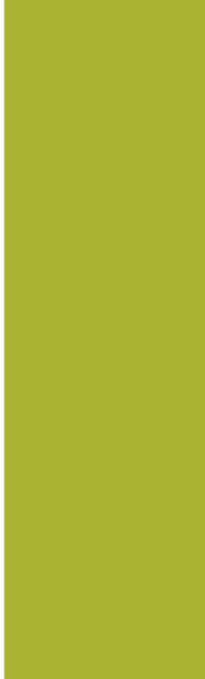


MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE



MASTER « *Hydrogéologie, Sol et Environnement* »

Master 1

**Etude hydrogéologique d'un versant instable :
Cas des glissements de terrain de Villerville-
Cricqueboeuf (Calvados, Basse-Normandie)**

Présenté par

Sabrina LAFENÊTRE

**Stage réalisé à GEOPHEN
Tuteur du stage : Olivier MAQUAIRE**

Année universitaire 2009-2010

Avant propos

Lors de ce stage, il m'a été donné de réaliser une étude hydrogéologique sur une zone instable située dans le Calvados, à Villerville et Cricqueboeuf (Basse-Normandie).

Afin de réaliser cette étude, j'ai travaillé dans plusieurs domaines :

- L'hydrologie : étude des eaux de surfaces (écoulements de surface et zone de stagnations, sources)
- L'hydrochimie : pompage et échantillonnage des eaux de nappe, puis filtration, mesure du pH, conductivité et température des eaux souterraines
- L'hydrogéologie : relevés piézométriques tous les mois et en cas de fortes pluies, essais de pompages
- La climatologie : étude de la pluviométrie, mise en relation avec la fluctuation de la nappe, calcul des réserves utiles et des pluies efficaces

J'ai ainsi effectué de nombreux travaux sur le site d'étude avec du matériel tel que : la sonde piézométrique, la pompe, le pHmètre, le conductivimètre, des flacons d'échantillonnage, les sondes automatiques déjà installées sur le site. J'ai aussi pu aider à la mise en place de matériel géophysique et à la réalisation de levés GPS. Ma dernière partie du travail sur le terrain a été de recenser toutes les sources et sourcins présents sur la zone du Cirque des Graves. Ainsi, 20 à 25 jours ont été monopolisés pour la réalisation de toute cette partie de mon stage sur le terrain. Grâce à cela, j'ai pu remarquer les problèmes imprévus qui peuvent se produire sur le site et apprendre à les gérer. L'autre avantage de ces journées est le contact avec la population, les mairies et toute personne qui pouvait être aider à la bonne connaissance du site.

La restitution de toutes les informations recueillies sur le parc des Graves et la Fosse du Macre a ensuite été permise avec logiciels ArcMap, Adobe illustrator, Diagrammes (pour l'hydrochimie), excel et word. Il a tout d'abord fallu que j'apprenne ou réapprenne à utiliser certains de ces logiciels notamment les 3 premiers. Environ un mois et demi a été nécessaire à cette restitution et mise en page des données de terrain.

Près d'un mois et demi, réparti dans toute la durée du stage, a servit à la documentation, la bibliographie et l'interprétation des données.

Plusieurs comptes rendus sur l'avancement de mon stage ont été effectués avec Oliver Maquaire et Candide Lissak. Un séjour de 3 jours à Strasbourg a permis de réaliser un état d'avancement de la thèse de Candide, avec Oliver Maquaire et Jean-Phillipe Mallet, co-directeur de la thèse de Candide, chercheur au CNRS à Strasbourg, auquel j'ai été convié. Ce séjour dans l'est de la France m'a permis, entre autre, de visiter le laboratoire d'analyses des sols.

Parallèlement à tout cela, je suis allé 2 jours sur le terrain de 2 autres doctorants. Le premier travaille sur les mouvements de terrain continentaux et le second travaille sur les déplacements sédimentaires du cours d'eau de la Seulle.

Remerciements

Pour tout ce que j'ai pu apprendre et effectuer, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage.

Tout d'abord, je remercie Daniel Delahaye (directeur du laboratoire GEOPHEN) ainsi qu'Olivier Maquaire (professeur), qui ont permis la réalisation et le bon déroulement de ce stage puis ma bonne intégration dans l'équipe.

Je souhaiterais remercier ensuite toutes les personnes de GEOPHEN présentes lors de ma période de stage, qui m'ont aidé à m'intégrer et m'ont apporté l'aide dont je pouvais avoir besoin : Blandine Parey, Robert Davidson, Laetitia Biree, Anne-Julia, Laurent Lespiez, Jean-Michel Cador, Olivier Cantat et les doctorants : Candide, Vincent, Sébastien, Matthieu, Pauline, Aline, Yann Le Drezen, Maxime Marie, Philippe Léger et Marianne

Je remercie enfin Vincent Marc pour m'avoir aidé à réaliser ce stage dans les meilleures conditions.

Résumé

Candide Lissak prépare actuellement une thèse sur le sujet des mouvements de terrain sur les côtes normandes, à Villerville et Cricqueboeuf. Pour son sujet, elle souhaite avoir des informations complémentaires sur le comportement hydrogéologique de la zone d'étude.

Pour cela, une étude de la piézométrie, la pluviométrie, et de l'hydrochimie sont à réaliser, ainsi que des pompages d'essais.

Ces données et l'étude de la géométrie du réservoir permettront de définir le système.

Certains bureaux d'études, notamment HYDROGOTECHNIQUES, ont décrits deux nappes sur le site : la nappe de la craie et une nappe superficielle. L'étude hydrogéologique permettra, entre autres, de confirmer ou non cette interprétation des données.

Sommaire

Table des illustrations.....	7
Liste des annexes	7
Introduction	8
I. Présentation générale	9
1. L'organisme d'accueil : GEOPHEN	9
a. Présentation	9
b. Les mouvements de terrain.....	9
2. Cadre de l'étude	9
a. Localisation géographique	9
b. Géologie régionale	10
c. Géologie locale	11
d. Données hydrogéologiques et hydrologiques.....	13
3. Les objectifs de l'étude.....	13
II. Géométrie du réservoir principal	14
1. Données des sondages	14
2. Résultats des levés géophysiques	14
3. Conditions aux limites	15
III. Données piézométriques et pluviométriques	16
1. Réseau d'observation	16
2. Mesures piézométriques et variations de la nappe	16
3. Carte piézométrique.....	18
4. Relation entre les apports d'eau et la nappe	20
IV. Caractéristiques hydrodynamiques.....	22
1. Pompages et slug test : méthodes et mesures	22
2. Résultats : paramètres hydrodynamiques	23
3. Relation entre les paramètres obtenus et les variations piézométriques	24
V. Hydrochimie	25
1. Echantillonnage et mesures hydrochimiques	25
2. Contexte hydrochimique général.....	25
a. Faciès chimique	25
b. Répartition spatiale de chaque élément.....	27
3. Relation entre l'hydrochimie et la géologie	27
Conclusion	29
Bibliographie.....	30

Table des illustrations

Figure 1: Localisation des zones d'études 10

Figure 3: Coupe géologie simplifiée du bassin parisien 10

Figure 2: Limites du bassin parisien 10

Figure 4: Profil topographique et géologique interprété à partir des données de sondages..... 11

Figure 5: Photographie de la morphologie (blocs de craie) 11

Figure 6: Coupe lithostratigraphique synthétique de la région de Villerville (D'après O.Maquaire, 1990)..... 12

Figure 7: Profil topographique et géologique 14

Figure 8: Exemple de résultat et d'interprétation de données géophysiques..... 14

Figure 9: Photographie de la mare 1 15

Figure 10: Variations des niveaux d'eau dans chaque piézomètre 17

Figure 11: Carte piézométrique..... 19

Figure 12: Graphique représentatif de la pluviométrie à St Gatien et la piézométrie à Danestal..... 20

Figure 12: Graphique représentatif de la pluviométrie de Danestal et la piézométrie Orphi (année 2009)..... 21

Figure 13: Photographie d'un pompage..... 22

Figure 14: Tableau des données de perméabilité et transmissivité..... 23

Figure 15: Diagramme de Piper..... 26

Figure 16: Relation entre K^+ et Na^+ 28

Annexes

Annexe 1 : Cartes de localisation des piézomètres, mares, sources 32

Annexe 2 : Données des sondages 35

Annexe 3 : Altitude des piézomètres 39

Annexe 4: Graphiques des variations piézométriques de chaque piézomètre 40

Annexe 5 : Equation de Bouwer-Rice..... 45

Annexe 6 : Résultats des analyses hydrochimiques (en meq/L) 47

Introduction

Les côtes du Calvados, entre Deauville et Honfleur, sont périodiquement touchées par des mouvements de terrain. Il a été montré que ces déplacements sont liés à l'hydrologie et l'hydrogéologie. Candide Lissak, qui travaille sur ce sujet dans le cadre de sa thèse, cherche à définir le système hydrogéologique afin de le mettre en relation avec les déplacements qui subviennent sur le site.

