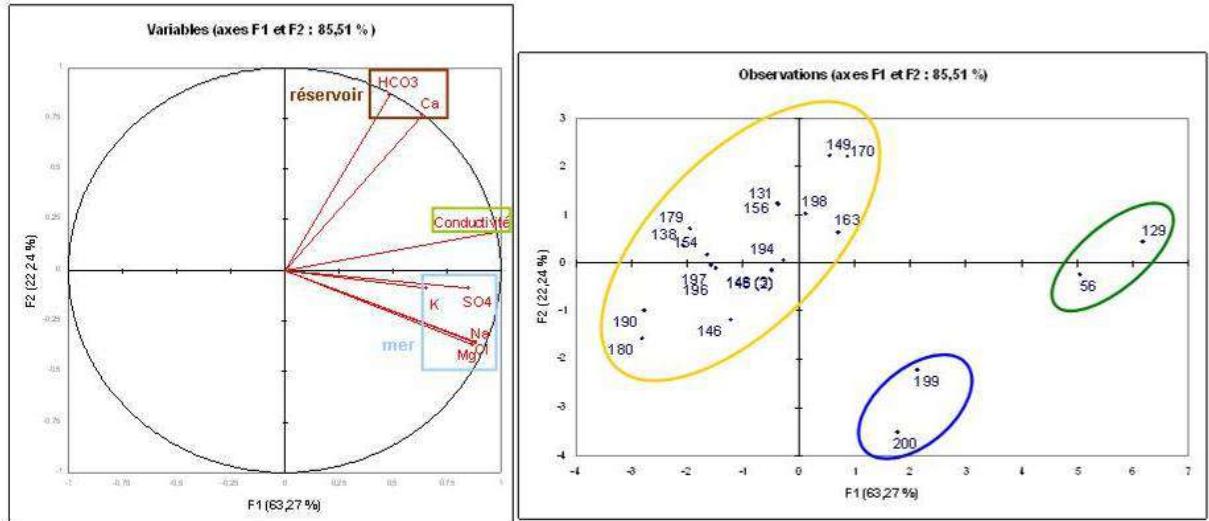


Illustration 17 : Position des variables (à gauche) et des individus (à droite) dans le plan principal (axes I et II) – ACP après suppression du point N°130, du pH et de la température

Les deux premiers facteurs expliquent 85% de la variance totale. Dans l'espace des variables (repère bidimensionnel formé par les axes 1 et 2), 3 pôles se dégagent :

- un pôle marqué par les ions bicarbonates et le calcium, correspondant au « réservoir » (c'est-à-dire l'aquifère du flysch carbonaté), en marron ;
- un pôle représentant l'influence marine et regroupant notamment les ions K^+ , SO_4^{2-} , Na^+ et Cl^- , en bleu ;
- un pôle « conductivité », en vert. La position intermédiaire de la conductivité (entre les 2 autres pôles) indique que la minéralisation est due à la fois aux minéraux issus du réservoir et à ceux d'origine plus superficielle, voire marine.

Des groupes d'individus peuvent aussi être mis en évidence :

- 2 points (en bleu) subissent une forte influence marine,
- la majorité des points (en jaune) sont peu marqués et ne semblent influencés par aucun pôle,
- 2 points fortement minéralisés (en vert) ont un marquage mixte entre le réservoir et l'influence marine.

Une dernière analyse (illustrations 18 et 19) a été effectuée en ne conservant que les points peu discriminés, entourés en jaune sur l'illustration 17. La matrice des corrélations, les valeurs propres et les coordonnées des variables sont données en Annexe 4.

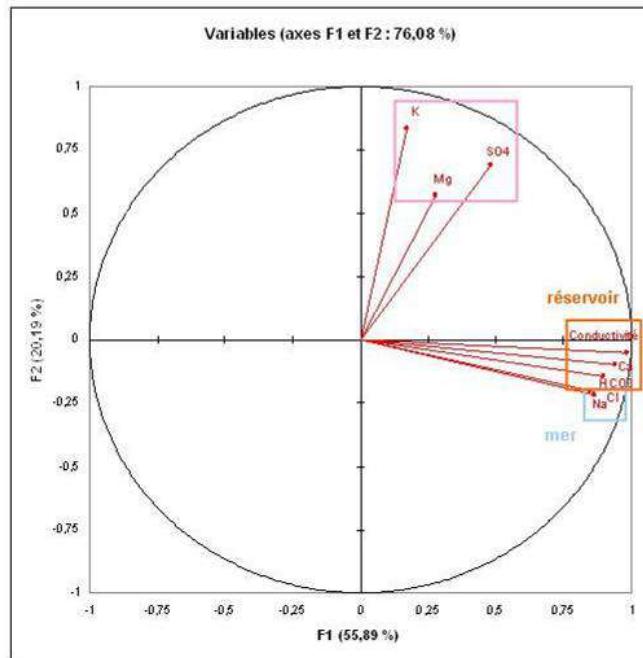


Illustration 18 : Position des variables dans le plan principal (axes I et II) – ACP sur les points peu discriminés, après suppression du pH et de la température

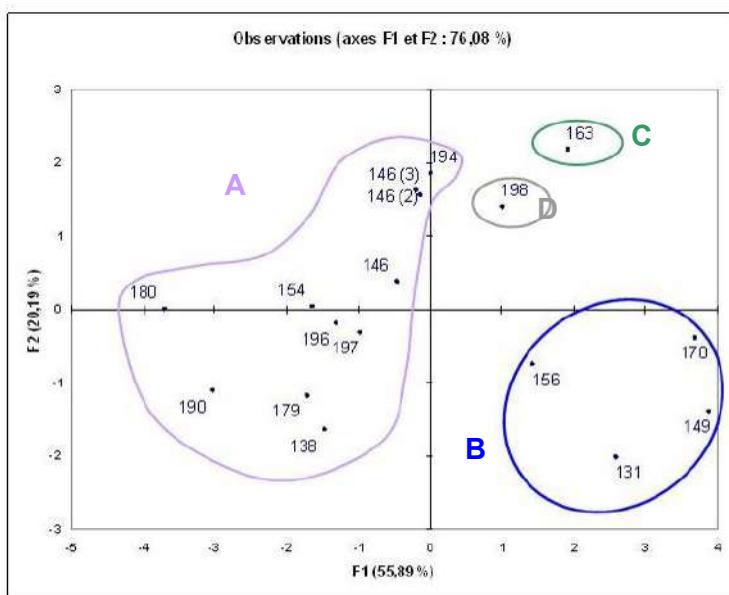


Illustration 19 : Position des individus dans le plan principal (axes I et II) – ACP sur les points peu discriminés, après suppression du pH et de la température

Les deux premiers facteurs expliquent 76% de la variance totale. L'axe 1 est principalement influencé par la conductivité (21%), le calcium (19%) et les

bicarbonates (18%). L'axe 2 est influencé par le potassium (43%), les sulfates (29%) et le magnésium (20%).

Dans l'espace des variables, on distingue plusieurs pôles :

- un pôle comprenant la conductivité, le calcium et les bicarbonates, en orange ;
- un pôle à influence marine regroupant les ions Na^+ et Cl^- , en bleu ;
- un pôle constitué de 3 variables, le potassium, le magnésium et les sulfates, en rose. Ce pôle pourrait indiquer une contamination (activité agricole par exemple) et/ou la présence d'argile.

Dans l'espace des individus, 4 groupes se détachent :

- la majorité des points (A, en violet) sont peu marqués et peu minéralisés,
- 4 points (B, en bleu) présentent une minéralisation importante et semblent s'opposer à tous les autres points. Ceci pourrait correspondre à un temps de séjour plus important ou à une influence marine plus marquée que les autres points,
- 1 point (C, N°163 en vert) est fortement influencé par les sulfates. Or le puits analysé se trouve dans un verger. On peut donc supposer que la forte teneur en sulfates s'explique par les traitements appliqués aux arbres,
- 1 point (D, N°198 en gris) est très influencé par le potassium. Ce marquage pourrait s'expliquer par l'origine de cette source, qui provient d'un niveau argileux.

L'ACP permet donc de mettre en évidence des groupes de puits/sources/piézomètres aux caractéristiques proches ainsi que des groupes de paramètres physico-chimiques à l'origine des propriétés de l'eau. Grâce à cette analyse, les particularités de certains points ont pu être distinguées (contamination de l'eau par des sulfates utilisés comme traitement agricole, forte influence marine, etc.). On constate que certaines eaux prennent davantage la signature du réservoir carbonaté alors que d'autres ont un marquage plutôt marin.

D'autre part, les analyses des différents points n'ont pas été effectuées à la même période. Ceci peut avoir une influence sur les propriétés physico-chimiques mais les points gardent tout de même un marquage caractéristique.

Par ailleurs, l'ACP a montré qu'il n'existe pas de lien entre les teneurs en calcium et en magnésium, ce qui exclut donc toute interprétation du rapport Mg/Ca en termes de temps de séjour. En effet, le calcium provient du réservoir carbonaté contrairement au magnésium qui pourrait être, quant à lui, issu de traitements ou des argiles (à confirmer).

4.3.5. Influence de la distance à la côte

La proximité de l'océan influence de manière significative la composition chimique de la pluie (notamment la teneur en chlorures) et donc celle des eaux souterraines, de manière plus atténuée.

Les relations entre les différents paramètres analysés et la distance à la côte (perpendiculairement au trait de côte) ont été étudiées. On note une diminution globale logique des chlorures, du sodium et de la conductivité en s'éloignant du littoral (graphiques présentés en Annexe 5). Cependant les points localisés sur la commune d'Arbonne montrent une grande variabilité pour ces paramètres, ce qui témoigne de la complexité du système étudié.

4.3.6. Conclusion

Les analyses physico-chimiques ont révélé la présence de différents types d'eau sur le littoral basque : bicarbonatées calciques et chlorurées sodiques. Ces deux faciès sont conformes aux caractéristiques de la zone étudiée, à savoir un massif carbonaté proche de l'océan.

L'étude des teneurs en ions majeurs permet de valider certaines hypothèses formulées préalablement. On est bien en présence d'un aquifère karstique complexe, avec une nappe à l'interface flysch/altérites et des circulations d'eau au sein des altérites. La poursuite de ces analyses devrait permettre de mieux comprendre les particularités de cet aquifère.

4.4. REPONSES DU SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE AUX PRECIPITATIONS

Il est intéressant d'étudier une éventuelle corrélation entre les précipitations, les variations de la surface piézométrique et l'évolution des paramètres physico-chimiques des différents points d'eau. Les données piézométriques ne sont pas assez nombreuses pour réaliser des corrélogrammes avec les précipitations mais il s'agit d'une étude à développer afin de déterminer la réponse des aquifères à la pluie. Ceci permettra de vérifier l'hypothèse d'un comportement karstique, avec une réponse rapide à la pluie.

Le niveau d'eau dans les piézomètres est suivi depuis leur implantation et, est complété par celui mesuré dans les puits depuis juillet 2007. Dans l'aquifère formé par l'horizon karstifié, les battements de nappe sont rapides et importants (3,6 m mesurés au maximum entre août 2007 et avril 2008 au piézomètre n°149 ; illustration 20).

L'illustration 21 présente les variations de la cote NGF du niveau piézométrique dans quatre piézomètres par rapport au niveau minimal mesuré au cours de la période de suivi. Les plus bas niveaux d'eau sont mesurés les 8 et 17 août 2007 et le 3 mars 2008 ; ils sont consécutifs à des périodes relativement sèches (les mois de juillet 2007 et février 2007 enregistrent un déficit en eau particulièrement important par rapport aux moyennes mensuelles de 1921 à 2008). Au contraire, les plus hauts niveaux piézométriques font suite à des périodes particulièrement arrosées, comme par exemple, le mois d'avril 2008. L'épisode pluvieux important du 23 mai 2008 (29 et 40 mm en 24 h respectivement à Biarritz et Socoa) engendre une augmentation du niveau de la nappe enregistré le 26 mai 2008. Le pas des chroniques piézométriques n'est pas suffisamment dense et régulier pour estimer le temps de réponse du niveau

piézométrique suite aux précipitations. Cependant, au niveau des ouvrages présentés ici, on observe des temps de latences égaux, au plus, à trois jours.

Une étude détaillée a été menée sur les battements de la nappe captée par le piézomètre N°146 à Arbonne (localisation sur la carte en Annexe 6), les résultats des analyses physico-chimiques présentent des différences avant et après un épisode pluvieux (augmentation de la conductivité, des teneurs en calcium et en magnésium après la pluie parallèlement à une diminution des teneurs en chlorures et sodium). Le faciès de l'eau varie selon les précipitations. Dans ce système karstique, on pourrait envisager le phénomène d'effet piston, avec un mélange d'eaux d'origines différentes lors des précipitations. Il faudrait pour cela réaliser de nouvelles analyses en périodes sèche et pluvieuse.

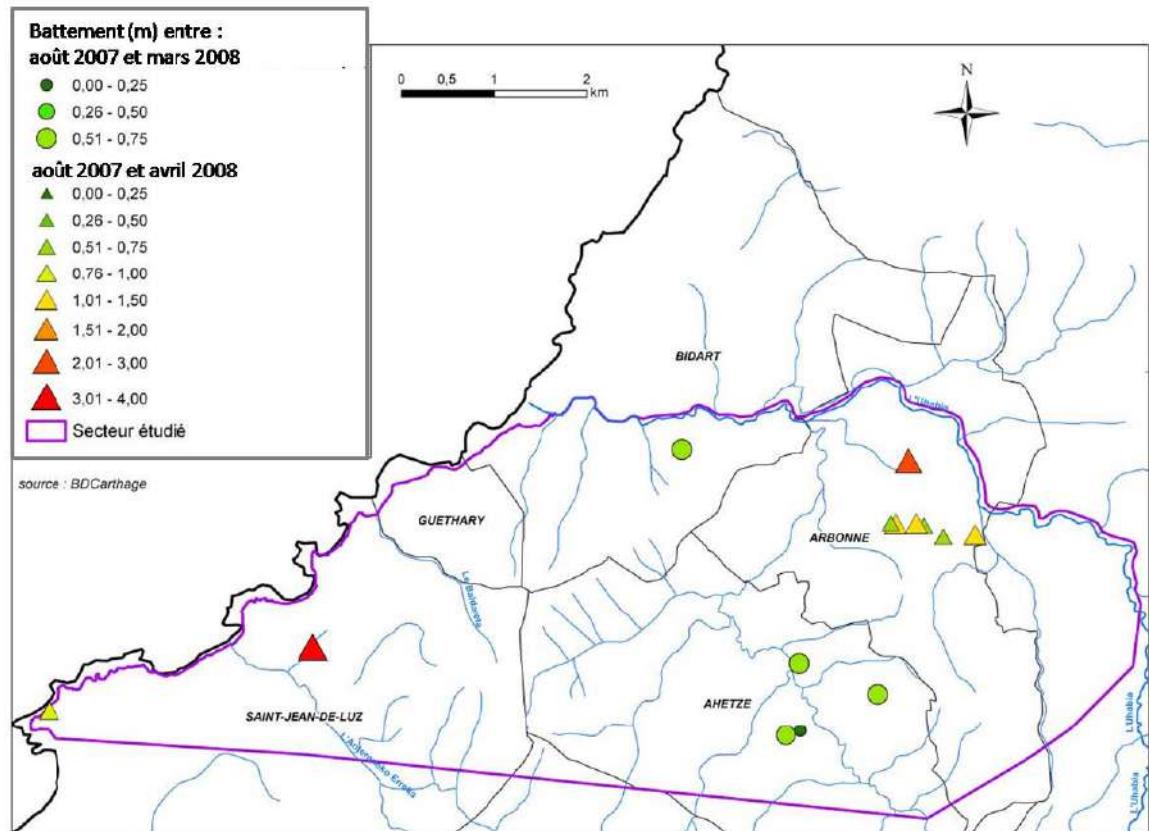


Illustration 20 : Carte des battements des nappes

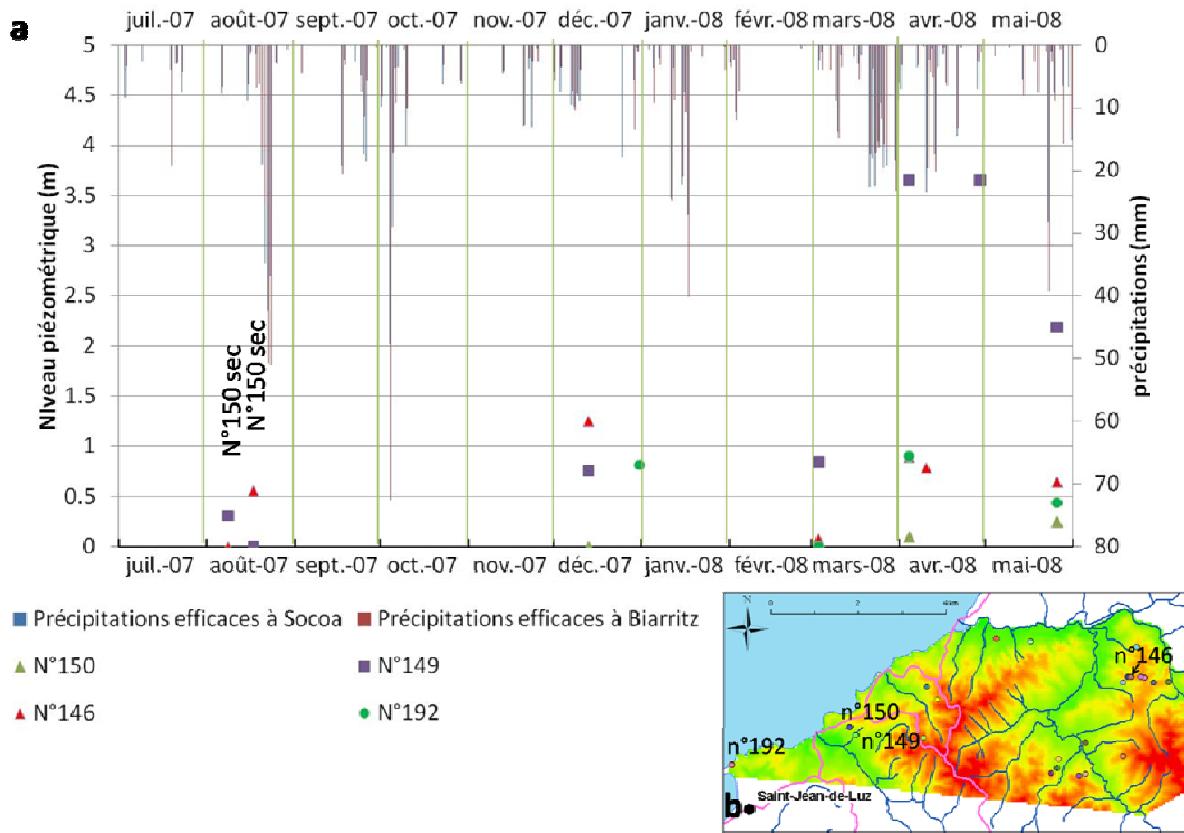


Illustration 21 : a. Variations de l'altitude des niveaux piézométriques par rapport au minimum mesuré de août 2007 à mai 2008 et précipitations efficaces au cours de cette période ; b. localisation des ouvrages (légende : voir illustration 32)

En outre, le suivi des débits de deux sources émergeant des falaises de la commune d'Urrugne (Borie *et al.*, 2004) met en évidence une réponse très rapide du débit des sources suite aux précipitations (illustration 22) : moins de trois jours sont nécessaires. Les niveaux et débits associés de(s) nappe(s) de l'horizon karstifié apparaissent ainsi reliés aux précipitations dans un délai très court.