Dans ce cadre, la réalisation d'une étude hydrogéologique m'a été confiée. Afin de répondre au mieux aux attentes de ce stage, les axes de travail sont :

- La piézométrie
- La pluviométrie
- Les paramètres hydrodynamiques (pompages d'essai)
- L'hydrochimie

Le but de cette étude est de mieux connaître les phénomènes souterrains caractéristiques de cette zone remaniée géologiquement.

Afin de décrire les travaux que j'ai réalisés et répondre aux questions que l'on se pose sur l'aquifère côtier concerné, j'ai articulé mon rapport en 5 parties : la présentation générale du cadre d'étude sera suivi de la description de la géométrie du réservoir. Les 3 parties suivantes décriront mon travail sur les différents axes développés : la piézométrie et les relations de la nappe avec la pluviométrie, la définition des paramètres hydrodynamiques et l'hydrochimie.

I. Présentation générale

1. *L'organisme d'accueil : GEOPHEN*

a. Présentation

GEOPHEN (« Géographie physique et environnement ») est un centre de recherche de l'Université de Caen, en Basse-Normandie. Il est tourné vers les aspects fondamentaux de la géographie physique, les problèmes environnementaux et les recherches appliquées et partenariales liées à l'aménagement.

Ce laboratoire fait partie de l'UMR (unité mixte de recherche) caennaise et c'est un des laboratoires constitutifs de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines(MRSH). La politique scientifique de celui-ci est définie par les mots-clés : Littoral, Environnement, Géomatique, Télédétection (LETG), traduisant les préoccupations majeures des équipes.

Les activités scientifiques de l'unité se sont construites autour de quatre axes :

- Axe 1 : Analyse des processus dynamiques à l'interface Nature / Société.
- Axe 2 : Analyse du fonctionnement des hydrosystèmes et de la dynamique des échanges continent/océan.
- Axe 3 : Étude des littoraux et des dynamiques territoriales de la mer côtière et de l'océan.
- Axe 4 : Analyse des conditions de la gestion intégrée des territoires et d'un développement des activités humaines compatible avec la préservation du patrimoine naturel et culturel.

Afin de travailler sur ces axes, l'équipe du GEOPHEN est constituée de trois professeurs dont Daniel Delahaye, directeur du laboratoire, et Olivier Maquaire, mon maître de stage, six maîtres de conférences, un ingénieur d'étude, une secrétaire gestionnaire, une technicienne de laboratoire, des doctorants et des étudiants avancés (Master).

b. Les mouvements de terrain

Mon stage a été réalisé dans le cadre de la thèse de Candide Lissak, qui a pour sujet: **Analyse du risque mouvement de terrain associé aux côtes à falaise du Calvados : Caractérisation, fonctionnement et gestion.**

En Normandie, le long des côtes du Calvados, environ 12 km des côtes du Pays d'Auge sont périodiquement affectées par des glissements de terrain rotationnels et translationnels. Ces glissements se déclenchent dans des formations argileuses qui sont surmontées de craies et de dépôts quaternaires. Le Cirque des Graves à l'ouest de Villerville et La Fosse du Macre à l'est Cricqueboeuf sont principalement concernés par ces glissements actifs (Fig.1). En effet, les deux glissements sont considérés comme des glissements lents affectés continuellement par des faibles déplacements (5-10 cm.an-1) mais qui ont subi à plusieurs reprises plusieurs phases d'accélération en 1988, 1995 et 2001 suite à de longs et importants épisodes pluvieux. Ces incidents ont causé d'importants dégâts.

2. *Cadre de l'étude*

a. Localisation géographique

En Normandie, le long des côtes du Calvados, environ 12 km des côtes du Pays d'Auge sont périodiquement affectées par des glissements de terrain. Le Cirque des Graves à l'ouest de Villerville et La Fosse du Macre à l'est Cricqueboeuf sont principalement concernés par ces glissements actifs. Ces deux cirques, correspondant à la zone d'étude, représentent une bande de 2km de longueur et 800m de largeur (figure 1).

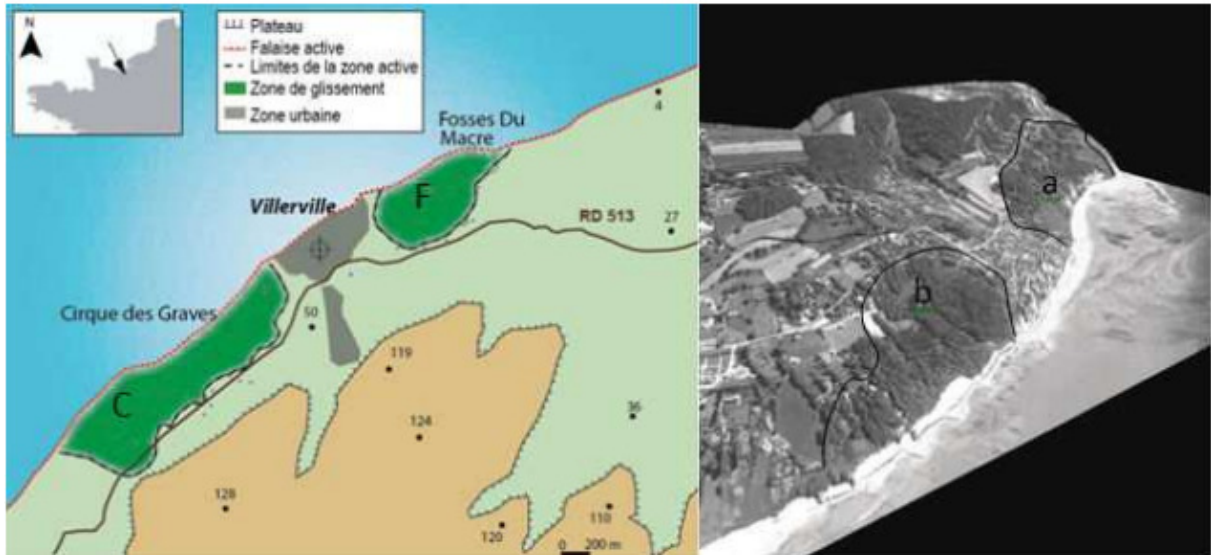


Figure 1: Localisation des zones d'études

b. Géologie régionale

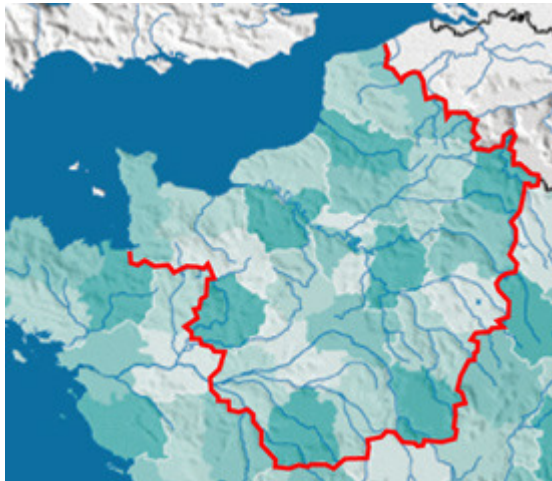


Figure 2: Limites du bassin parisien (Source: google map)

La Basse-Normandie fait partie du bassin parisien.

C'est une région géologique sédimentaire comprenant tout le centre-nord de la France, débordant sur la Belgique, le Luxembourg et le sud-ouest de l'Allemagne, s'étalant du Massif armoricain aux Vosges et des Ardennes au Massif central. Le bassin présente un paysage sédimentaire relativement uniforme.

Voici une coupe simplifiée de la géologie du bassin parisien :

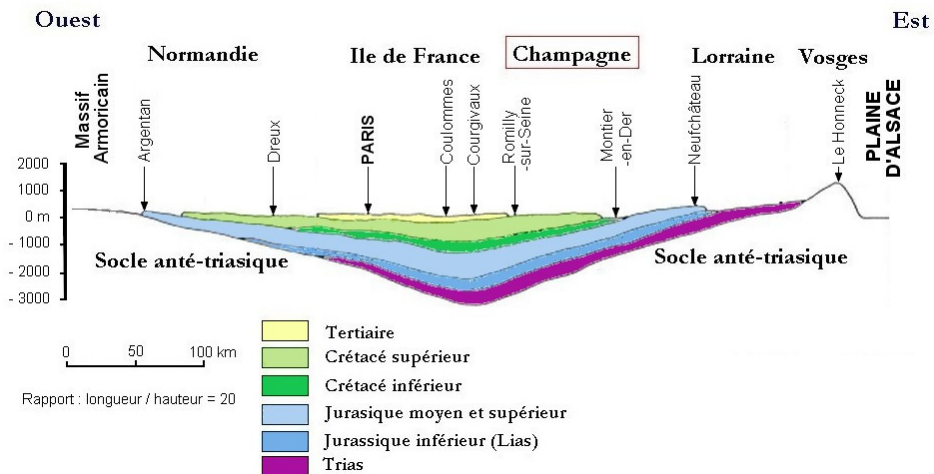


Figure 3: Coupe géologique simplifiée du bassin parisien

c. Géologie locale

Dans la région de Villerville, en zone stable, nous retrouvons la stratigraphie du bassin parisien :

- Le crétacé supérieur, avec la craie du cénomanien
- Le crétacé inférieur avec les sables et argiles de l'Albien
- Le jurassique supérieur avec les marnes et calcaires du Kimméridgien

Ceci est décrit sur le graphique de la page suivante.

Dans notre zone d'étude (la zone active), nous retrouvons les couches de craie, de sable, d'argile et de marne mais elles ne sont plus en place.

Les mouvements de terrain de la côte normande sont caractérisés par des déplacements de panneaux de craie qui emportent les sables et marnes et modifient ainsi l'ordre stratigraphique. La figure et la photographie suivante montre ce phénomène, qui affecte visiblement la morphologie du site.

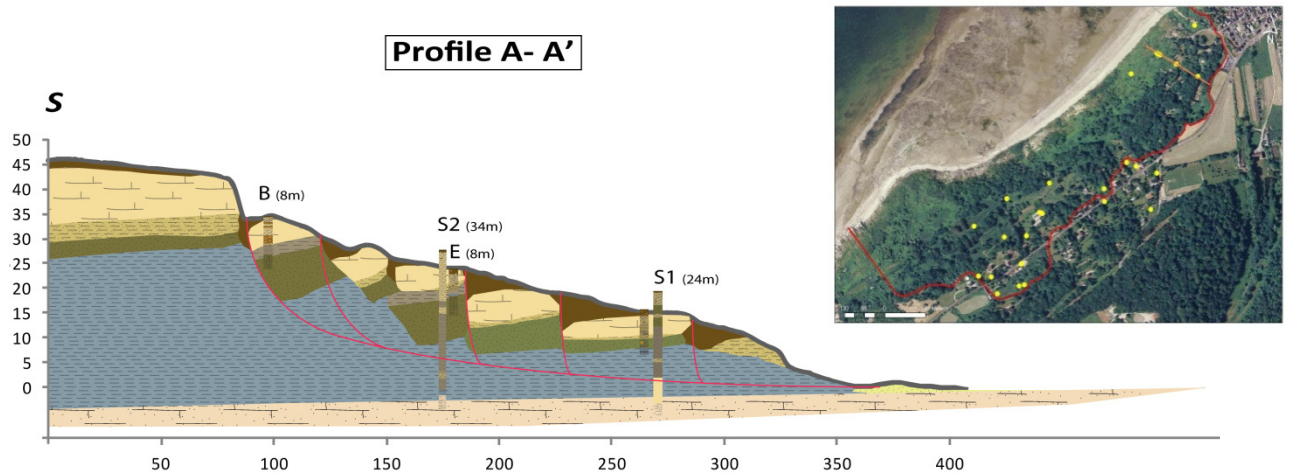


Figure 4: Profil topographique et géologique interprété à partir des données de sondages



Figure 5: Photographie de la morphologie (blocs de craie)

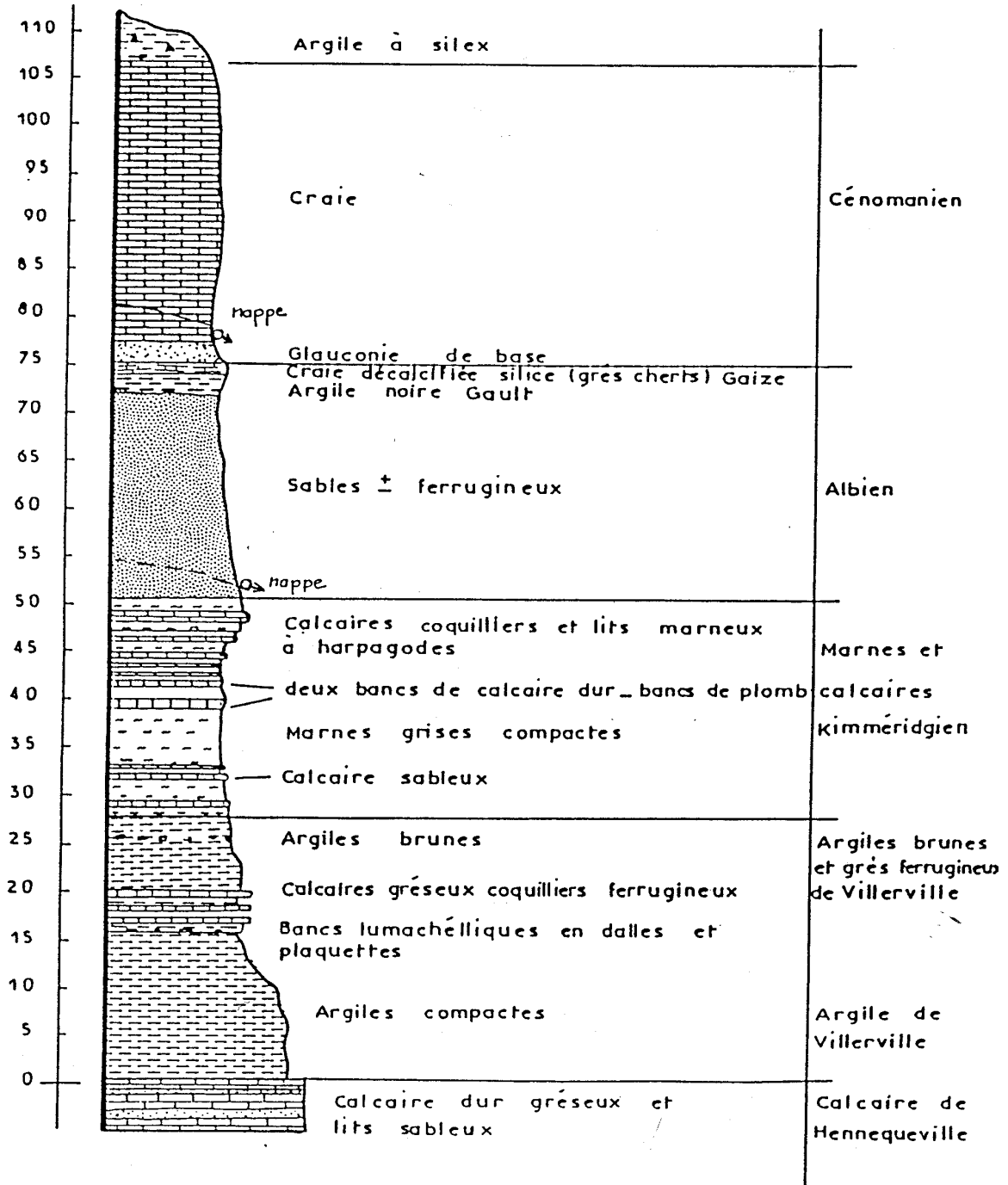


Figure 6: Coupe lithostratigraphique synthétique de la région de Villerville (D'après O.Maquaire, 1990)

d. Données hydrogéologiques et hydrologiques

⇒ Comme il a déjà été dit plus haut, le site est situé dans le bassin parisien, aux abords de la Manche. La nappe principale y est la nappe de la craie. Cette craie est datée du cénomanien, entre 96 et 92 millions d'années. Cette craie du Cénomanien est plus ou moins massive, en bancs réguliers et contient de nombreux lits de silex. Elle est retenue par la glauconie de base. Une autre nappe, beaucoup moins importante que la première, est contenue dans les sables albiens et peut être en relation avec la nappe de la craie. (O. Maquaire, 1990)

D'après d'anciens rapports réalisés par le BRGM ou des bureaux d'études privés, une nappe superficielle est présente sur le site du Cirque des Graves.