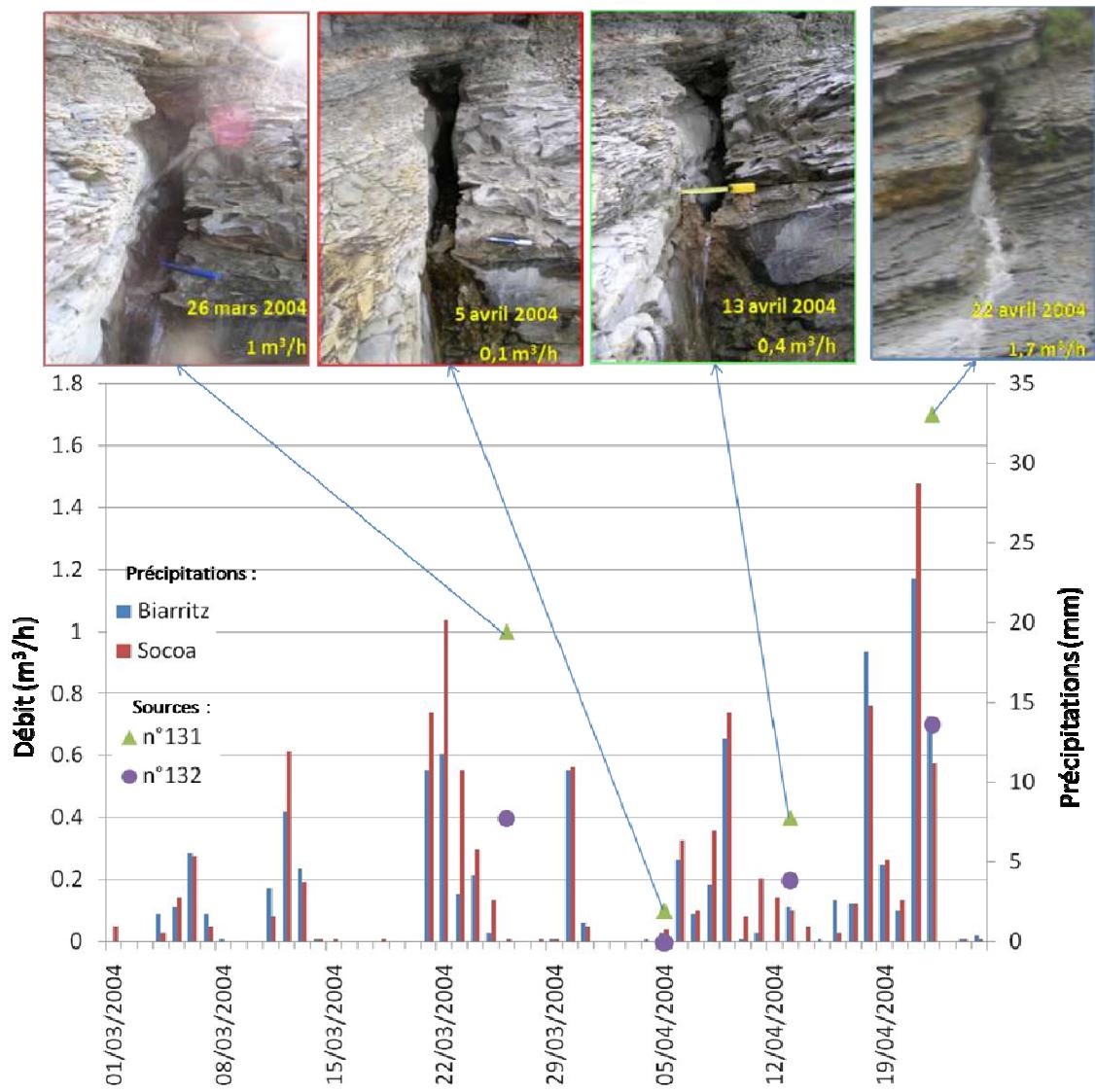


Illustration 22 : Relation entre les débits de deux sources et les précipitations

Il apparaît ainsi que l'alimentation en eau de ce système aquifère s'effectue, du moins en partie, par l'eau de pluie qui tombe dans un rayon suffisamment proche pour permettre une réponse rapide de la nappe. Plusieurs hypothèses sont proposées pour la ou les zones d'alimentation (l'*impluvium* peut être multiple) :

- alimentation par le réseau hydrographique. Cette hypothèse est néanmoins peu probable : les gradients hydrauliques estimés laissant plutôt penser l'inverse à savoir une alimentation des cours d'eau par la nappe,
- alimentation par les systèmes souterrains des formations du substratum localisées plus à l'Est,

- alimentation par infiltration directe dans les zones où les marno-calcaires à faciès flysch affleurent (zones non recouvertes par les altérites). Cette alimentation directe dans l'aquifère peut expliquer les temps de réponses courts,
- alimentation par les nappes alluviales plio-quaternaires.

La quantité de données disponibles et sa répartition, tant dans le temps que dans l'espace, sont insuffisantes pour des interprétations plus détaillées : d'une part, un échantillonnage à pas de temps mensuel sur un cycle hydrogéologique complet (1 an) aurait été nécessaire à l'étude de la représentativité des variations saisonnières (Bakalowicz, 1977) et d'autre part, le peu de données au Sud de la zone étudiée interdit toute interprétation régionale pertinente. En outre, la connaissance détaillée des transits dans l'aquifère formé par l'horizon karstique nécessite un suivi des précipitations, débits et niveaux piézométriques à un pas de temps journalier voire moindre. La connaissance des réseaux qui irriguent l'horizon karstifié nécessite donc des études complémentaires qui doivent s'exprimer sous la forme d'un suivi plus régulier et plus dense, sur une période plus longue des puits, piézomètres et sources ainsi que de la constitution d'un réseau plus dense et homogène sur l'ensemble de la zone littorale mais aussi de l'arrière-pays proche.

4.5. ETUDE PIEZOMETRIQUE

Les relevés piézométriques ont été effectués dans les 37 puits et 11 piézomètres avec un pas de temps irrégulier (selon les disponibilités sur le terrain). Les variations des niveaux piézométriques pour 5 piézomètres sont représentées en Annexe 8. Les résultats du suivi laissent penser que niveaux piézométrique et topographique sont liés : le niveau des nappes suit la surface topographique comme indiqué sur l'illustration 23.

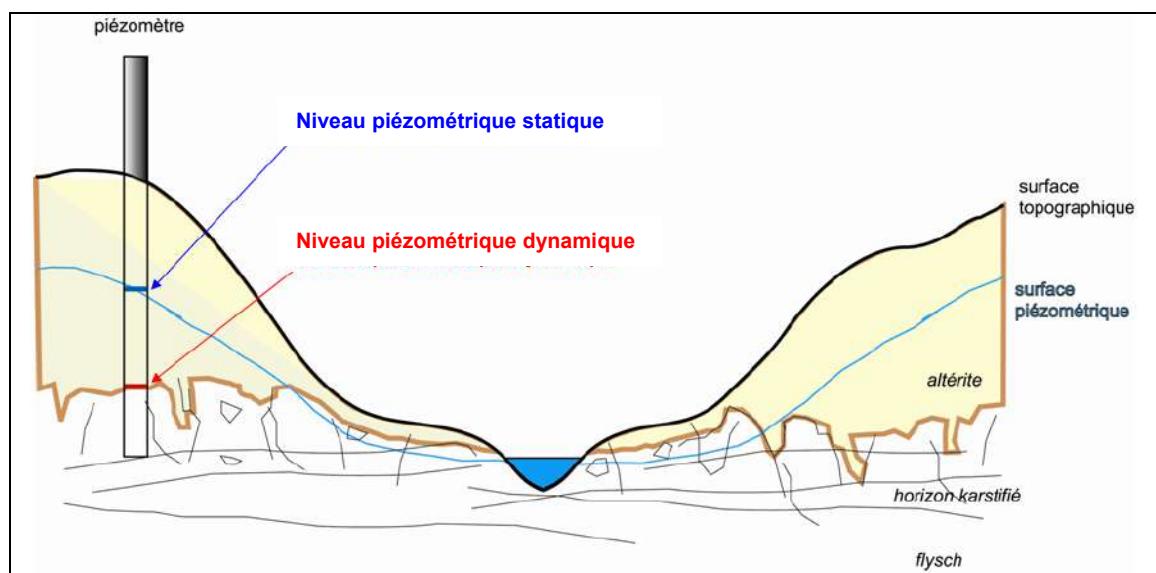


Illustration 23 : Relation entre le niveau piézométrique et la surface topographique

Les piézomètres captent l'eau qui circule à l'interface de la roche-mère et de l'altérite, au sein de l'horizon karstifié. Lors de la foration des piézomètres, le toit de la nappe apparaît fréquemment à une cote inférieure au niveau piézométrique : en de nombreux points, l'eau qui circule dans l'horizon karstifié est donc captive sous les altérites. Des différences d'altitudes de plusieurs mètres sont mesurées entre ces deux niveaux. Néanmoins, comme les résultats de la sonde Humitub ont permis de le démontrer (rapport BRGM/RP-56876-FR), l'eau peut circuler dans l'altérite, qui n'est donc pas une roche totalement imperméable ; c'est pourquoi nous préférons utiliser le terme de nappe(s) semi-captive(s) dans l'horizon karstifié.

4.5.1. Essai d'estimation d'une carte piézométrique

Etant donné l'apparente complexité du système aquifère, le réseau piézométrique, même complété par les puits, est aujourd'hui insuffisant tant au point de vue du nombre d'ouvrages qu'à celui de la régularité de couverture pour réaliser une carte piézométrique détaillée sur le domaine d'étude. Cependant, un modèle de géométrie de nappe dans des formations altérées est proposé par Wyns (1999), partant du principe qu'une relation linéaire existe entre deux paramètres (illustration 24) :- a , qui est la distance verticale entre l'altitude du sol et celle d'une surface virtuelle, estimée par interpolation (krigeage) de l'altitude des talwegs à cours d'eau pérenne (dite « surface enveloppe de la base des talwegs »),

- b , qui est la distance verticale entre l'altitude de la surface piézométrique et la « surface enveloppe de la base des talwegs ».

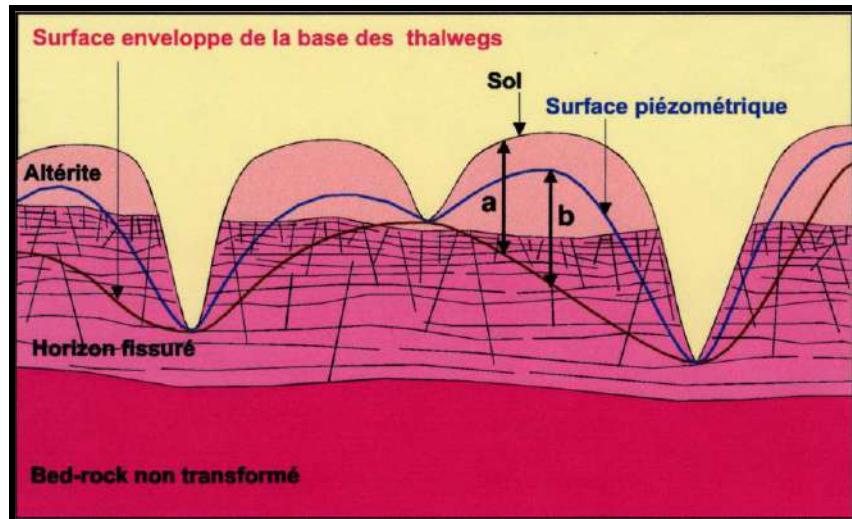


Illustration 24 : Détermination des paramètres a et b nécessaire à l'estimation de la surface piézométrique (Wyns, 1999)

Ce modèle, développé pour les roches de socle altérées, n'est, *a priori*, pas adapté au milieu karstique. Il a en effet été appliqué pour des aquifères fracturés (dans l'horizon fissuré qui correspond à la zone de transition entre la roche-mère (bed-rock non transformé) et l'altérite ; illustration 24) situés à la base d'une altérite argilo-silteuse.

Néanmoins, les circulations d'eau dans les aquifères fracturés sont, comme dans les milieux karstiques, chenalées. A cet égard, la surface piézométrique n'est, dans les deux cas, probablement pas simple à grande échelle. Le modèle, qui s'applique à petite échelle, lisse les irrégularités liées à la chenalisation des écoulements, et, on peut supposer que les circulations d'eau sont, alors, quasiment équivalentes, que l'aquifère soit fracturé ou karstifié. C'est pourquoi nous proposons d'appliquer cette méthode pour l'estimation de la surface piézométrique de la ou des nappes de l'horizon karstifié surmonté des altérites, moyennant, d'une part, la vérification de la relation entre a et b , et, d'autre part, les trois hypothèses suivantes :

- les nappes, si il y en a plusieurs, sont connectées les unes aux autres dans l'aquifère formé par l'horizon karstifié,
- le système est captif sur toute la zone d'étude : le toit de l'aquifère est situé à l'interface de la roche-mère et de l'altérite et la surface piézométrique n'est pas fonction de la géométrie des discontinuités qui conduisent l'eau, mais présente une certaine régularité à l'échelle de l'étude,
- la nappe alimente les cours d'eau qui en constituent l'exutoire ce qui implique que la charge hydraulique de la nappe en ces points est équivalente à celle du cours d'eau.

La relation entre les paramètres a et b définis ci-dessus (illustration 24) est étudiée sur un secteur situé au nord de la baie de Saint-Jean-de-Luz, retenu car il concerne la majorité des points de mesures. Pour cela, la « surface enveloppe de la base des talwegs » est, dans un premier temps, estimée par modélisation géostatistique sur une maille carrée de 50 m (illustration 26 ; écart-type d'estimation : illustration 26) par krigage avec modèle de variogramme (illustration 27 et 28), grâce au logiciel GDM (Geological Data Management). Ce logiciel est développé et utilisé par le BRGM pour la modélisation géologique (géostatistiques, interpolation, modélisation en 3D, etc). Son fonctionnement est décrit en Annexe 9.

Le variogramme est réalisé à partir des points issus des courbes de la BD CARTHAGE (découpage des cours d'eau tous les 50 m), sur lesquels l'altitude de la surface topographique (issue du Modèle Numérique de Terrain, BDAlt de l'IGN) a été projetée.