⇒ Le climat du Calvados peut, comme dans le reste de la Normandie, varier très fortement selon les endroits. Dans ce département, la moyenne annuelle d'ensoleillement est de 1973 heures et 770 mm de pluie tombent en moyenne chaque année. La proximité de la mer et les marées fait varier le climat par rapport à l'intérieur des terres.

Sur Deauville, en 2009, il est tombé 735,1 mm de pluie d'après les données de Météociel et entre mai et décembre (données non connues de janvier à avril), 1162,2 heures de pluies sont tombées.

3. Les objectifs de l'étude

Suite aux travaux réalisés par Olivier Maquaire lors de sa thèse : « Les mouvements de terrain de la côte du Calvados : recherche et prévention » en 1990, nous savons que les glissements de terrain sont à commande hydrologique.

Candide, dans le cadre sa thèse, cherche à déterminer les seuils de déclenchement de ceux-ci et préciser les vitesses de déplacement et de vulnérabilité. Pour cela, elle souhaite mettre en relation la pluviométrie, les variations de nappe et les mouvements de terrain. Une étude hydrogéologique permet de répondre à ses attentes.

Nous étudierons la piézométrie, la pluviométrie, les caractéristiques hydrodynamiques et l'hydrochimie de la nappe.

Les objectifs principaux sont :

- Définir s'il y a une ou plusieurs nappes
- Décrire cette ou ces nappes
- Etudier les variations du niveau d'eau souterraine
- Mettre en relation les variations de nappe et la pluviométrie
- Connaître les caractéristiques hydrodynamiques de la (les) nappe(s) en réalisant des essais de pompage. En tirer des valeurs de perméabilité et transmissivité.
- Connaître le ou les faciès présents dans la nappe grâce à l'hydrochimie et mettre en avant des zones d'infiltrations préférentielles

II. Géométrie du réservoir principal

1. Données des sondages

Les sondages réalisés par le bureau d'études HYDROGEOLOGIQUES et par GEOPHEN ont permis d'avoir la géologie à la verticale de chaque point et d'avoir une connaissance géologique générale du site.

Les log obtenus ont permis de réaliser des profils topographiques et géologiques tels que celui-ci :

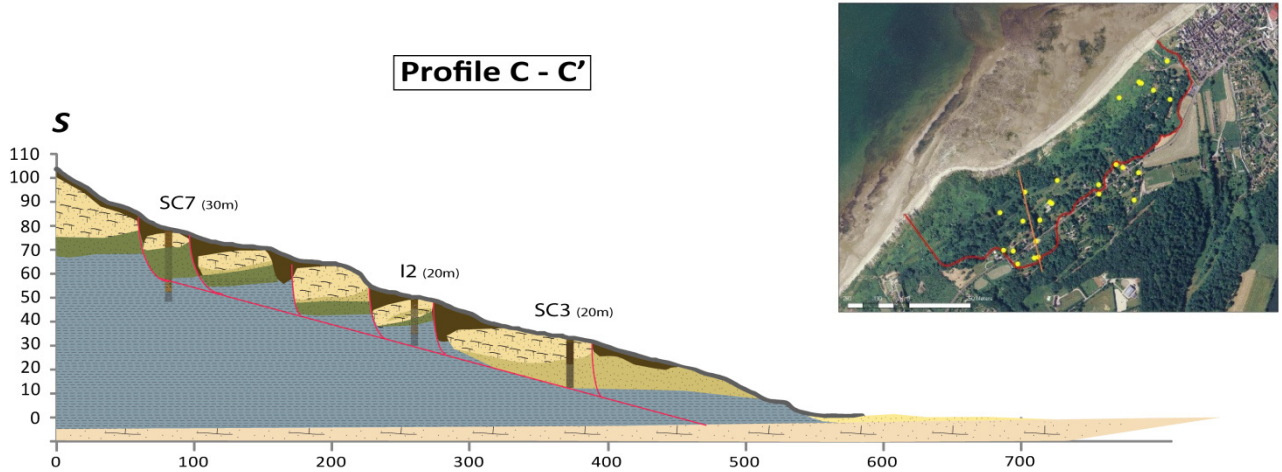


Figure 7: Profil topographique et géologique

2. Résultats des levés géophysiques

Des levés géophysiques ont aussi été réalisés, avec l'aide de chercheurs de Strasbourg, sur tout le Cirque des Graves afin de compléter les données déjà existantes. La tomographie électrique donne des données de résistivité ensuite interprétées à partir des données déjà existante, notamment celles des log. Un exemple est présenté sur la figure suivante :

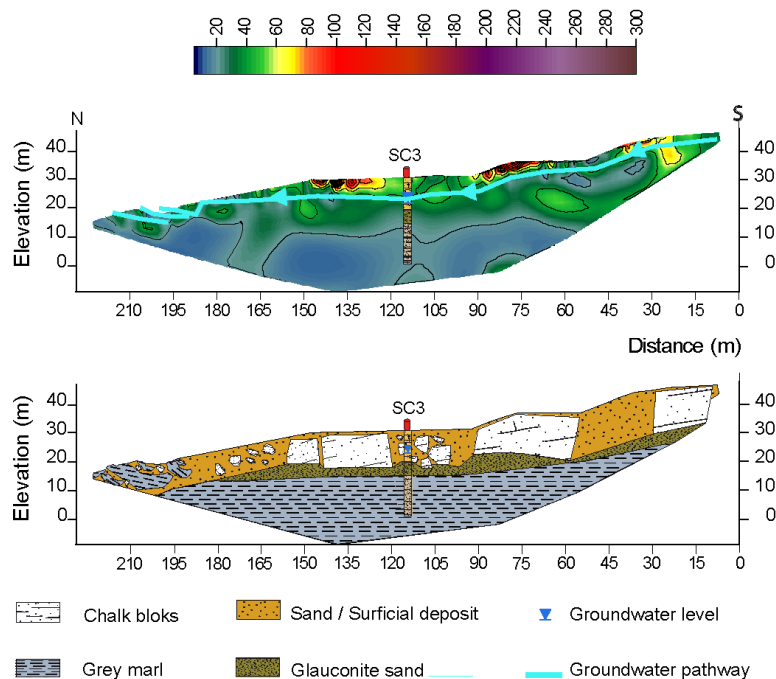


Figure 8: Exemple de résultat et d'interprétation de données géophysiques

3. Conditions aux limites

Parallèlement à toutes ces données géologiques, d'autres informations ont été recueillies sur le terrain : les données des rivières, lacs, mares et sources pouvant exister sur et autour du site. L'étude de ces eaux de surface permet d'avoir une connaissance des échanges pouvant exister entre la nappe et les eaux de surface.

Aux abords proches et sur les sites, seuls les lits de rivières subsistent mais aucune eau n'a été remarquée dans ceux-ci d'avril à juillet 2010 ni dans le passé proche (quelques années auparavant) selon la population. De même, aucun lac n'a été trouvé.

Plusieurs mares et sources sont présentes sur le Cirque des Graves et la Fosse au Macre. Celles-ci ont été recensées et cartographiées. La carte est en annexe 1.