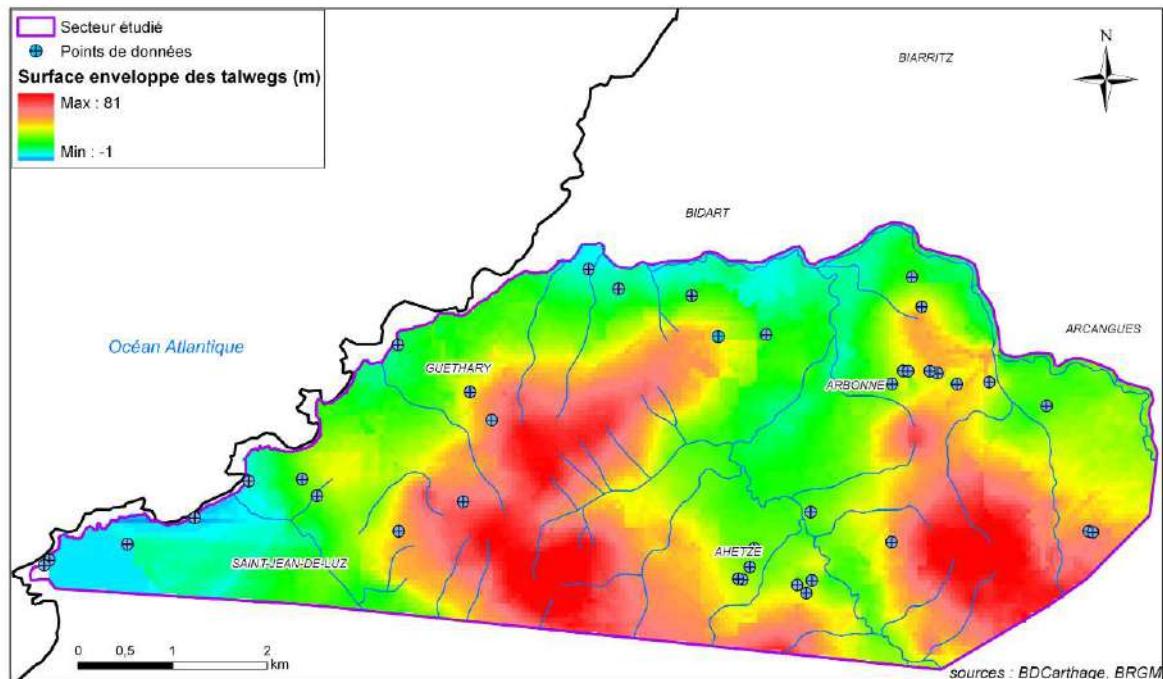


Illustration 25 : Carte de la surface enveloppe des rivières pérennes et points d'eau mesurés

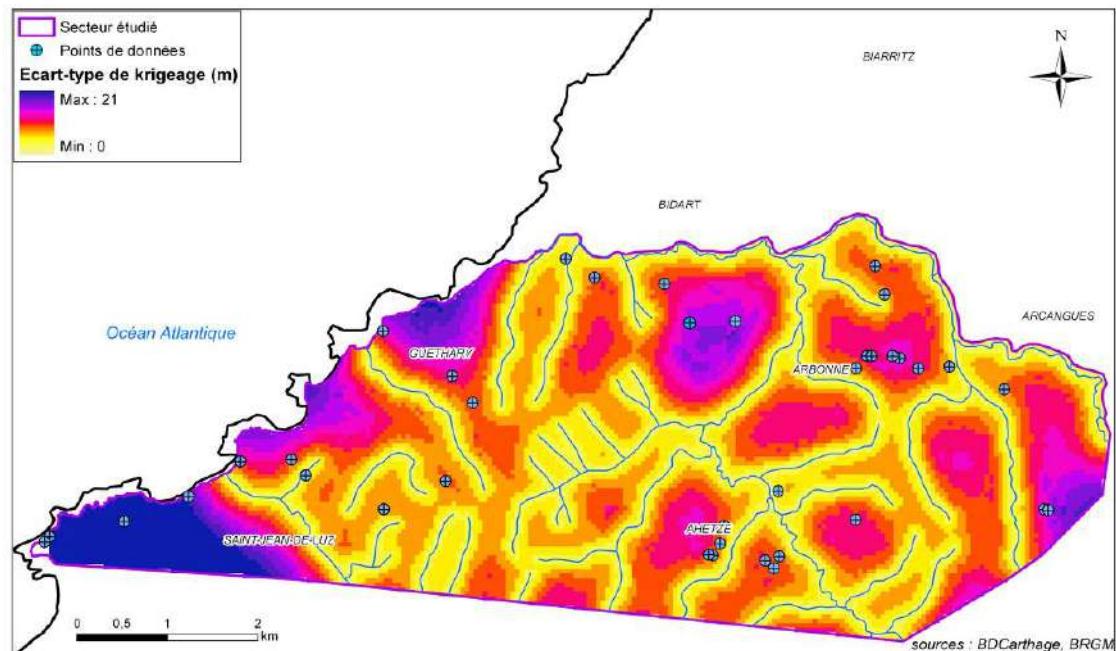


Illustration 26 : Carte de l'écart-type de krigeage sur les altitudes de la surface enveloppe des talwegs

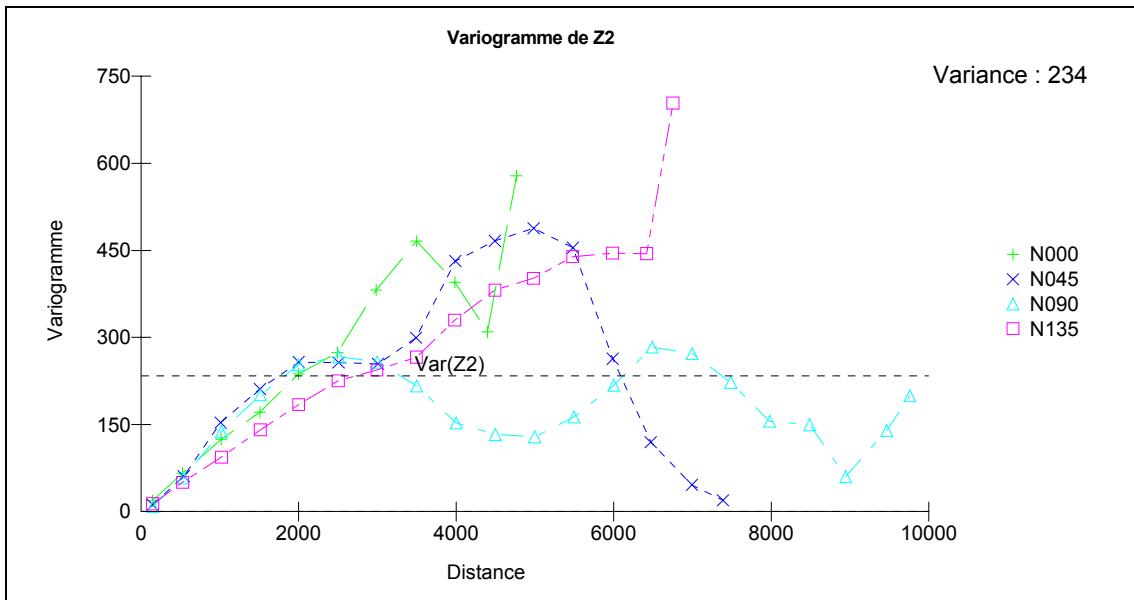


Illustration 27 : Variogramme obtenu à partir des points de la BD CARTHAGE sur la zone d'étude selon les 4 directions principales

Les variogrammes obtenus selon les quatre directions principales ont un comportement quasiment identique jusqu'à 2 km. La direction N135E est quelque peu différente, l'altitude du réseau hydrographique semble mieux corrélée à la distance dans cette direction, jusqu'à 3 km. Il s'agit en effet d'une direction principale d'écoulement des cours d'eau de la zone d'étude. Ceci ne représente pas une anisotropie réelle mais plutôt un artefact dû à la position des points au niveau des cours d'eau.

Un modèle de variogramme a été construit pour une direction moyenne, aucune anisotropie n'étant réellement justifiée par la réalité géologique. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- 1^{ère} partie : modèle sphérique ; palier = 120 ; portée = 2550
- 2^{ème} partie : modèle cubique ; palier = 114 ; portée = 2800

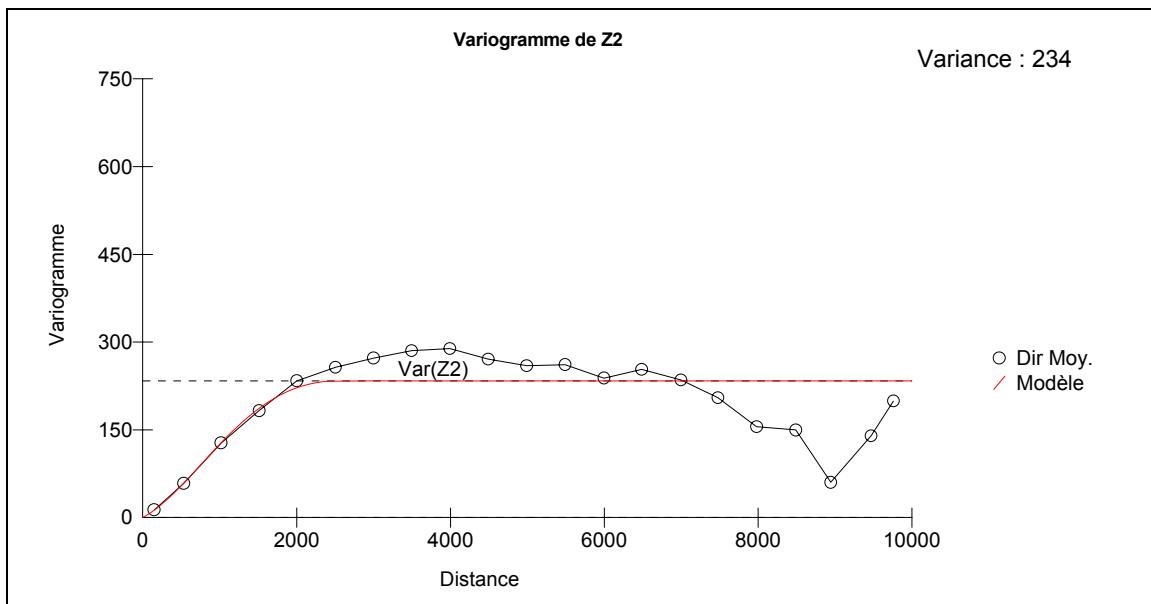


Illustration 28 : Variogramme moyen obtenu à partir des points de la BD CARTHAGE sur la zone d'étude et modèle associé

La surface topographique étant par ailleurs disponible sur la même grille (BDAlti ©IGN), la valeur de a peut être calculée en tout point de la zone étudiée. Le paramètre b est calculé au droit de vingt-cinq ouvrages dans lesquels le niveau piézométrique a été mesuré. La répartition des couples (a, b) pour chaque ouvrage est présentée illustration 29. L'hypothèse selon laquelle a et b sont indépendants est rejetée de façon très hautement significative (selon le test de Fisher, réalisé sur 25 individus pour un coefficient de corrélation $r = 0,63$). Ainsi, comme cela a été montré dans le cas des altérités de socle (Wyns, 1999), il apparaît, là aussi une relation linéaire entre a et b . Cependant, certains points présentent des valeurs de b inférieures à 0. Ils correspondent à des zones où la surface piézométrique est inférieure à la base des talwegs. Cette anomalie est la conséquence de la précision du modèle, liée à la taille de la maille utilisée (50 m) : en effet, les cours d'eau pérennes (de la BD Carthage ®IGN) ne sont pas, de ce fait, positionnés exactement au point le plus bas de la BDAlti (®IGN), et, d'autre part, même s'ils l'étaient, la taille de la maille est telle, que, dans cette zone d'étude particulièrement vallonnée, l'altitude attribuée à chaque élément est une valeur moyenne et non l'altitude la plus basse. On a donc une surestimation systématique de l'altitude de la « surface enveloppe de la base des talwegs ».

La relation linéaire entre a et b (le coefficient de régression est égal à 0,6) permet d'estimer l'altitude de la surface piézométrique (S), en tout point de la zone d'étude, en fonction de l'altitude de la surface topographique (T) et de celle de la « surface enveloppe de la base des talwegs » (R) :

$$S = (T - R) \times 0,6 + R$$

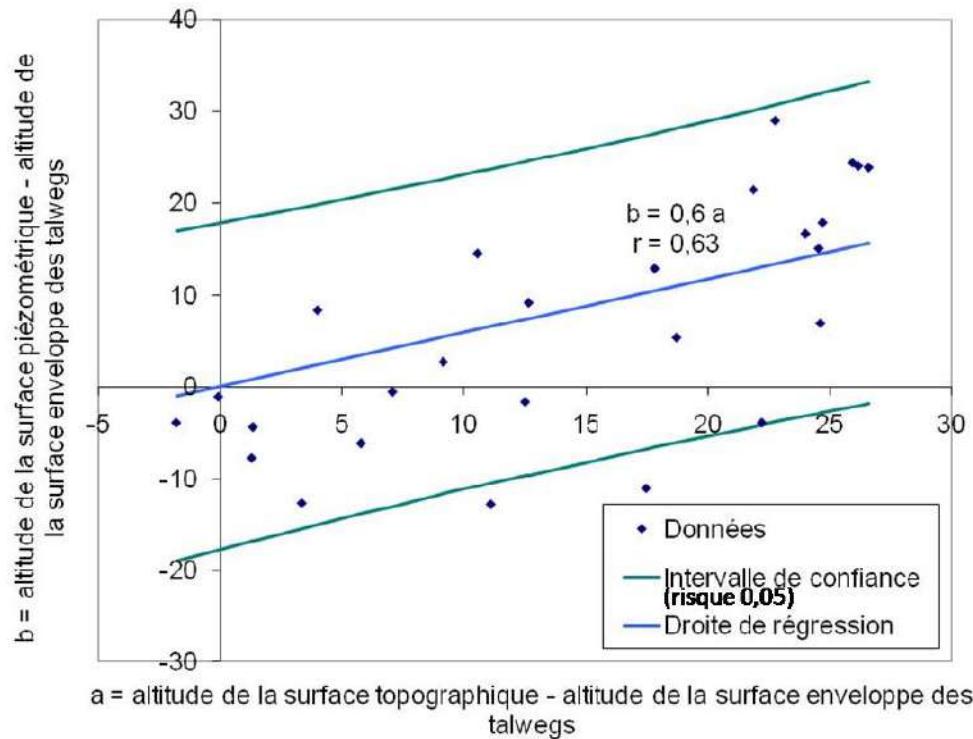


Illustration 29 : Relation entre les paramètres a et b aux points de données piézométriques

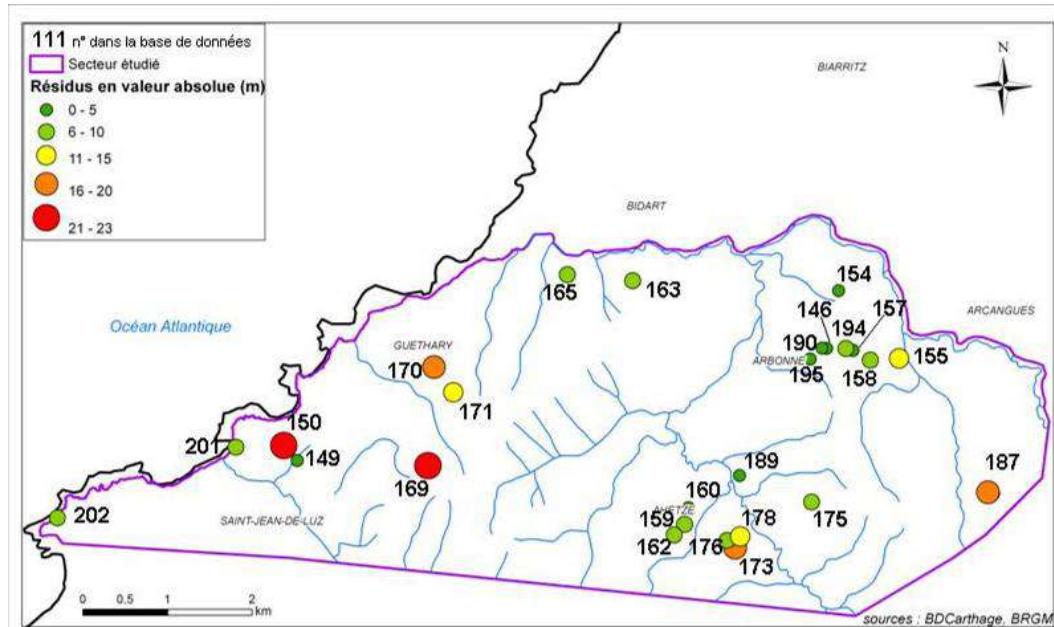
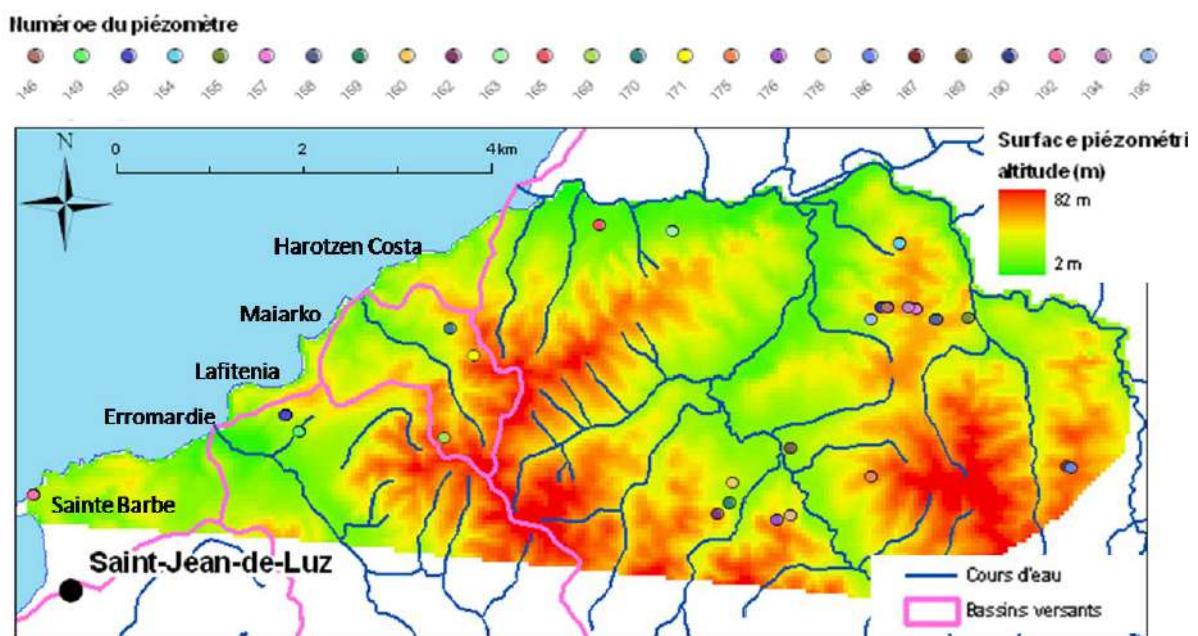


Illustration 30 : Carte des résidus (en valeur absolue) de la régression linéaire aux points de données (bthéorique – bréel)

L'illustration 30 donne la répartition géographique des résidus de la régression linéaire. Il s'agit de la différence entre la variable b théorique (calculée à partir de l'équation de la relation linéaire entre a et b) et la valeur réelle de b (obtenue à partir des données de terrain). La plupart des résidus sont majoritairement inférieure à 10 m. Cependant, certains sont très élevés ; parmi eux, on retrouve les deux points sortant de l'intervalle de confiance (piézomètres n°150 et 169, en rouge sur l'illustration 30) ainsi que trois autres puits (170, 173 et 187 en orange sur l'illustration 30) pour lesquels les données sont peu nombreuses (1 ou 2 relevés piézométriques seulement). Là encore, ces erreurs démontrent d'une part, les limites de ce modèle, et d'autre part, la nécessité d'une base de données plus complète en terme, non seulement de densité de point de mesure, mais aussi de fréquence de mesure.