⇒ Lors d'une sortie sur le Cirque des graves en temps de pluie, les ruissellements ont pu être observés. Les mares 1 et 2 semblent être alimentées par les eaux de ruissellement venant de la route, proche de la commune de Villerville. La comparaison des altitudes et des niveaux d'eau ont permis d'écarter l'hypothèse d'une relation entre les mares et la nappe. Pour les autres mares, aucun ruissellement allant dans leur direction n'a été observé.

⇒ De nombreuses sources et sourcins sont présents dans la zone environnant le piézomètre SC3. Les eaux de ces sources sont toutes récupérées par des canaux et drains qui les dirigent vers la mer. Ils sont représentés dans l'annexe 1 précédemment cité.

A la Fosse du Macre, les mares sont pour la plupart alimentés par des tuyaux amenant les eaux de ruissellement et certaines eaux domestiques.



Figure 9: Photographie de la mare 1

III. Données piézométriques et pluviométriques

1. Réseau d'observation

Afin d'étudier la piézométrie et la pluviométrie, la zone d'étude est équipée de :

⇒ 18 piézomètres, dont :

- A, B, C, D, E, F qui sont des piézomètres récents, de 2009, dont l'installation a été demandée par GEOPHEN
- SC1, SC3, SC7, SD4, SD5, SD6, Orphi, DemA, DemB utilisés régulièrement, dont l'installation a été réalisée soit par le bureau d'études hydrogéotechniques soit par un autre bureau d'étude sur la demande des propriétaires.
- SC6, Ramiers sont très peu accessibles car ils sont situés dans des propriétés souvent closes.

Des données de crépine et de géologie concernant certains de ces piézomètres sont manquantes sur les rapports.

⇒ 3 puits domestiques (Houx, Tainfray, Aumone)

⇒ 4 inclinomètres, qui sont plutôt utilisés pour mesurer l'inclinaison du matériel par rapport à la verticale, mais nous l'utilisons aussi pour relever le niveau de l'eau. Etant donné que ces inclinomètres n'ont pas le même but que les piézomètres, ils n'ont pas de crépine mais nous pouvons tout de même observer la fluctuation du niveau de la nappe.

3 piézomètres et un inclinomètre sont équipés d'appareils permettant un enregistrement automatique des données : SD4, I2 et Orphi sont équipés d'un paratronic qui prend une valeur de pression ensuite convertie en niveau d'eau, SD6 est équipé d'un enregistreur multi-paramètre appelé CR1000 qui, en plus de donner un niveau d'eau, informe sur la température de l'eau. Cet appareil est aussi relié à un pluviomètre, situé à côté. Le pas de temps de tous ces enregistreurs automatiques est de 6 minutes. Les données doivent être récupérées toutes les 3 semaines environ.

2. Mesures piézométriques et variations de la nappe

Les mesures piézométriques ont été réalisées en continu grâce aux paratronic et CR1000, puis ponctuellement grâce à une sonde piézométrique de 30m. Les relevés ont été réalisés au minimum une fois par mois puis après chaque épisode pluvieux. Nous avons ainsi au minimum 1 à 2 valeurs de piézométrie par mois depuis avril jusqu'à fin juillet 2010.

Ces données complètent les données recueillies depuis 1985, début de la surveillance du site.

Afin de comparer les valeurs obtenues, nous avons représenté graphiquement le niveau d'eau de chaque piézomètre à partir de 2006. Ce graphique est représenté page suivante. Les fluctuations sont aussi représentées graphiquement sur l'annexe 4, piézomètre par piézomètre, afin de mieux appréhender les variations de niveau de chacun.

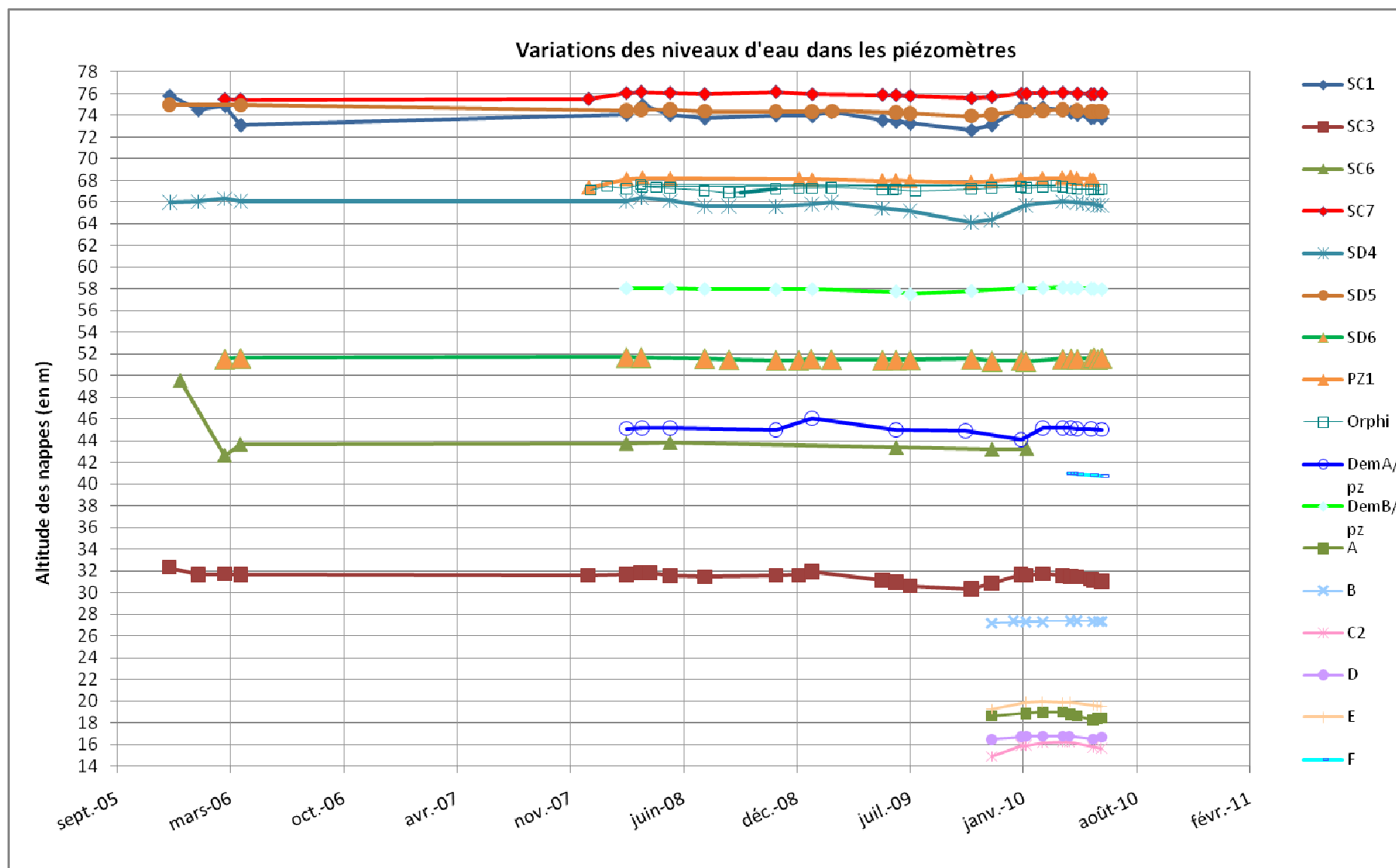


Figure 10: Variations des niveaux d'eau dans chaque piézomètre

Le comportement du niveau d'eau de chacun des piézomètres n'est pas similaire. En effet, certains piézomètres ont variés de -1m d'eau entre avril et juillet 2010 (SC1, SC3 par exemple) tandis que d'autres, sur la même période, n'ont variés que de quelques centimètres ou dizaines de centimètres. L'exemple du sud-ouest de la zone d'étude montre bien cette forte variation de comportement entre chaque piézomètre, distant de parfois quelques mètres : Les piézomètres SC7 et SD5 sont situés à 20m l'un de l'autre (différence d'altitude de 1m) et ont un comportement similaire, environ 30 cm en moins sur le niveau de la nappe en 4 mois, tandis que SC1, éloigné d'environ 70m et de même altitude que SC7 (77.5m) des 2 précédents montre une variation de nappe de -1.10m en 4 mois. Malheureusement, la seule information qui nous permettrait de faire une hypothèse par rapport à cela, c'est-à-dire la profondeur de la crépine, n'est connue que sur SD5, où la crépine fait toute la longueur du piézomètre.

Néanmoins, plus en aval, nous avons des données plus intéressantes qui nous permettraient éventuellement d'émettre une hypothèse. Le piézomètre SC3 est passé d'avril à juillet 2010 à une valeur de piézométrie de 2.50m à 3.38m en dessous du sol. Or, dans cette zone, aux alentours du piézomètre, sont présents de nombreuses sources et sourcins, avec une altitude plus haute pour certains. Cela pense à croire qu'une nappe superficielle est présente dans cette zone sud-ouest. Néanmoins, nous ne connaissons pas ici aussi les données sur la crépine, celles-ci pouvant confirmer ou supprimer cette hypothèse.

Les terrains présents sur cette zone étant remaniés à cause des mouvements de terrain, la géologie est assez complexe. Cette nappe superficielle serait due à une couche argileuse ou de craie plus indurée, compactée dans les premiers mètres du sous-sol.

Cette nappe superficielle semble s'étendre jusqu'au piézomètre SD4.

Les données pluviométriques et les relations avec la nappe pourront par la suite donner un complément d'information.

3. Carte piézométrique

Grâce aux différentes données, nous avons pu réaliser une carte piézométrique. Cette carte a été réalisée grâce au logiciel Arcgis et la méthode du spline pour interpoler les données.

Voici la carte résultante :

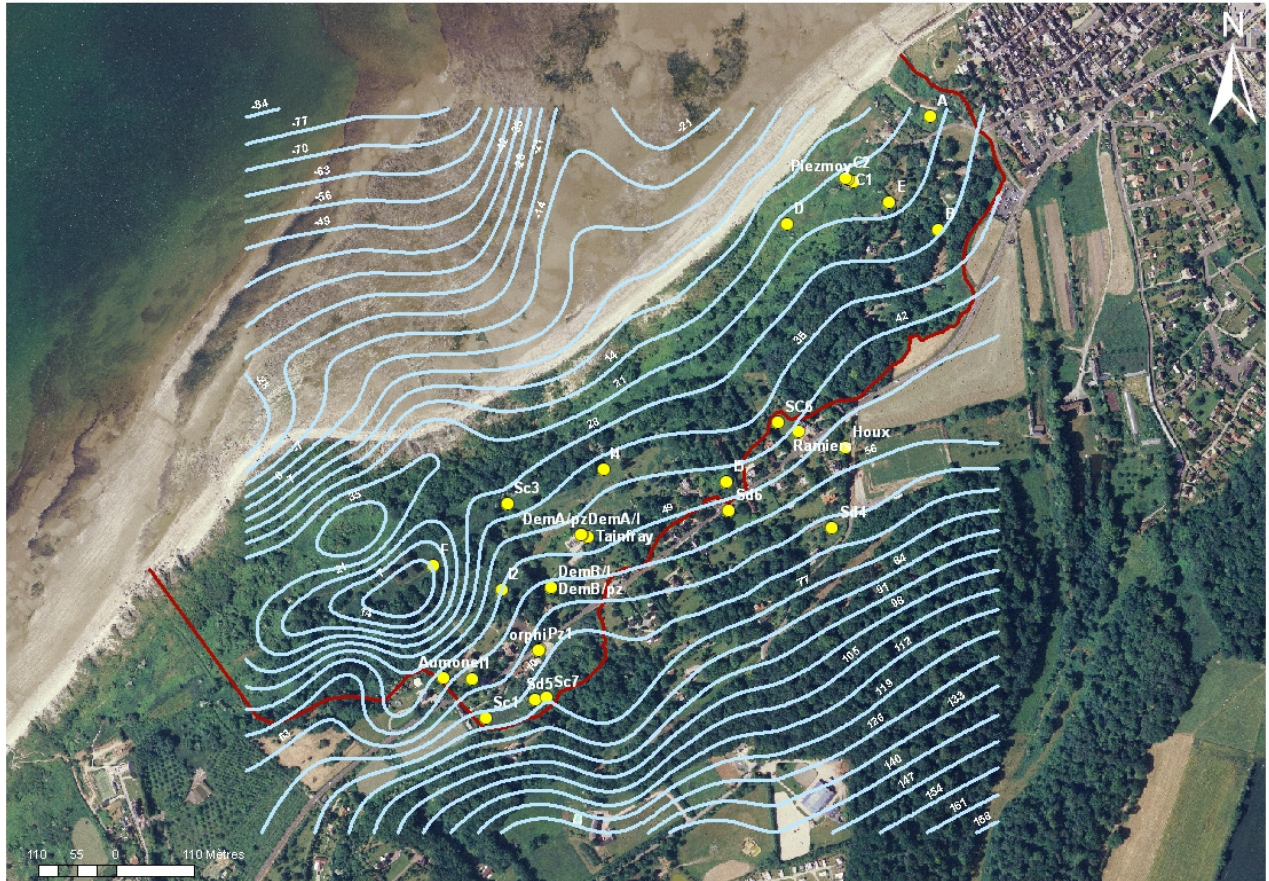


Figure 11: Carte piézométrique

L'eau souterraine circule parallèlement à la mer, de l'intérieur des terres vers la mer.

Malgré la tentative de forçage des valeurs de piézométrie, le logiciel met ces 2 zones de cercles à l'ouest de la zone, qui ne correspond à rien sur le site. Peut-être que ce sont les valeurs de sources qui permettent d'avoir ce résultat. Cela montre que proposer la présence d'une seule nappe n'est pas cohérent sur cette zone. Cette hypothèse sera encore discutée par la suite.

4. Relation entre les apports d'eau et la nappe

Les apports d'eau sur la zone sont principalement la pluviométrie et les relations entre les nappes, non estimables. Sur le site, un pluviomètre est installé mais les données principales utilisées sont les données de Saint-Gatien, ville située à 9 km du site d'étude. Les données sont des données décennales. L'ETP est aussi connue sur le site de Saint-Gatien, ce qui permet de calculer la pluie efficace.

Depuis 1974, au niveau pluriannuel, les variations de nappe à Danestal, 23km de Saint-Gatien, par rapport à la pluie efficace à St-Gatien donnent le graphique suivant :

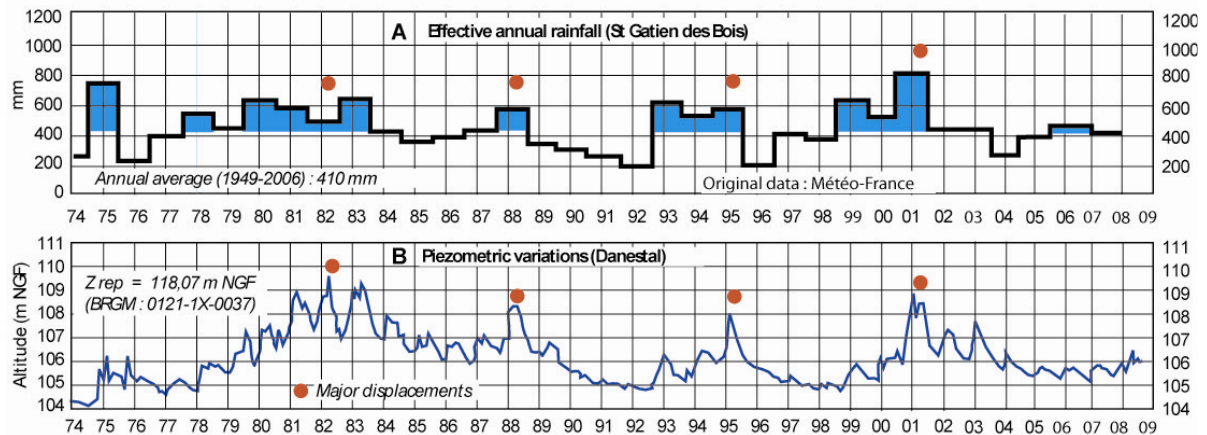


Figure 12: Graphique représentatif de la pluviométrie à St Gatien et la piézométrie à Danestal (entre 1974 et 2009)

La pluie est efficace et plus ou moins importante entre 1974 et 1984, tandis qu'ensuite près de 4 ans séparent une ou 3 années de présence de pluie efficace. La piézométrie suit quelque peu la pluviométrie, avec des variations du niveau de la nappe nombreuses et importantes entre 1974 et 1987, puis un cycle se met plus ou moins en place avec tous les 6 ou 7 ans un pic du niveau de la nappe. La nappe semble donc, au niveau pluriannuel, avoir une réponse rapide par rapport à la pluviométrie. Néanmoins, après ce pic, le niveau de l'eau redescend très vite et très bas. Ces pluies efficaces ne permettent donc pas une recharge des nappes à long terme.