La surface piézométrique résultant de ces estimations et calculs est présentée sur l'illustration 31.



La différence entre la surface topographique et la surface piézométrique théorique a été représentée sur le secteur d'étude (illustration 32). Il s'agit de l'épaisseur de la zone non saturée. En théorie, cette différence doit être positive, ce qui est le cas quasiment partout excepté au niveau des cours d'eau. Or, dans les talwegs, on devrait obtenir $a = b = 0$. Cette anomalie est probablement liée à la taille de la maille de la BDAlti (50 m). En effet, pour chaque maille, la BDAlti donne une altitude en un point considéré qui ne correspond pas à celle du talweg compte tenu de la taille de la maille. C'est pourquoi l'altitude de la base des talwegs est surestimée par la BDAlti. Cette imprécision se répercute lors de l'interpolation de la surface enveloppe des talwegs puis sur le calcul de la surface piézométrique. De plus, il apparaît que le réseau hydrographique de la BD Carthage n'est pas systématiquement positionné au droit des

talwegs du modèle numérique de terrain de la BD Alti ; un décalage apparaît parfois qui a pour conséquence, là encore, une surestimation de l'altitude des talwegs. Ces observations expliquent le fait que, au droit des talwegs, la surface piézométrique se trouve au-dessus de la surface topographique. L'imprécision due à la maille de la BDAlti représente une autre limite à la méthode, et incite à n'étudier le résultat qu'à l'échelle des données qui ont été utilisées pour le calcul (échelle régionale).

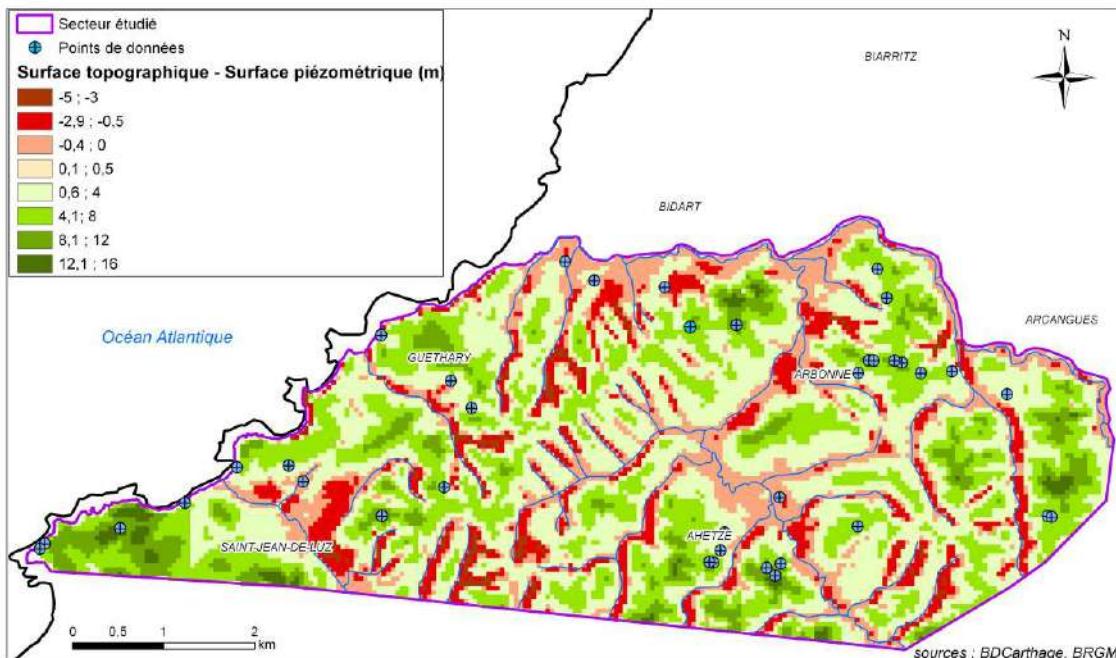


Illustration 32 : Carte des différences entre les altitudes des niveaux topographiques et piézométriques (anomalies négatives en rouge-orange)

La relation existant entre l'altitude de la surface piézométrique (S), l'altitude de la surface topographique (T) et de celle de la « surface enveloppe de la base des talwegs » (R) a pour conséquence le fait que bassins versants hydrogéologiques et topographiques (illustration 9, p 23) sont confondus. Ces derniers sont reportés sur l'illustration 32. On remarque alors que la plupart des reliefs côtiers, comme ceux de Guéthary (Harotzen Costa) ou Sainte Barbe à Saint-Jean-de-Luz, ainsi que les baies d'Erromardie, de Lafitenia et de Maiarko, ne sont pas drainés par des rivières ; l'océan est l'exutoire de(s) nappe(s) et de ce fait, l'eau de bassins versants parfois importants (exemple à Sainte Barbe) transite par les reliefs littoraux. La répartition des venues d'eau recensées sur le littoral (illustration 33) est un argument supplémentaire à cette remarque : en effet, de nombreuses sources sont observées émergeant de ces reliefs. Elles émergent préférentiellement au droit de secteurs pour lesquels une altitude relativement élevée de la surface piézométrique a été estimée à proximité du littoral (20 m à 30 m ; teintes jaunes sur l'illustration 31) : il s'agit de la pointe Sainte Barbe, des caps situés au nord et au sud de la baie de Lafitenia et, d'Harotzen Costa (emplacement du site pilote). Ces zones sont aussi celles où affleure l'horizon karstifié en pied des reliefs littoraux et non l'altérite. De nombreuses sources sont également

recensées au sud de la baie de Saint-Jean-de-Luz dans les zones non drainées par un fleuve côtier ; là aussi il apparaît que les falaises forment l'exutoire de(s) nappe(s) de l'horizon karstifié. Le littoral représente une troncature au sein de l'aquifère formé par l'horizon karstifié. Les variations topographiques abruptes que représentent les falaises peuvent être à l'origine d'un fort gradient hydraulique et il n'est pas rare de rencontrer des venues d'eau en milieu de falaise.

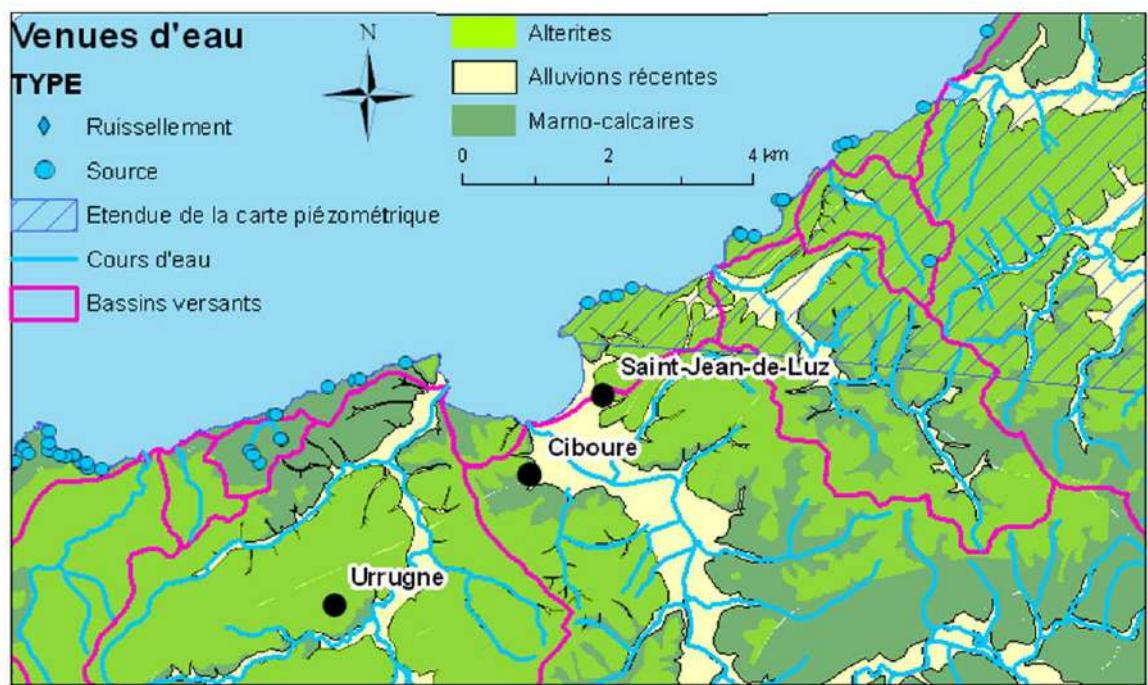


Illustration 33 : Carte des venues d'eau sur le littoral (et à proximité) et bassins versants des fleuves côtiers

4.6. HYPOTHESE SUR L'ORIGINE ET LE DEVELOPPEMENT DE LA OU DE(S) NAPPE(S) DE L'HORIZON KARSTIFIÉ

Les circulations d'eau sont chenalées par les discontinuités ouvertes au sein de l'horizon karstifié. Il est probable que les conduits empruntés aujourd'hui par l'eau souterraine sont ceux qui ont été creusés par les processus d'altération anciens à la base de l'altérite argilo-silteuse. Ainsi nous émettons l'hypothèse que l'altérite a été évacuée de certains conduits repris actuellement par l'eau. Pour cela, les conditions énergétiques entre les périodes d'altération et l'actuelle ont nécessairement évolué :

- au Néogène, pendant la ou les phases d'altération, les particules fines résiduelles de l'altération sont restées en place, ce qui nécessite une nappe avec un potentiel hydraulique faible à nul, et donc, une énergie potentielle faible ou nulle (Quinif, 1999),

- par la suite, un décolmatage progressif des conduits existant et la genèse de nouvelles cavités qui auront un aspect de "karst vrai", a nécessité une énergie potentielle non nulle. Un abaissement du niveau de base, est à l'origine de ce nouveau potentiel hydraulique (Quinif, 1999). Cette variation des conditions énergétiques peut être la conséquence d'une surrection de domaine continental et/ou d'un abaissement du niveau marin. Le Quaternaire est une période favorable à de tels changements énergétiques, avec des régressions marines accompagnant les périodes glaciaires et une surrection mise en évidence par Deserces (1973) à la fin du Würm.

Il est, en outre, très probable que, par corrosion chimique, l'eau creuse actuellement de nouveaux réseaux souterrains dans les marno-calcaires à faciès flysch, ou agrandit ceux préexistant : les analyses chimiques révèlent une teneur en carbonates telle que l'eau est en équilibre avec la calcite.

4.7. MODELE SYNTHETISANT LES CIRCULATIONS HYDROGEOLOGIQUES

Deux types de nappes ont été mis en évidence dans la zone étudiée : des nappes perchées au sein des altérites (rapport BRGM/RP-56876-FR)) et une ou des nappes, localisées dans l'horizon karstifié semi-captives sous les altérites. L'illustration 34 est une représentation schématique conceptuelle de la position de ces nappes dans le contexte géologique.

Les quelques mesures et analyses faites grâce à la mise en place d'un réseau de suivi à minima ont permis d'observer une grande disparité dans les résultats illustrant ainsi la complexité du système aquifère au sein de l'horizon karstifié. L'écoulement des nappes, le plus souvent semi-captives sous les altérites, se fait préférentiellement au sein des conduits.

Les niveaux piézométriques et débits associés de la ou des nappes de l'horizon karstifié apparaissent reliés aux précipitations dans un délai très court ; les zones de lapiez où affleure l'horizon karstique peuvent alors former les zones d'infiltration. En outre, les falaises littorales, qui, de par leur géométrie, peuvent être à l'origine d'un fort gradient hydraulique, drainent une partie de cet aquifère.

Ces premiers résultats nécessitent cependant d'être complétés par des suivis au cours de périodes plus longues et la mise en place d'un réseau d'ouvrages plus dense et plus homogène, de façon à être en mesure, *in fine*, de quantifier les apports d'eau aux reliefs côtiers. Dans le cadre de l'étude des instabilités littorales, ces circulations hydrogéologiques sont, en effet, potentiellement déstabilisatrices.

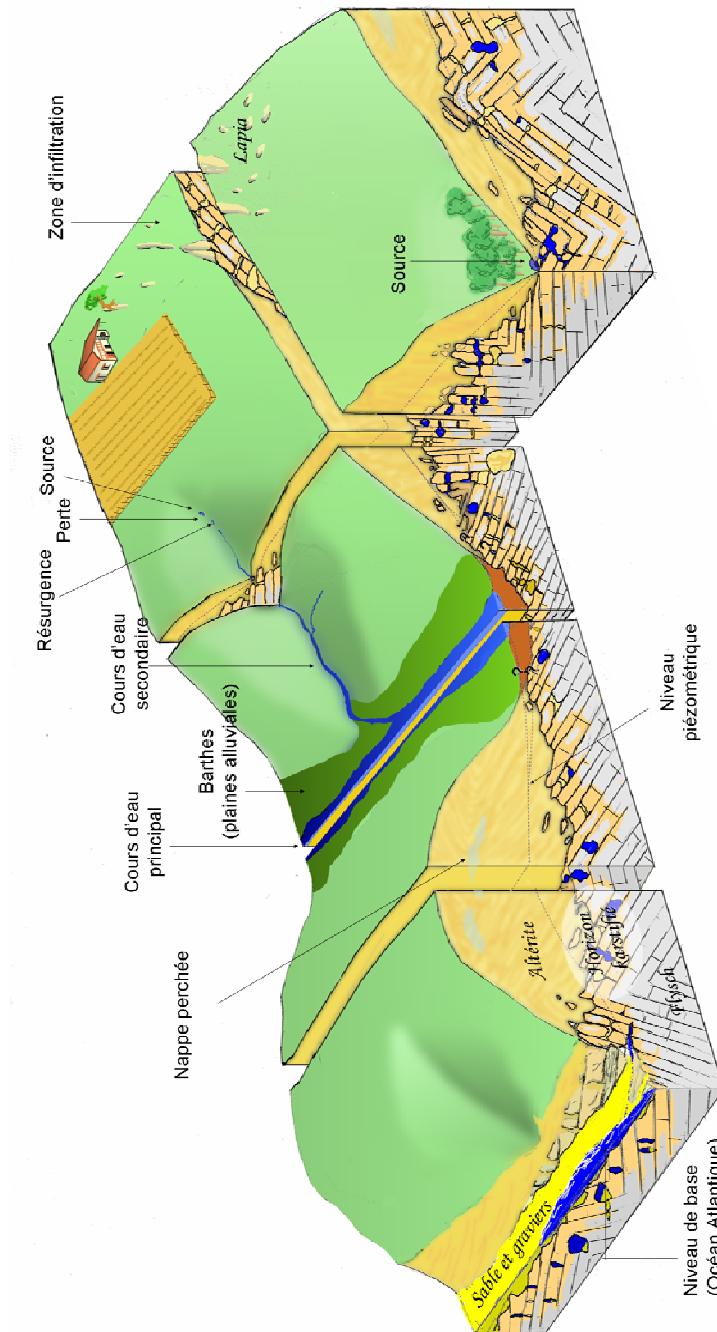


Illustration 34 : Bloc diagramme conceptualisant les grands principes d'écoulement souterrain au sein du profil d'altération

5. Conclusion

Cette étude a permis de compléter l'état des lieux des connaissances hydrogéologiques de la région, dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire globale et avec pour objectif un suivi géotechnique des instabilités de la côte.

Les premières mesures effectuées ont conduit à des résultats importants :

- le suivi piézométrique, entrepris en 2007, a confirmé la présence d'eau au sein du massif flysch/altérites. Un réseau de 37 puits et 11 piézomètres permet de poursuivre les mesures ;
- les niveaux aquifères ont pu être en partie distingués : outre la présence d'une nappe à l'interface entre les flyschs et l'altérite, des circulations d'eau dans des niveaux plus perméables au sein des altérites ont été mis en évidence ;
- les différents résultats ont fait ressortir la complexité du système hydrogéologique étudié, ses hétérogénéités locales et la présence de petits aquifères connectés ou non ;
- la relation entre la surface piézométrique et la topographie a également été mise en évidence ; l'altitude de la surface piézométrique a pu être estimée sur la zone d'étude et donne une première idée du fonctionnement de ce système aquifère.

L'hétérogénéité des mesures dans le temps et dans l'espace ne permet pas de tirer de conclusions globales quant au fonctionnement hydrogéologique de l'arrière-pays du littoral basque. Il s'agit en effet d'un système très complexe, de type karstique, localement captif. Il conviendra notamment de densifier le réseau de venues d'eau étudiées et d'effectuer un suivi à pas de temps régulier, sur une période plus longue.

6. Bibliographie

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

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

BORIE M., MARACHE A., FRAPPA M., LATASTE J-F., RISS J., FABRE R., (2004) – Application de la méthode électrique à l'étude de la stabilité de la falaise rocheuse des Viviers-Basques (64, Urrugne) : détermination de la structure du massif rocheux et des conditions hydrauliques. Conference Proceeding. Journées AGAP (Association pour la qualité en Géophysique Appliquée non Pétrolière) Qualité, Eau et Géophysique, Ressource, Environnement, Risque. 27-28 octobre 2004, Lyon, France, p.34-37.

BORIE M., MARACHE A., RISS J., FABRE R., GENTIER S. (2005) - Analysis of sliding failure of the Viviers-Basques' (France) jointed rock cliff. Activity on the Geological Environment. Conference Proceeding Eurock 2005, 18th-20th May 2005, Brno, Czech Republic. Impact of Human éd. Konecny P Balkema Publishers, p.63-68.

CORBIER P. (1999) – Mise en évidence d'une alimentation des aquifères poreux plio-quaternaires par les massifs karstiques de bordure –Thèse Université de Bourgogne, 187 p.

MALLET C. avec la collaboration de AUBIE S., CAPDEVILLE J.P., DUBREUILH J., GENNA A., LAMARQUE C., NEDELLEC J.L., MATHON C. (2005) - Synthèse des études réalisées sur les instabilités de la côte basque entre 2001 et 2005, Rapport BRGM/RP-54012-FR, 32 p.

MANGIN A. (1975) -. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstique. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles, Dijon.

MARDIA K.V. (1972) – Statistics of directional data – Academic Press New York, 358p.

PETER-BORIE M., RISS., J., MALLET C., AUBIE S. (2006) - Synthèse bibliographique des processus d'altération des roches et applications au Pays-Basque (64). Rapport d'avancement BRGM.

PETER-BORIE M. (2006) - Etude géologique et géotechnique des instabilités de terrain sur le littoral basque. Cas d'étude : Ibarritz (Bidart) et Harotzen Costa (Guéthary). Rapport d'avancement, BRGM-RP-54728-FR, 120 p.

PETER-BORIE M., KARNAY G., LUCASSOU F., MALLET C., RISS J. (2007) - Modélisation géologique des formations superficielles du Pays Basque (64) - Rapport BRGM en cours

PETER-BORIE M., AUBIE. S. (2008) : Caractérisation du complexe Marno-calcaire du Crétacé Supérieur et altérites associées sur la Côte Basque. Rapport final, BRGM/RP-57055-FR, 30 illus., 2 ann, 57 p.

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

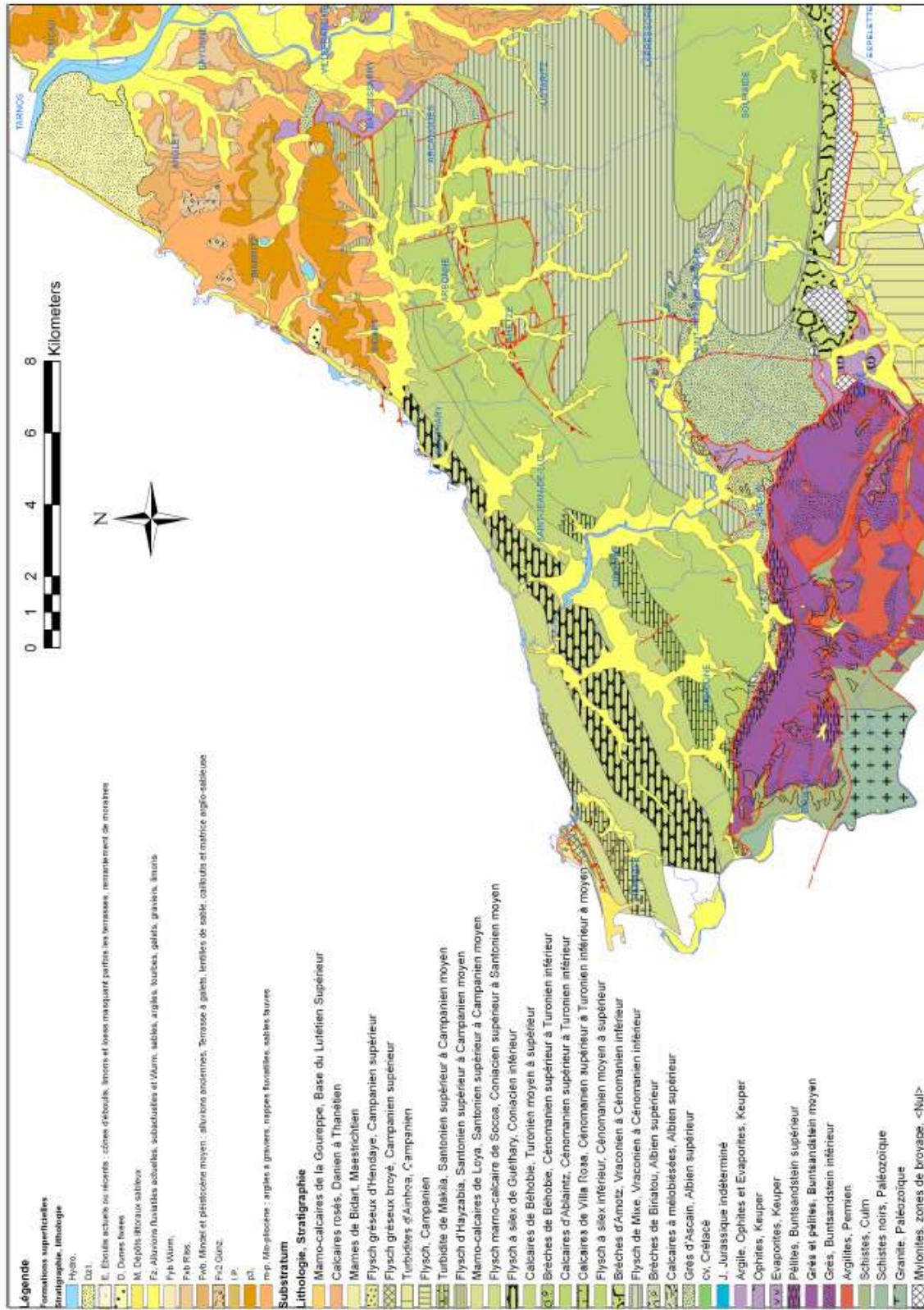
SAPLAIROLES M., BAUDRY D., PEDRON N. (2007) - Référentiel Hydrogéologique Français - BD RHF Version 2 – Bassin Adour-Garonne. Année 1. Délimitation des entités hydrogéologiques en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées. Rapport d'étape. BRGM/RP-56053-FR, 41 p.

WINCKEL A., PETITJEAN J., BORIE M., AUBIE S. (2004) - Etat des connaissances hydrologiques et hydrogéologiques de la côte basque, Rapport BRGM/RP-53372-FR, 113p.

WYNS R. (1999) - Cartographie quantitative de la ressource en eau souterraine - Rapport BRGM R40519, 23p.

Annexe 1

Carte géologique géologique simplifiée (d'après P.Razin, 1989, modifiée)



Carte géologique simplifiée (d'après P.Razin, 1989, modifiée)

Annexe 2

Rappels sur le fonctionnement d'un karst

➤ Présentation du karst

A l'origine, le mot « karst » désigne une région de plateaux calcaires slovènes à la morphologie particulière (dépressions, grottes, rivières souterraines,...). Il désigne aujourd'hui les reliefs créés par la dissolution de certaines roches (notamment les calcaires) par des eaux chargées en dioxyde de carbone. On distingue l'exokarst (formes de surface) et l'endokarst (formes souterraines).

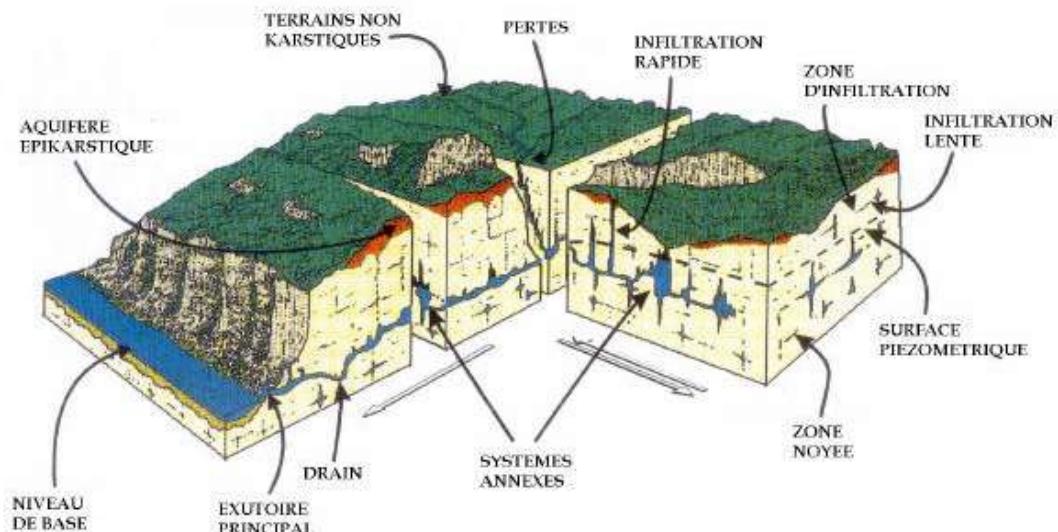
➤ Processus de karstification

Pour former un karst, l'écoulement souterrain doit se produire préférentiellement à l'écoulement superficiel.

Le potentiel de karstification dépend du pouvoir dissolvant de l'eau (lié à la teneur en CO₂, notamment produit par la végétation dans les sols) et des caractéristiques de la roche (solubilité, présence de fissures et/ou de fractures, ...). Les conditions idéales pour la karstification sont donc un pH acide, des vides dans la roche (fracturation, porosité de fissure, plans de discontinuité) et une charge hydraulique importante, grâce par exemple à un relief marqué). La dissolution des roches carbonatées met en jeu un ensemble complexe de réactions chimiques.

➤ Fonctionnement d'un aquifère karstique

Le réseau karstique s'organise entre une zone d'infiltration en amont et une source en aval, qui constitue le niveau de base. Un système karstique est équivalent à un bassin versant hydrologique : il est constitué d'un impluvium entièrement karstique (système unaire) ou constitué en partie de roches imperméables (système binaire)



Bloc diagramme représentant un aquifère karstique (d'après Mangin, 1975)

Annexe 3

Calcul des indices de saturation avec le logiciel PhreeqC (USGS)

- Piézomètre N°149 (Saint-Jean-de-Luz): représentatif d'une eau bicarbonatée calcique « standard »

DATABASE D:\Travail\Logiciels\Phreeqc Interactive 2.14.3\phreeqc.dat

SOLUTION 1

temp	15.3
pH	5.9
pe	5.535
redox	pe
units	mg/l
density	1
C(4)	111
Ca	46.5
Cl	44.1
K	1.9
Mg	7.05
Na	27.6
S(6)	46
Si	15.9
water	1 # kg



ANALYSES
PHYSICO-CHIMIQUES :
données entrées dans
Phreeqc

Beginning of initial solution calculations.

SIMULATION DANS
PHREEQC

Initial solution 1.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	1.820e-003	1.820e-003
Ca	1.161e-003	1.161e-003
Cl	1.244e-003	1.244e-003
K	4.861e-005	4.861e-005
Mg	2.901e-004	2.901e-004
Na	1.201e-003	1.201e-003
S(6)	4.790e-004	4.790e-004
Si	2.647e-004	2.647e-004

-----Description of solution-----

pH	=	5.900
pe	=	5.535
Activity of water	=	1.000
Ionic strength	=	5.085e-003
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	4.521e-004
Total CO2 (mol/kg)	=	1.820e-003
Temperature (deg C)	=	15.300
Electrical balance (eq)	=	1.496e-003
Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An)	=	22.81

```

Iterations = 7
Total H = 1.110139e+002
Total O = 5.551328e+001

-----Saturation indices-----

Phase          SI  log IAP  log KT
Anhydrite      -2.25   -6.59   -4.34  CaSO4
Aragonite      -2.71   -10.99  -8.28  CaCO3
Calcite        -2.56  -10.99  -8.43  CaCO3
Chalcedony     0.09   -3.58   -3.67  SiO2
Chrysotile     -16.24   17.20  33.44  Mg3Si2O5(OH)4
CO2(g)         -1.52   -2.86   -1.34  CO2
Dolomite        -5.72  -22.58  -16.86  CaMg(CO3)2
Gypsum         -2.00   -6.59   -4.58  CaSO4·2H2O
H2(g)          -22.87  -25.98  -3.11  H2
H2O(g)         -1.77   -0.00   1.77  H2O
Halite          -7.45   -5.89   1.56  NaCl
O2(g)          -40.85  -43.66  -2.81  O2
Quartz         0.55   -3.58   -4.13  SiO2
Sepiolite       -10.52   5.50   16.02  Mg2Si3O7.5OH·3H2O
Sepiolite(d)    -13.16   5.50   18.66  Mg2Si3O7.5OH·3H2O
SiO2(a)         -0.78  -3.58   -2.79  SiO2
Talc            -12.50  10.04  22.54  Mg3Si4O10(OH)2

-----  

End of simulation.
-----  

-----  

Reading input data for simulation 2.
-----  

-----  

End of run.
-----
```

Indices de
saturation (SI)
Equilibre
Sous-saturé

➤ Piézomètre N°146 (Arbonne) : point particulier

DATABASE D:\Travail\Logiciels\Phreeqc Interactive 2.14.3\phreeqc.dat

SOLUTION 1

temp	15.3
pH	5.9
pe	5.535
redox	pe
units	mg/l
density	1
C(4)	111
Ca	46.5
Cl	44.1
K	1.9
Mg	7.05
Na	27.6
S(6)	46
Si	15.9
water	1 # kg

ANALYSES
PHYSICO-CHIMIQUES :
données entrées dans
PhreeqC

Beginning of initial solution calculations.

Initial solution 1.

SIMULATION DANS
PHREEQC

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	1.820e-003	1.820e-003
Ca	1.161e-003	1.161e-003
Cl	1.244e-003	1.244e-003
K	4.861e-005	4.861e-005
Mg	2.901e-004	2.901e-004
Na	1.201e-003	1.201e-003
S(6)	4.790e-004	4.790e-004
Si	2.647e-004	2.647e-004

-----Description of solution-----

pH	=	5.900
pe	=	5.535
Activity of water	=	1.000
Ionic strength	=	5.085e-003
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	4.521e-004
Total CO2 (mol/kg)	=	1.820e-003
Temperature (deg C)	=	15.300
Electrical balance (eq)	=	1.496e-003
Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An)	=	22.81

```

Iterations = 7
Total H = 1.110139e+002
Total O = 5.551328e+001

```

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.25	-6.59	-4.34	CaSO4
Aragonite	-2.71	-10.99	-8.28	CaCO3
Calcite	-2.56	-10.99	-8.43	CaCO3
Chalcedony	0.09	-3.58	-3.67	SiO2
Chrysotile	-16.24	17.20	33.44	Mg3Si2O5(OH)4
CO2(g)	-1.52	-2.86	-1.34	CO2
Dolomite	-5.72	-22.58	-16.86	CaMg(CO3)2
Gypsum	-2.00	-6.59	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.87	-25.98	-3.11	H2
H2O(g)	-1.77	-0.00	1.77	H2O
Halite	-7.45	-5.89	1.56	NaCl
O2(g)	-40.85	-43.66	-2.81	O2
Quartz	0.55	-3.58	-4.13	SiO2
Sepiolite	-10.52	5.50	16.02	Mg2Si3O7.5OH:3H2O
Sepiolite(d)	-13.16	5.50	18.66	Mg2Si3O7.5OH:3H2O
SiO2(a)	-0.78	-3.58	-2.79	SiO2
Talc	-12.50	10.04	22.54	Mg3Si4O10(OH)2

ANALYSES
PHYSICO-CHIMIQUES :
données entrées dans
PhreeqC

End of simulation.

Annexe 4

Rappels sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode factorielle utilisée pour étudier les relations entre des variables à partir d'une matrice de données (n observations/individus et m variables/éléments analysés).

Le traitement des données est effectué sur des variables centrées réduites (moyenne = 0 ; écart-type = 1) afin de donner le même poids à toutes les variables. Les calculs ont été réalisés grâce au logiciel XLSTAT.

La première étape réalisée par le logiciel consiste à déterminer les valeurs des corrélations entre les différentes variables. On obtient une matrice de corrélation, du type de celle présentée ci-dessous (illustration)

Variables	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	Conductivité
Ca	1	0,180	0,705	0,088	0,988	0,358	0,688	0,969
Mg	0,180	1	0,081	0,279	0,186	0,325	0,163	0,217
Na	0,705	0,081	1	-0,032	0,628	0,344	0,925	0,813
K	0,088	0,279	-0,032	1	0,036	0,548	0,030	0,144
HCO3	0,988	0,186	0,628	0,036	1	0,273	0,625	0,930
SO4	0,358	0,325	0,344	0,548	0,273	1	0,235	0,422
Cl	0,688	0,163	0,925	0,030	0,625	0,235	1	0,795
Conductivité	0,969	0,217	0,813	0,144	0,930	0,422	0,795	1

Matrice des corrélations (Pearson) obtenue pour l'ACP présentée dans les illustrations 19 et 20. En bleu, les valeurs maximales de corrélation maximales (proches de 1)

On obtient également un tableau (voir ci-dessous) regroupant les valeurs propres associées à la matrice diagonale. Elles représentent la qualité de la projection (passage de m variables à un nombre plus restreint) sur de nouveaux axes, après changement de repère. Ce nouveau repère permet de mieux visualiser la dispersion des individus. La troisième ligne du tableau indique le pourcentage de la variance totale absorbée par chaque axe factoriel. Chaque axe correspond à une combinaison linéaire des variables.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	4,471	1,615	0,778	0,651	0,416	0,049	0,018	0,002
Variabilité (%)	55,888	20,188	9,726	8,135	5,198	0,617	0,222	0,026
% cumulé	55,888	76,076	85,801	93,936	99,134	99,752	99,974	100,000

Tableau des valeurs propres obtenues pour l'ACP présentée dans les illustrations 19 et 20

Les coordonnées des variables sur les nouveaux axes du repère sont fournies dans un tableau (voir exemple ci-dessous). On ne garde que les deux premiers axes du repère

si le pourcentage de variance absorbé par ces axes est élevé. En effet, dans ce cas, les autres axes n'apportent pas d'information complémentaire.