Au niveau annuel, sur l'année de 2009, les données sont comparées avec le piézomètre Orphi situé sur le site. Voici les graphiques obtenus :

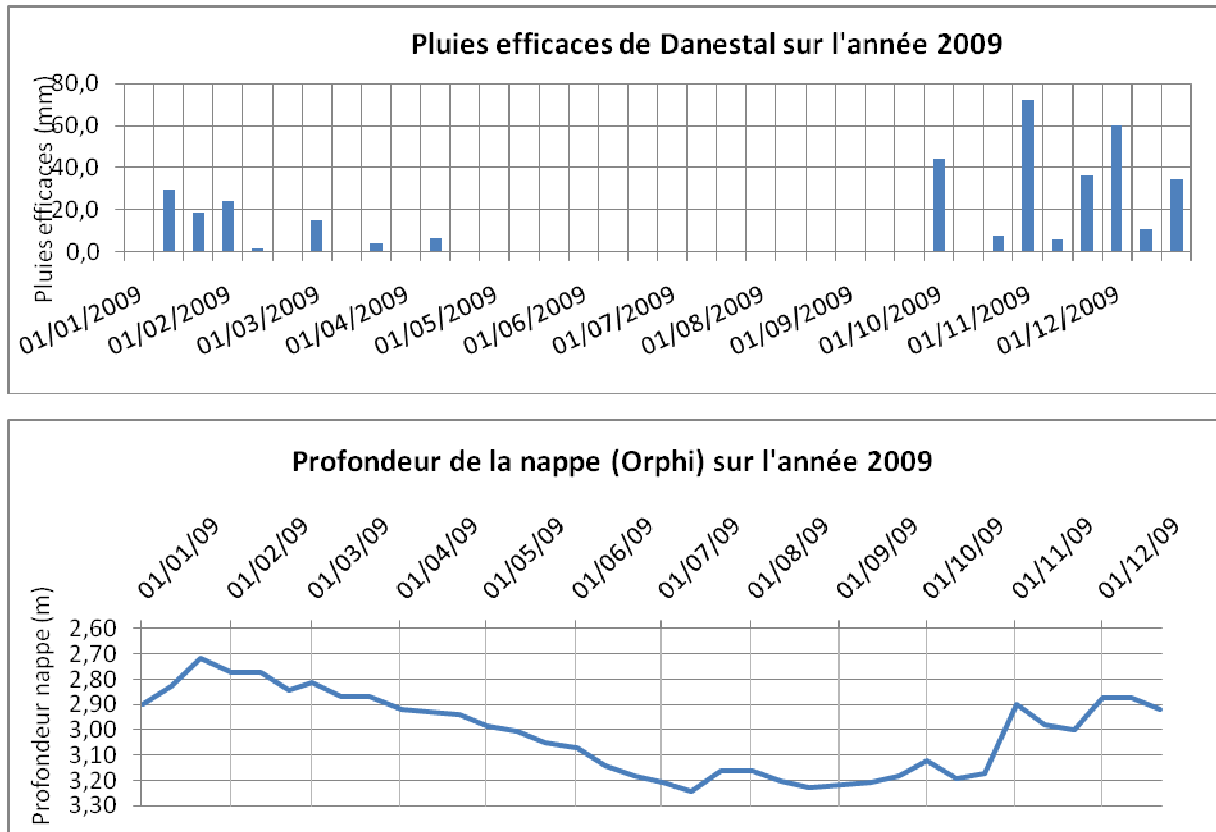


Figure 13: Graphique représentatif de la pluviométrie de Danestal et la piézométrie Orphi (année 2009)

Orphi est l'un des piézomètres équipés d'un enregistreur automatique.

De faibles pluies efficaces sont présentes en début d'année et se terminent en mai. D'octobre à décembre, des pluies efficaces allant jusqu'à 72.4mm sont remarquées. Celles-ci font augmenter le niveau de 20cm le mois suivant. Si l'on estime que chaque année est semblable, les pluies efficaces font augmenter le niveau de la nappe jusqu'à 50 cm par rapport à son niveau le plus bas en été. Cette comparaison ne permet pas de dire exactement combien de jours la nappe met pour réagir à la pluie efficace. Néanmoins, elle se fait dans les 10 jours suivant la pluie, ce qui est assez rapide. A l'échelle locale, sur le Cirque des graves, nous avons, entre avril et juillet 2010, essayé d'observer les variations de la nappe sur à un évènement pluvieux. Voici ce qui a pu être observé :

⇒ Par rapport à une suite de petits évènements pluvieux enregistrés sur Deauville, les piézomètres SC3, SC7, SD5, SD6, Orphi ont montré une remontée du niveau de la nappe de 4 cm environ, au maximum 4 jours après un évènement pluvieux ou une suite d'évènements (le maximum de pluie tombée sur quelques jours est d'environ 30mm). La réaction de la nappe est donc rapide.

⇒ Pour les autres piézomètres, c'est-à-dire SC1, SD4, DemA, DemB, A, B, C2, D, E, F, aux mêmes dates, aucune augmentation du niveau de la nappe n'a été remarqué, la baisse du niveau de la nappe due à la période estivale continuait, sauf en juin où un grand nombre de petits évènements pluvieux se sont succédés. Ce mois-là, seulement 1cm d'augmentation a été observé.

Cette remarque appuie l'hypothèse faite précédemment selon laquelle une nappe superficielle serait présente sur une partie de la zone. Mais cela serait vrai seulement si les piézomètres SC3, SC7, SD6, Orphi sont crépinés sur toute la longueur. Dans ce cas, l'eau superficielle entrerait rapidement dans le piézomètre.

IV. Caractéristiques hydrodynamiques

1. Pompages et slug test : méthodes et mesures

Les essais de pompages ont été réalisés dans le but de connaître des caractéristiques hydrodynamiques telles que la perméabilité et la transmissivité. Afin d'avoir des valeurs représentatives, nous avons réalisés 2 essais de pompages par piézomètre avec environ un mois d'écart : les premiers essais ont été réalisés fin mai 2010, peu avant le bas niveau des eaux souterraines ; les seconds datent du début du mois de juillet, environ 40 jours après les premiers essais, lors de la période des basses eaux.

Les essais ont été effectués à l'aide d'une pompe de type powerpurgé 61, un contrôleur de débit « Low Flow » et une batterie de 12V. Une sonde piézométrique était indispensable pour savoir le niveau de la nappe avant, pendant et après le pompage, ainsi qu'un récipient de contenance connue et un chronomètre pour mesurer le débit.



Figure 14: Photographie d'un pompage

L'objectif de ces essais de pompage est de pomper l'eau de la nappe avec un certain débit jusqu'à atteindre un régime permanent et étudier la remontée du niveau piézométrique. La première étape est donc de savoir le niveau piézométrique avant pompage. Ensuite, la pompe mise en place, l'essai de pompage peut débuter. Le débit est faible au départ et selon la variation du niveau de la nappe, nous augmentons ou pas le débit jusqu'à atteindre le régime permanent. Celui-ci était atteint entre 20 à 40min après le début du pompage selon la réactivité de l'aquifère. Cette étape atteinte, il faut connaître le débit de l'eau à la sortie et le niveau de la nappe. C'est à partir de ces données que nous pourrions par la suite interpréter le pompage.

La remontée du niveau piézométrique et le temps de la remontée sont étudiés après l'arrêt de la pompe.