	F1	F2	F3
<i>Ca</i>	0,943	-0,101	0,025
<i>Mg</i>	0,277	0,569	0,762
<i>Na</i>	0,864	-0,218	-0,124
<i>K</i>	0,172	0,836	-0,310
<i>HCO₃</i>	0,896	-0,143	0,098
<i>SO₄</i>	0,484	0,687	-0,276
<i>Cl</i>	0,851	-0,200	-0,020
<i>Conductivité</i>	0,984	-0,054	-0,012

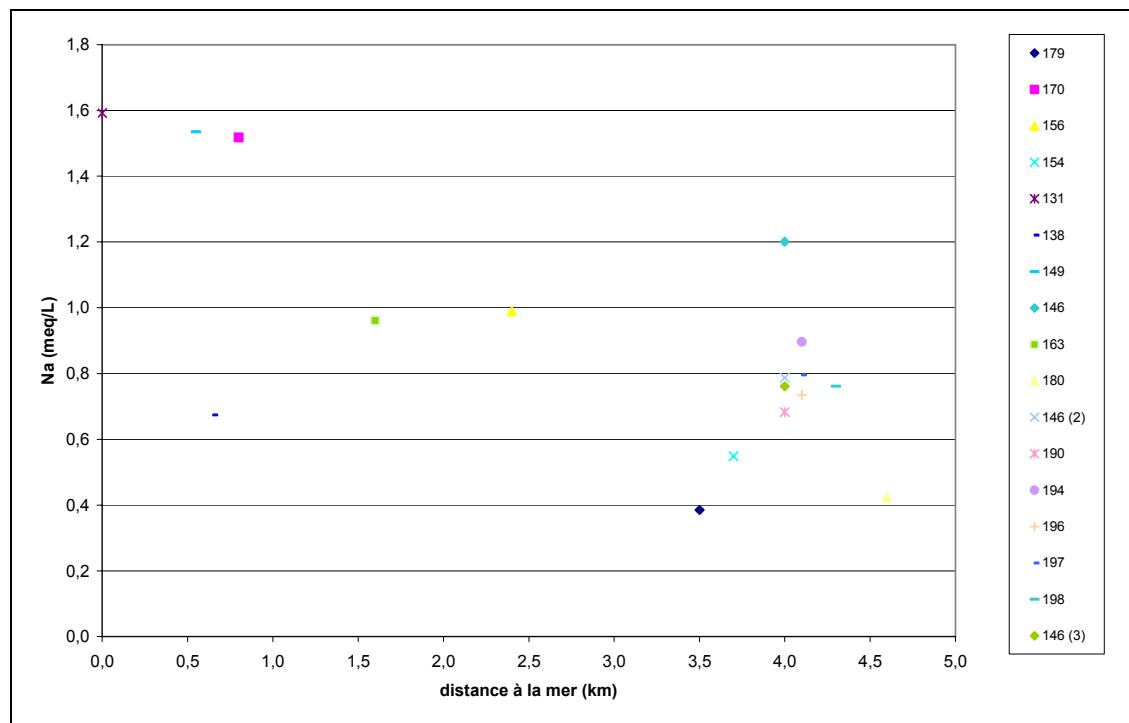
Coordonnées des variables sur les différents axes (en bleu, variables influençant les axes F1 et F2) pour l'ACP présentée dans les illustrations 12 et 13

La représentation des résultats se fait sous la forme d'un cercle de corrélation qui correspond à une projection des variables sur le repère formé par les deux premiers axes. Les variables les plus éloignées du centre du cercle sont les plus significatives.

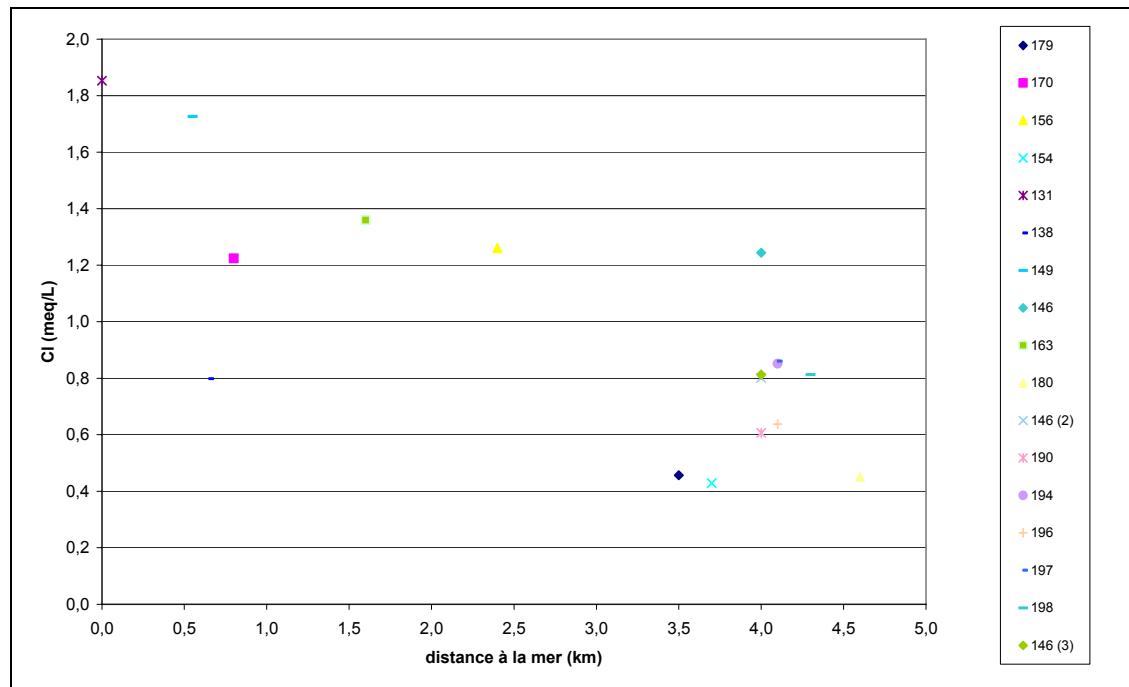
Le graphique des individus permet quant à lui d'identifier l'influence des variables sur les individus ainsi que les groupes d'individus.

Annexe 5

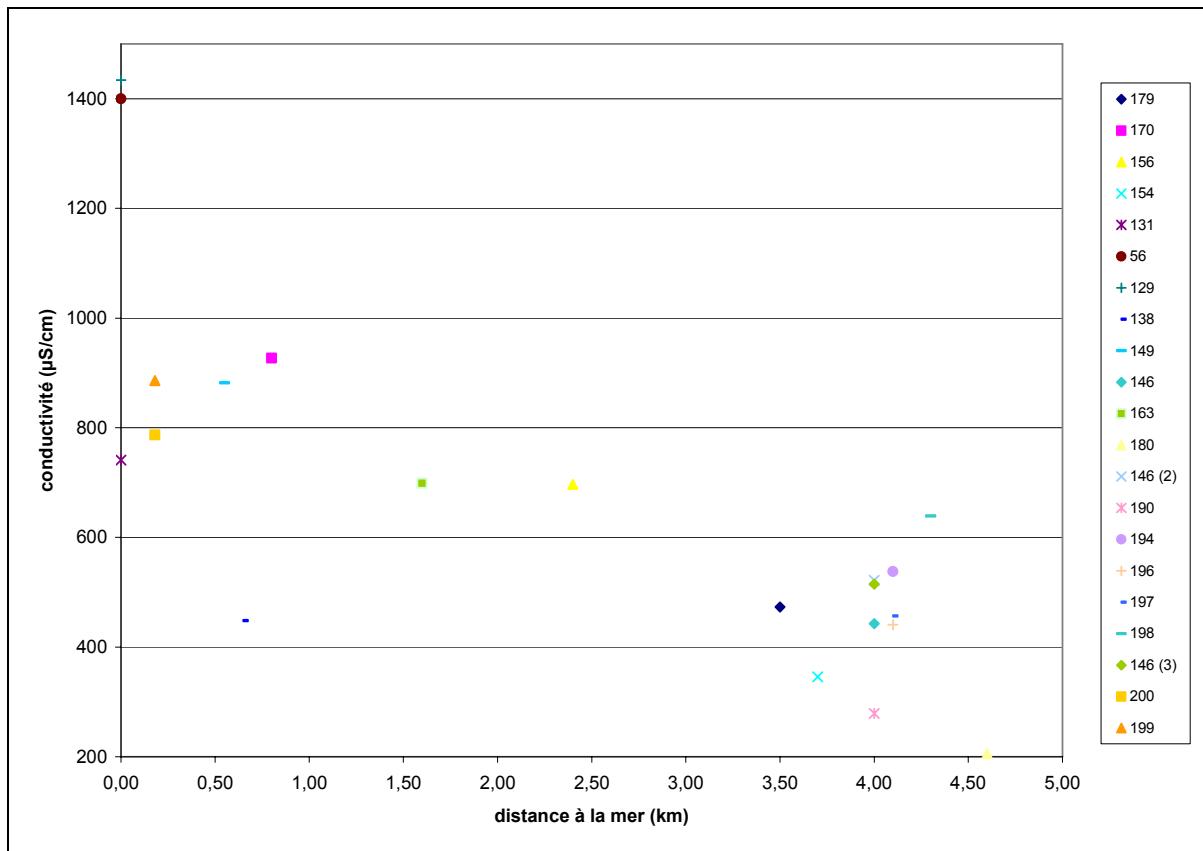
Graphiques représentant l'influence de la distance à la côte



Relation entre la teneur en sodium et la distance à la mer



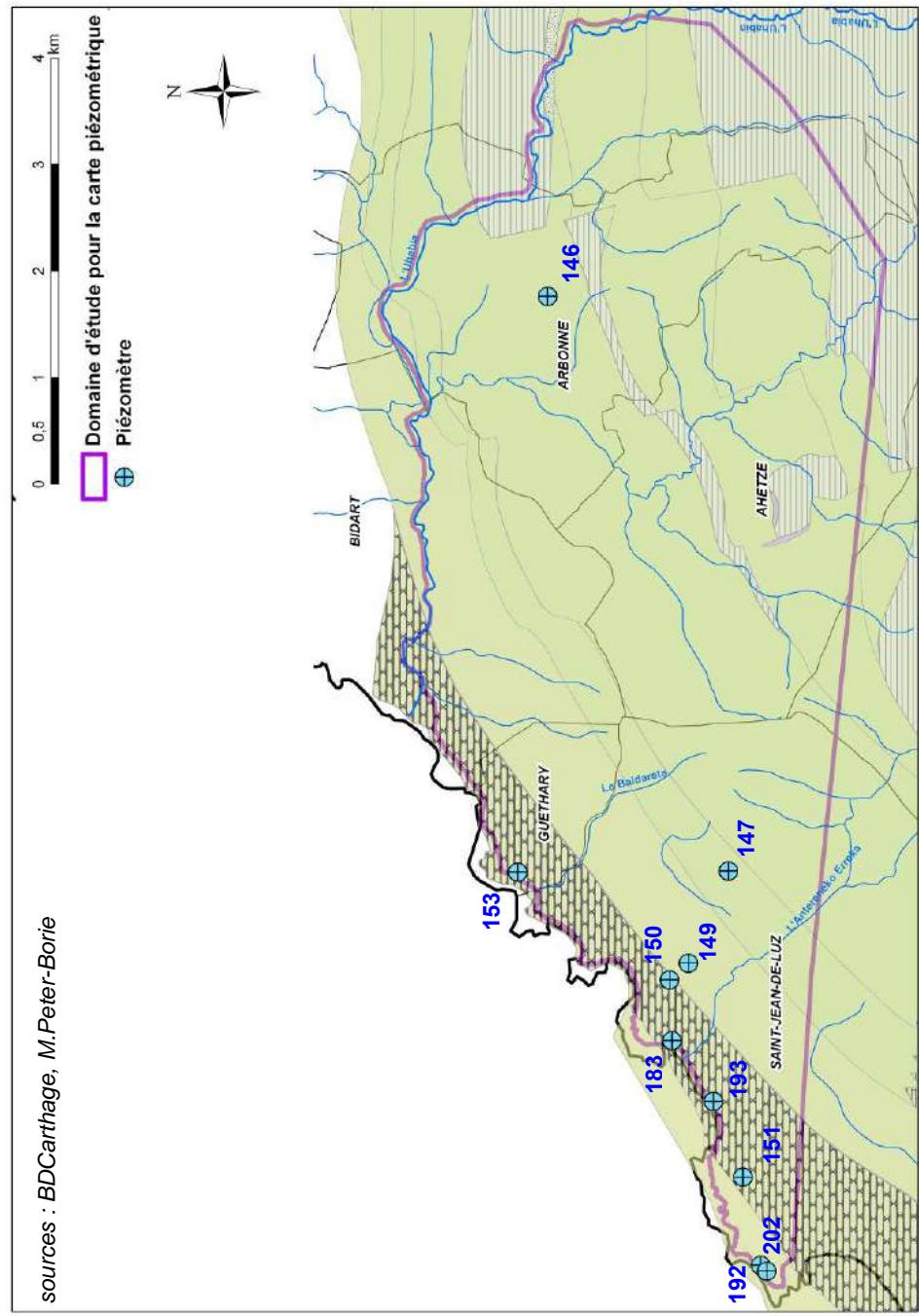
Relation entre la teneur en chlorures et la distance à la mer



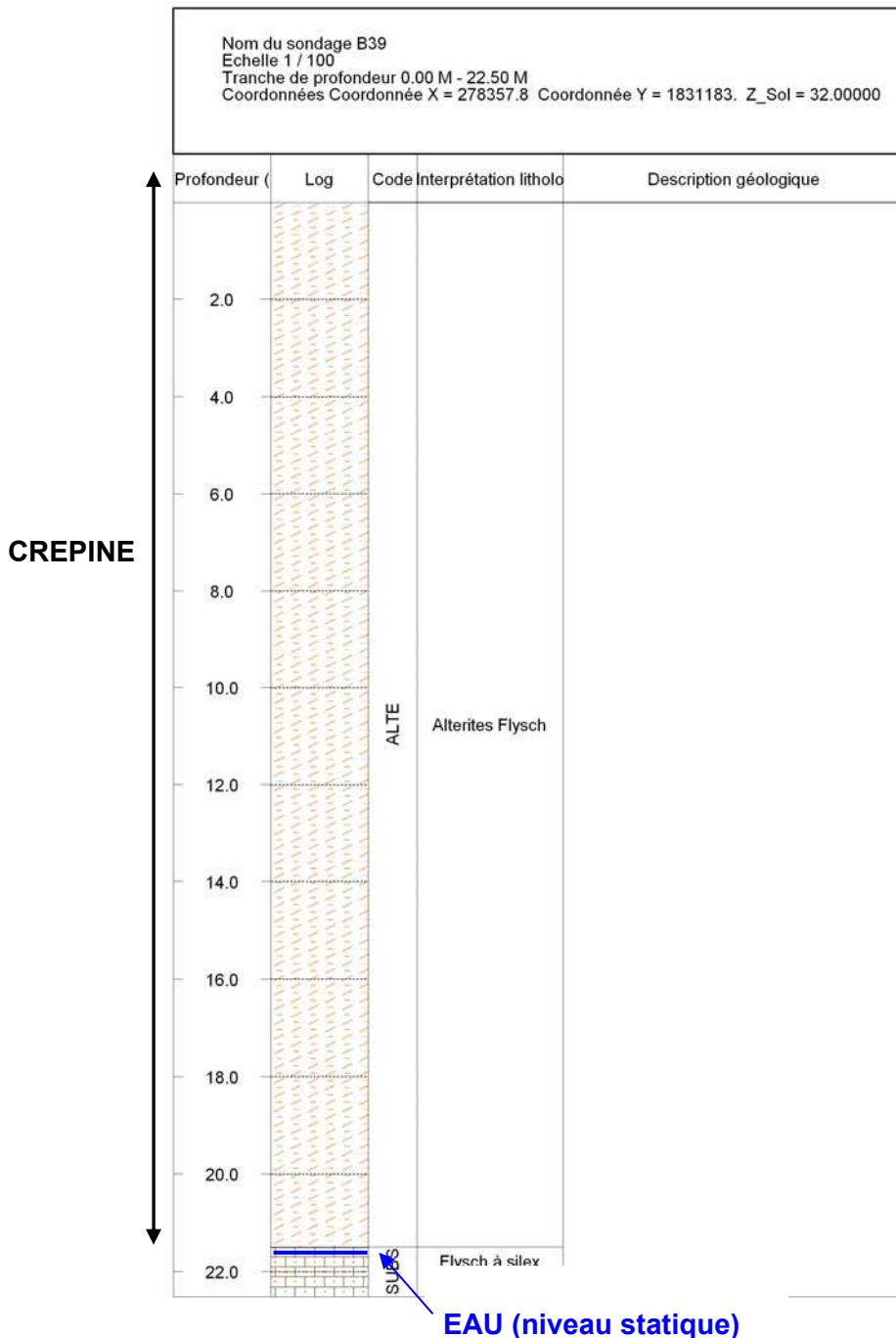
Relation entre la conductivité et la distance à la mer

Annexe 6

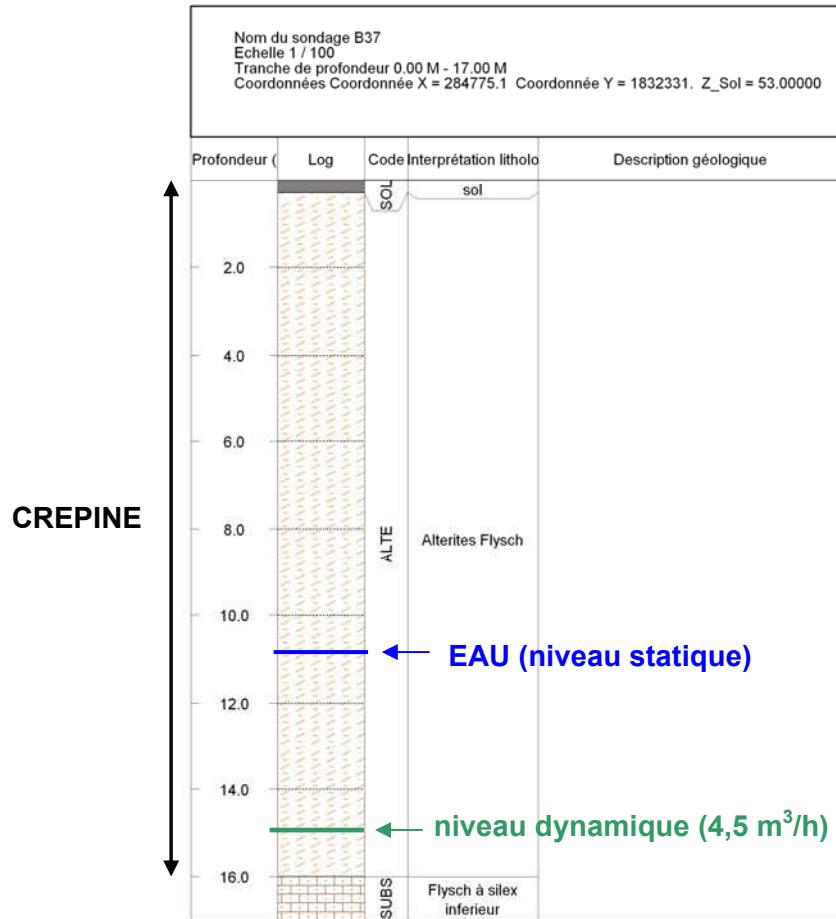
Logs de forage des piézomètres implantés sur la Côte Basque



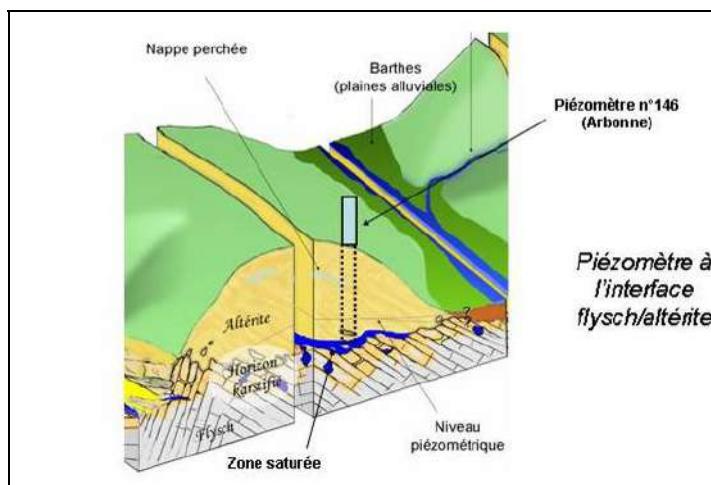
Localisation des piézomètres implantés sur la Côte Basque

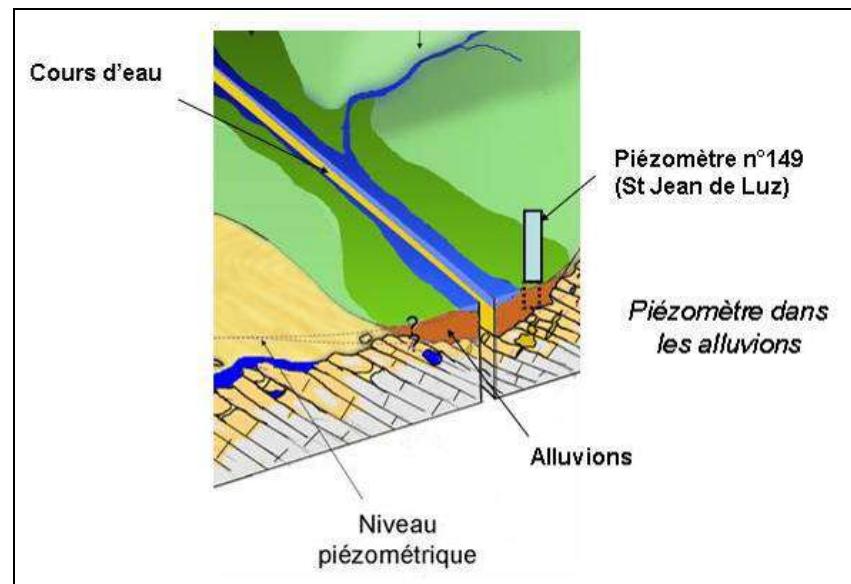
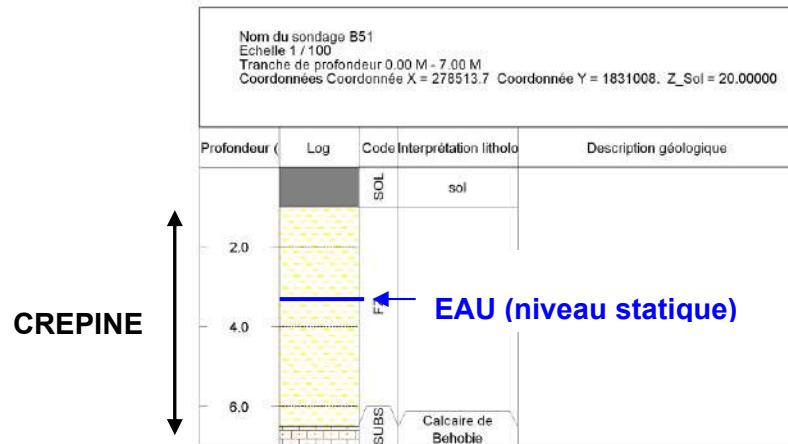


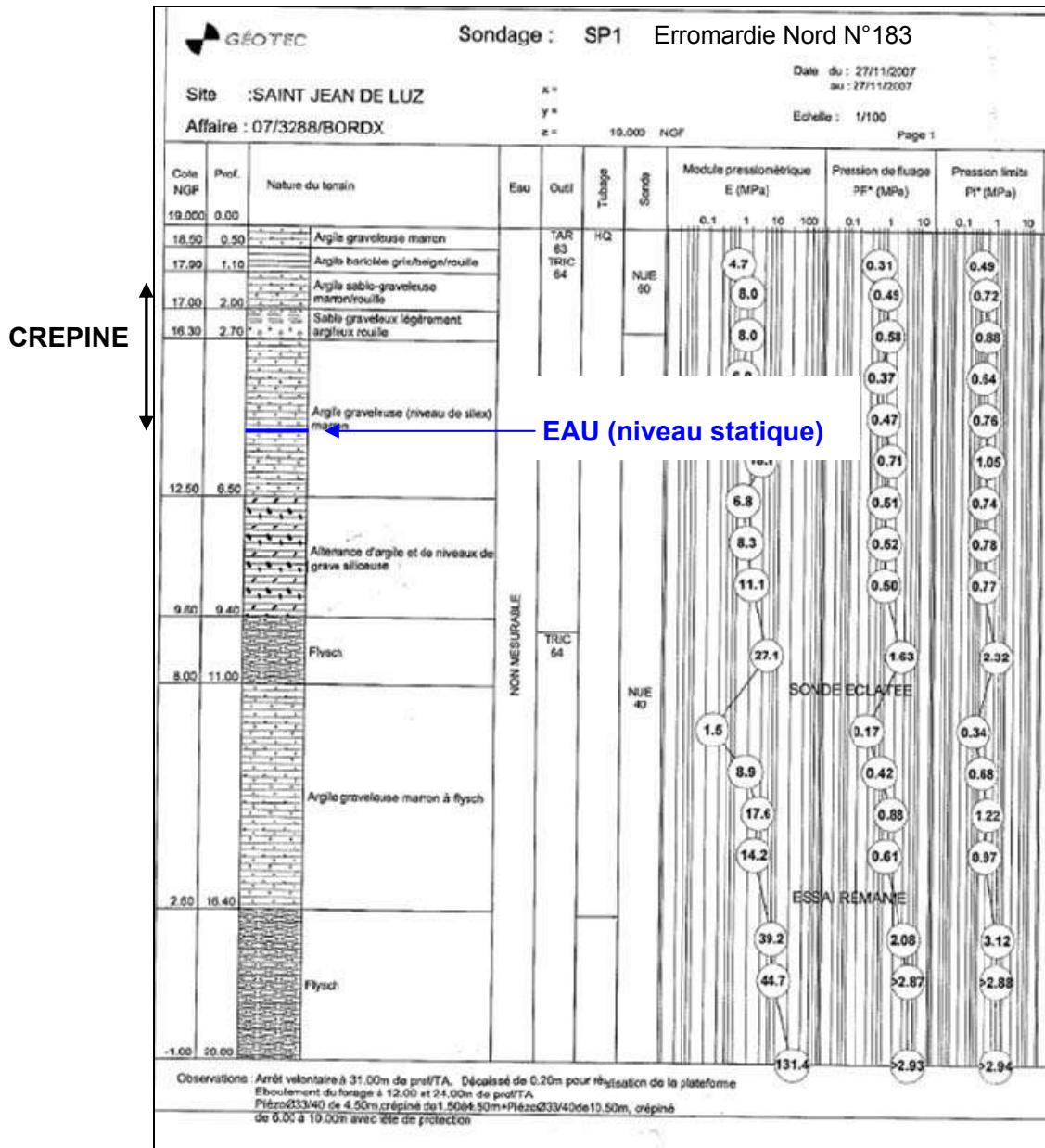
Log de forage du piézomètre N°150 (Saint-Jean-de-Luz) : niveau piézométrique dans le flysch
(source : Roquebert)



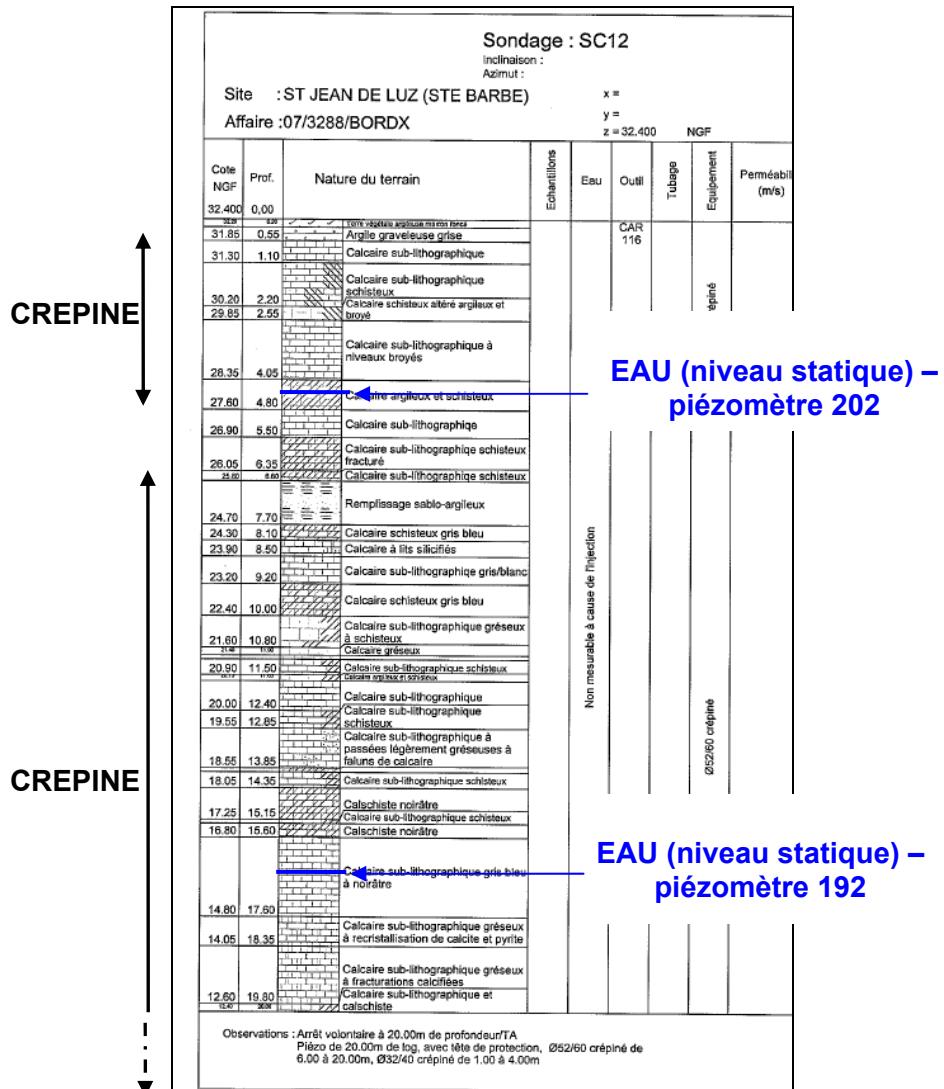
Log de forage du piézomètre N°146 (Arbonne) : niveau piézométrique dans l'altérite (nappe captive)
 (source : Roquebert)



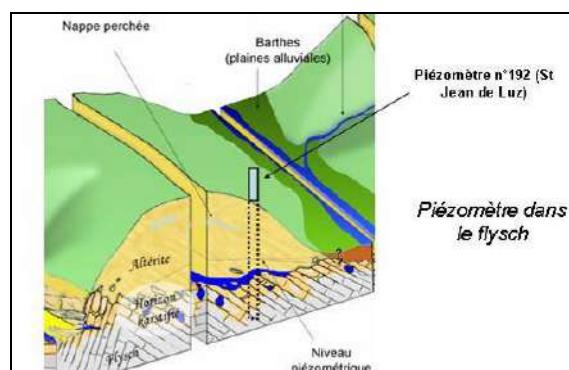


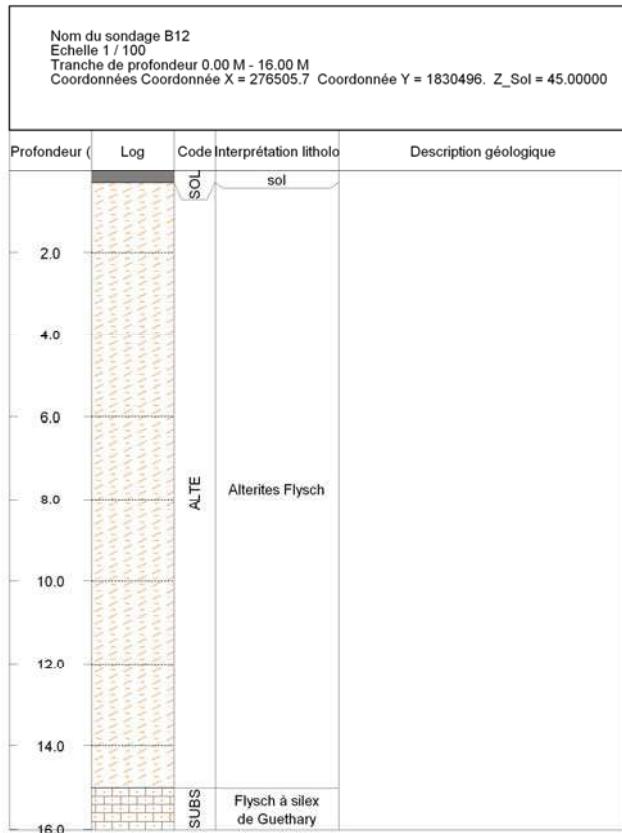


Log de forage du piézomètre N°183 (Saint-Jean-de-Luz) : niveau piézométrique dans l'altérite (nappe captive)
(source : Roquebert)

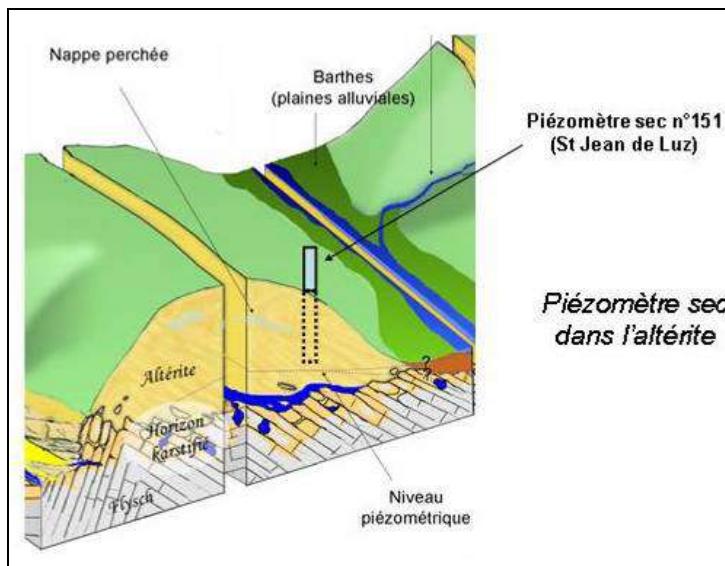


Log de forage des piézomètres N°192 et 202 (Saint-Jean-de-Luz) : niveau piézométrique dans le flysch (nappe libre) (source : Roquebert)





Log de forage du piézomètre N°151 (Saint-Jean-de-Luz) : sec (source : Roquebert)



Annexe 7

Saisie d'une fiche descriptive d'ouvrage dans une base de données Access



Formulaire de saisie des venues d'eau

Localisation

Commune: Saint-Jean-de-Luz

Lieu-dit: Errromardie Nord

Localisation verticale:

Altitude (m): 19

Altitude exacte relevée à l'aide du DGPS: 16,694

Caractéristiques

La source est-elle pérenne ?

Type de venue d'eau: Piezomètre

Précision: Mis en place par Géotec
Profondeur : 4,8 m ; diamètre : 3,5

Si piézomètre :
Hauteur de la marge: 0,65

Provenance: Interface roche mère/altérite

Précision:

Aquifère: Horizon karstifié du flysch

Précision:

Remarques: Numéroté 2 sur le couvercle (EN SPI 4,50 m)
Couplé avec un piézomètre (n°1) dans l'altérite (NOMVENUO 201)

DATE_OBS	AUT_OBS	ID_METEO	ID METHO	MARQUE
03/03/2008	Flora Lucassou	Giboulet (alternance pluie et Soleil et passage de nuages	GPS	Magellan Explorist 210
02/06/2008	Flora Lucassou	Pas d'information	GPS	Trimble R6
*				

Enr : [Navigation] 1 [Navigation] sur 2

Photographies

NOMVENUO	DATE	PHOTO	HT_AMAP	AUTEUR
191	31/01/2008	piézo_errromardie_Nord1.jpg	E:\Util\OCA\STG_OCA\Photos\Flora Lucassou	2 plé
72	19/01/2008	piézo_errromardie_Nord2.jpg	E:\Util\OCA\STG_OCA\Photos\Flora Lucassou	2 plé
73	19/01/2008	piézo_errromardie_Nord3.jpg	E:\Util\OCA\STG_OCA\Photos\Flora Lucassou	2 plé

Enr : [Navigation] 1 [Navigation] sur 4

Tableau de données

ID_SPI	NUO	Profondeur de la venue d'eau	Altitude dynamique de la surface piézométrique (m NGF)	Date de la mesure	Auteur de la mesure	Surface piézométrique (m NGF)	Sec ?
51	191	4,45		31/01/2008	Flora Lucassou	15,2	<input type="checkbox"/>
72	191	3,69		04/04/2008	Flora Lucassou	15,96	<input type="checkbox"/>
73	191			03/03/2008	Flora Lucassou		<input checked="" type="checkbox"/>

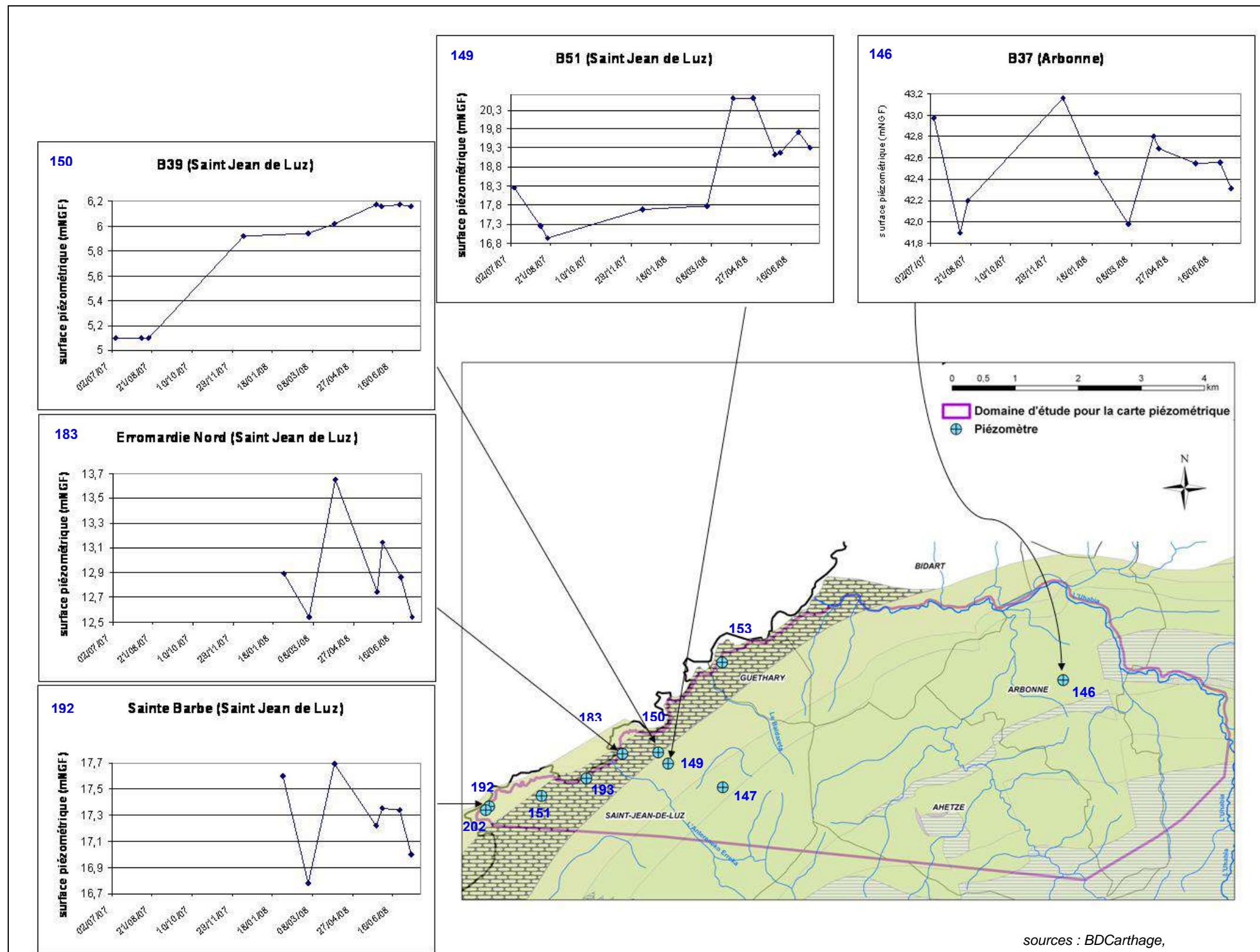
Enr : [Navigation] 1 [Navigation] sur 195

Annexe 8

Suivi piézométrique

NUMERO DANS LA BASE DE DONNEES	localisation	niveau piézométrique (m NGF)													battement interannuel (m)
		08/08/07	17/08/07	30/08/07	13/12/07	31/01/08	03/03/08	04/04/08	10/04/08	29/04/08	26/05/08	02/06/08	25/06/08	09/07/08	
PIEZOMETRES															
N°150	St Jean de Luz	sec	sec		5,92		5,94	6,02			6,17	6,16	6,17	6,16	> 0,24
N°149	St Jean de Luz	17,25	16,94		17,70		17,79	20,60		20,60	19,13	19,18	19,73	19,31	3,66
N°151	St Jean de Luz	sec	sec		sec		sec	sec			sec		sec	sec	0
N°147	St Jean de Luz	sec	sec		sec		sec	sec			sec		sec	sec	0
N°146	Arbonne	41,90	42,46		43,16		41,98	42,80	42,69		42,55		42,56	42,31	1,26
N°153	Guéthary	9,70	9,681				9,77	9,77			9,86		10,28	9,87	> 0,60
N°192	St Jean de Luz				17,60	16,78	17,69			17,22	17,35	17,34	17,00	0,91	
N°202	St Jean de Luz						28,92		28,92	28,92	28,92	28,92	28,92	28,92	0
N°183	St Jean de Luz				12,894	sec	13,654			12,74	13,14	12,86	12,54	> 1,11	
N°203	St Jean de Luz												4,08	20,67	
N°204	St Jean de Luz												15,66	10,80	
PUITS															
N°154	Arbonne		41,08		43,25			43,85					43,06	2,77	
N°155	Arbonne		26,95				27,30	28,01						1,06	
N°157	Arbonne		52,65				52,3	52,9					52,53	0,60	
N°158	Arbonne		34,23				34,3	34,82					34,48	0,59	
N°190	Arbonne					43,80	43,70	44,26					44,15	0,56	
N°194	Arbonne							58,12	57,85				57,09	1,03	
N°175	Ahetze			57,20			56,58						56,89	0,62	
N°176	Ahetze			50,60			50,00						50,22	0,60	
N°178	Ahetze			50,07			50,00						49,90	0,17	
N°189	Ahetze			15,60			15,85						16,13	0,53	
N°163	Bidart		7,15				7,42						7,67	0,52	

Tableau de synthèse des relevés piézométriques des puits et des piézomètres recensés sur le littoral basque entre août 2007 et juillet 2008



Chroniques piézométriques (août 2007 à juillet 2008) et carte de localisation

sources : BDCarthage,

Annexe 9

Rappels sur la géostatistique et la méthode du krigage Présentation du logiciel GDM

➤ **La géostatistique**

La géostatistique permet d'étudier de manière quantitative des phénomènes déployés dans l'espace et/ou le temps. On considère qu'une variable régionalisée $z(x)$ est la réalisation aléatoire d'une fonction $Z(x)$, où x représente tout point de l'espace étudié. Cependant on ne dispose que d'une seule réalisation $z(x)$ de cette fonction. Il faut donc formuler quelques hypothèses afin de pouvoir estimer les paramètres statistiques, notamment l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 :

- l'espérance mathématique est invariante par translation : $E[Z(x)] = m$, pour tout x ,
- la covariance est une fonction ne dépendant que de h , distance entre deux variables ($z(x)$ et $z(y)$ où $y = x + h$) : $\text{Cov}[Z(x), Z(y)] = C(h)$, pour tout x et y .

➤ **Le variogramme**

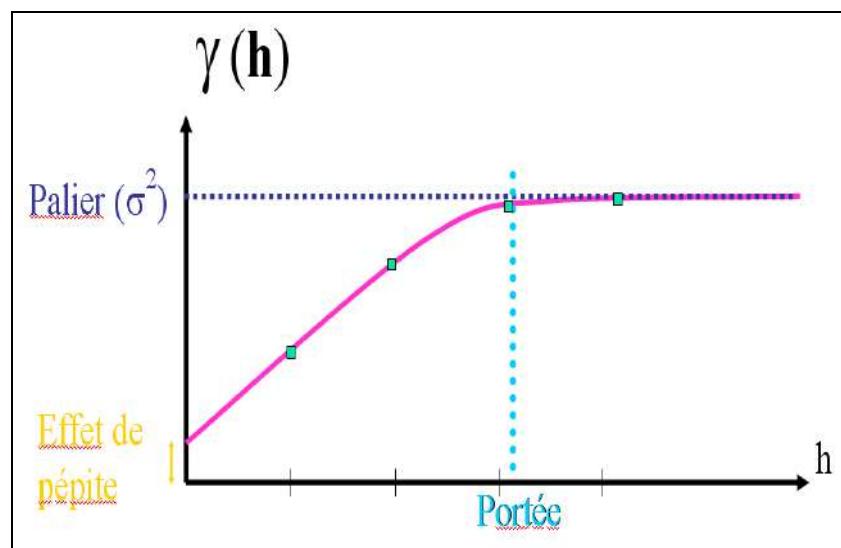
La fonction γ nommée variogramme, fonction la plus utilisée en géostatistiques, représente le degré de corrélation spatiale entre les données :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x + h)] = \frac{1}{2} E[(Z(x) - Z(x + h))^2]$$

avec Var : variance

E : espérance mathématique

$Z(x)$: valeur mesurée au point x



Principales caractéristiques d'un variogramme

Cette fonction croissante fournit de nombreuses informations sur le comportement conjoint des variables aléatoires :

- La portée (a) à partir de laquelle les deux variables ne sont plus liées linéairement (variogramme égal à une constante).
- Le palier (σ^2) représente la valeur constante à laquelle se stabilise le variogramme à partir d'une certaine distance (portée).
- L'effet de pépite (C_0) : en théorie, on devrait avoir un variogramme nul pour $h=0$ (données très proches). Mais on obtient parfois une valeur résiduelle en $h=0$, appelée effet de pépite. Elle peut être une à une erreur de mesure ou à une échelle non adaptée.

➤ ***Le krigage***

Il existe plusieurs méthodes permettant d'estimer les valeurs inconnues situées entre les points de données, à partir des valeurs connues. L'une des plus utilisées est le krigage, une méthode d'estimation linéaire. Un estimateur linéaire définit la valeur estimée comme une combinaison linéaire des autres valeurs. L'estimateur Z^* est de la forme :

$$Z_i^*(x) = \sum \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

avec : i de 1 à n ,

$Z_i^*(x)$: valeur estimée au point x ,

λ_i : pondérateur dépendant du point estimé,

$Z(x_i)$: la valeur connue ou déjà calculée.

Le krigage répond aux critères suivants :

- il minimise la variance de l'erreur d'estimation.
- il fixe systématiquement la moyenne des erreurs d'estimation à zéro (non biais).

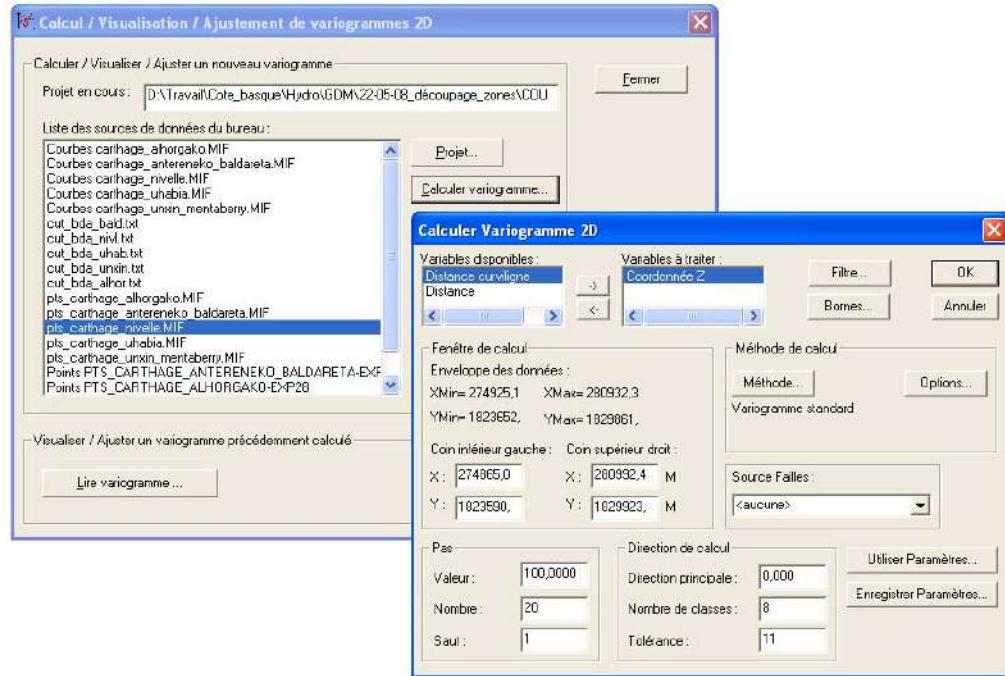
Il ne faut jamais oublier que la carte krigée ne ressemble pas à la réalité, il ne s'agit que d'une estimation entachée d'erreur. Il est nécessaire de garder un regard critique sur le résultat.

➤ ***Présentation du logiciel GDM***

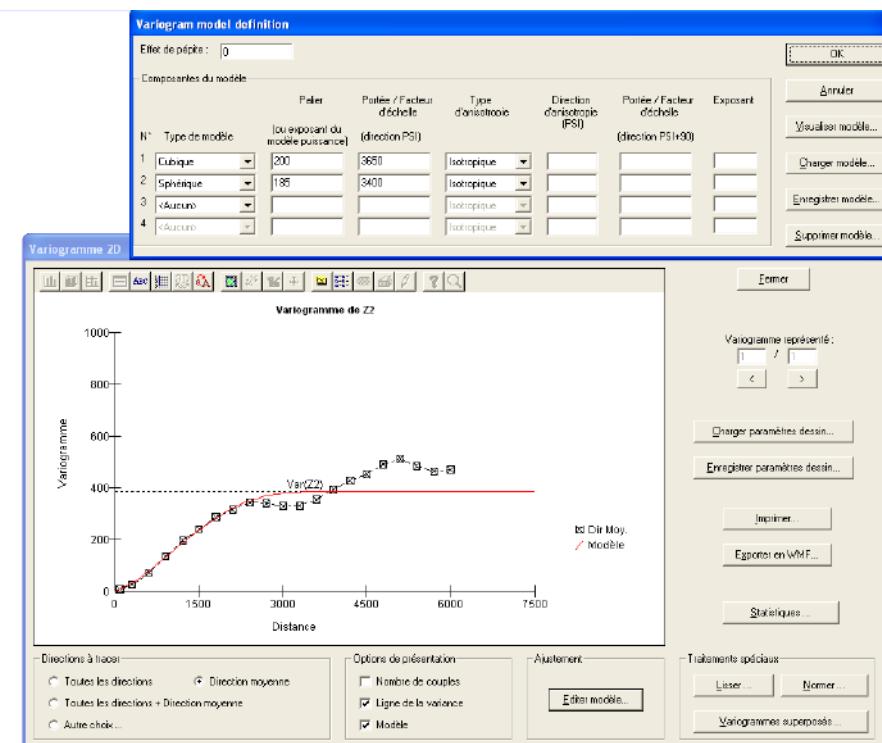
Le logiciel Geological Data Management (GDM) est développé et utilisé par le BRGM pour la modélisation géologique. Il permet de gérer des données géologiques de tout type pour produire des graphiques, des coupes, interpoler et modéliser les données en 3D.

GDM est utilisé pour l'exploitation des ressources minérales, pour la conception géotechnique, pour le diagnostic de pollution des sols et pour la gestion des ressources en eau.

Deux exemples d'interfaces sont donnés ci-dessous :



Interface permettant de calculer un variogramme 2D



Ajustement d'un modèle théorique sur le variogramme expérimental



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

Service Géologique Régional Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70