Sur 5 des piézomètres, nous n'avons pas pu réaliser de pompage car soit la pompe n'était pas assez puissante, soit le diamètre de la pompe était trop grand par rapport au diamètre du piézomètre et l'eau de l'un des piézomètres avait une odeur de fuel, ce qui risquait d'abimer la pompe.

Dans ces cas, nous avons effectués des slug test. Ces slug test ont des buts similaires au pompage mais, au lieu de pomper de l'eau, nous ajoutons une quantité d'eau connue en un temps connu. Nous étudions donc ensuite la descente de la nappe.

2. Résultats : paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques sont calculés à partir du temps que met la nappe à remonter jusqu'à son niveau initial. Pour avoir des résultats caractérisant au mieux la nappe, le niveau de la nappe doit être pris à plusieurs moments et ainsi avoir au moins 5 points à reporter sur un graphique.

A partir des pompages, nous calculons la transmissivité grâce à la méthode de remontée de Theis. Le rabattement et le log de t/t' (t correspondant au temps depuis le début du pompage et t' est la valeur du temps enregistré après l'arrêt du pompage) doivent être calculés pour ensuite représenter graphiquement le rabattement en fonction du log t/t' (en échelle logarithmique). L'équation de la droite nous permet d'avoir la valeur Δs , pente de la droite. La transmissivité est ensuite calculée grâce à la formule suivante :

$$T = (2,3 \times Q) / (4 \times \pi \times \Delta s)$$

Pour les slug test, la méthode utilisée est celle de Bouwer et Rice, basée sur l'équation de Thiem :

$$Q = 2\pi Kd \times (Ht / \ln(Rc/Rw))$$

L'équation résultante pour le calcul de K est :

$$K = [(r_c^2 \times \ln(R_e/r_w)) / 2d] \times [(1/t) \times \ln(h_o/h_t)]$$

La description et l'explication de chaque élément de l'équation est en annexe 5.

On passe ensuite de la perméabilité à la transmissivité (et inversement) avec la formule $T = K \times e$ (e étant l'épaisseur de la nappe).

Les résultats obtenus sont les suivants :

Piézo	Epaisseur (m)	Mai 2010		Juillet 2010	
		K (m/s)	T (m ² /s)	K(m/s)	T(m ² /s)
A	3	9,9E-06	0,00003	4,4E-06	1,3E-05
B	3	4,6E-07	1,4E-06	4,7E-07	1,4E-06
C2	5	1,8E-07	8,9E-07	2,4E-07	1,2E-06
D	4	1,1E-07	4,4E-07	1E-06	4,3E-06
E	3	1,1E-07	3,4E-07	4,1E-06	1,2E-05
SC1	17	2,5E-08	4,3E-07	1,7E-07	2,8E-06
SC3	17	5,1E-06	0,000086	6,5E-07	1,1E-05
SC7	28	7,6E-08	2E-6	6,7E-07	1,9E-05
SD4	14	3,6E-08	5E-07	9,3E-08	1,3E-06
SD5	23	0,00004	0,0009	3,06E-05	0,0007
SD6	9	7,00E-06	0,000063	7,2E-06	6,5E-05
ORPHI	12	3,5E-07	4,00E-06	7,5E-07	7,5E-06
DemA	10	0,000016	0,00016		
DemB	11	2,9E-07	3,2E-06	8,7E-08	9,6E-07

Figure 15: Tableau des données de perméabilité et transmissivité

Les valeurs de transmissivité sont comprises, pour les premiers essais, entre $1 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $9 \cdot 10^{-7}$ m²/s, et pour les seconds, entre $7 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $9 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Le piézomètre le plus transmissif est le SD5 et le moins transmissif est le C2.

La forte transmissivité du SD5 s'explique par la géologie assez homogène entre 3m et 25m, avec la dominance des sables et limons, plutôt transmissif. Globalement, les autres piézomètres rencontrent pour la plupart plusieurs formations qui correspondent au remaniement de la géologie due aux glissements de terrain, notamment des blocs de silex ou des formations argileuses qui diminuent la transmissivité.

Entre les deux dates, certaines valeurs de transmissivité peuvent être multipliées d'un facteur 5 à 10, notamment les piézomètres C2, D, E, SC1 et SC7. Ceci est aussi dû au remaniement des couches géologiques qui crée des couches plutôt homogène et transmissives et d'autres plus hétérogènes avec des blocs de craie compacte et à silex qui sont traversées plus difficilement lorsque l'eau arrive à ce niveau. Les couches étant plus hétérogènes dans les premiers mètres du sous-sol, la nappe, en période estivale, baisse de niveau et atteint des zones plus homogènes et souvent plus transmissives avec des formations sablo-limoneuses.

Les résultats de DemB et DemA ne peuvent pas être exploités car nous n'avons aucune donnée sur la couche géologique. De plus, nous n'avons pas réalisés de second essai pour DemA.

3. Relation entre les paramètres obtenus et les variations piézométriques

Les piézomètres SC3, SC7, SD6, où l'on peut observer une forte fluctuation des nappes et rapide réactivité face à un événement pluvieux montrent une transmissivité entre $8 \cdot 10^{-5}$ m²/s et $2 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Tandis que les autres piézomètres, dont la fluctuation de la nappe est moins franche, montrent une fourchette de valeur de transmissivité plus large. Mettre en relation les paramètres hydrodynamiques et les variations piézométriques semble donc assez difficile, voire impossible.

De plus, nous comparons des piézomètres dont l'eau serait de deux origines (nappe principale et nappe superficielle) avec d'autres qui ne semblent avoir qu'une origine des eaux. Nous ne pouvons donc pas être sûr que les fluctuations des piézométries soient directement liées à la nappe principale.

V. Hydrochimie

Afin d'approfondir les connaissances sur la nappe que nous étudions, nous avons réalisé un prélèvement de l'eau. Le faciès chimique sera connu grâce aux résultats obtenus et la répartition spatiale de chaque élément nous permettra de savoir leur origine et d'avoir plus amples connaissances sur l'infiltration.

1. *Echantillonnage et mesures hydrochimiques*

Les données hydrochimiques obtenues viennent d'un prélèvement réalisé fin mai 2010. Un deuxième prélèvement a été effectué le 30 juin 2010 mais seuls les anions ont été analysés.

Le protocole d'échantillonnage utilisé est le suivant :

A la première campagne de prélèvement, le 25 et 26 mai 2010, nous avons réalisé les échantillonnages au même moment que les essais de pompage. Nous avons donc pompé dans chaque piézomètre jusqu'à obtenir le régime permanent. Une fois celui-ci obtenu, nous prélevions de l'eau dans des flacons neufs de 50mL, préalablement nettoyés à 3 reprises par l'eau pompée. Les flacons étaient ensuite notés et rangés dans un carton pour le transport. Ils étaient, à la fin de la journée, mis dans un réfrigérateur. Le lendemain, l'eau prélevée a été filtrée avec des filtres de diamètre de maille égal à 45 μm , ne laissant donc passer aucun MES. Les flacons ont ensuite été envoyés dans un carton à l'université d'Avignon pour les analyses.

Seuls les eaux des piézomètres SD5, SD6 n'ont pas été prélevés à la première campagne car la pompe ne semblait pas assez puissante.

Les éléments analysés sont : HCO_3^- , F^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SiO_2 . La température, le pH et la conductivité ont été mesurés sur le terrain grâce à un multimètre en même temps que les échantillonnages.

Les résultats de ces analyses sont en annexe 6.

2. *Contexte hydrochimique général*

a. Faciès chimique

Le diagramme de Piper permet de représenter graphiquement les résultats obtenus aux analyses hydrochimiques et d'avoir une vision générale des types d'eaux rencontrés. Il a été réalisé à partir du logiciel DIAGRAMMES (SIMLER, 2004).

Le diagramme obtenu avec les analyses hydrochimiques des eaux de Villerville est présenté à la page suivante.

Les points du côté des anions comme des cations montrent une tendance au regroupement dans le pôle bicarbonaté (triangle des anions) et calcique (triangle des cations).

Du côté des cations, le pourcentage de sodium augmente en suivant le sens de l'écoulement. Ceci est dû à la proximité de la mer qui apporte du NaCl dans les eaux avec le biseau salin et les embruns marins. L'augmentation du Cl est aussi observable sur le diagramme de Piper, tout comme les SO_4^{2-} .

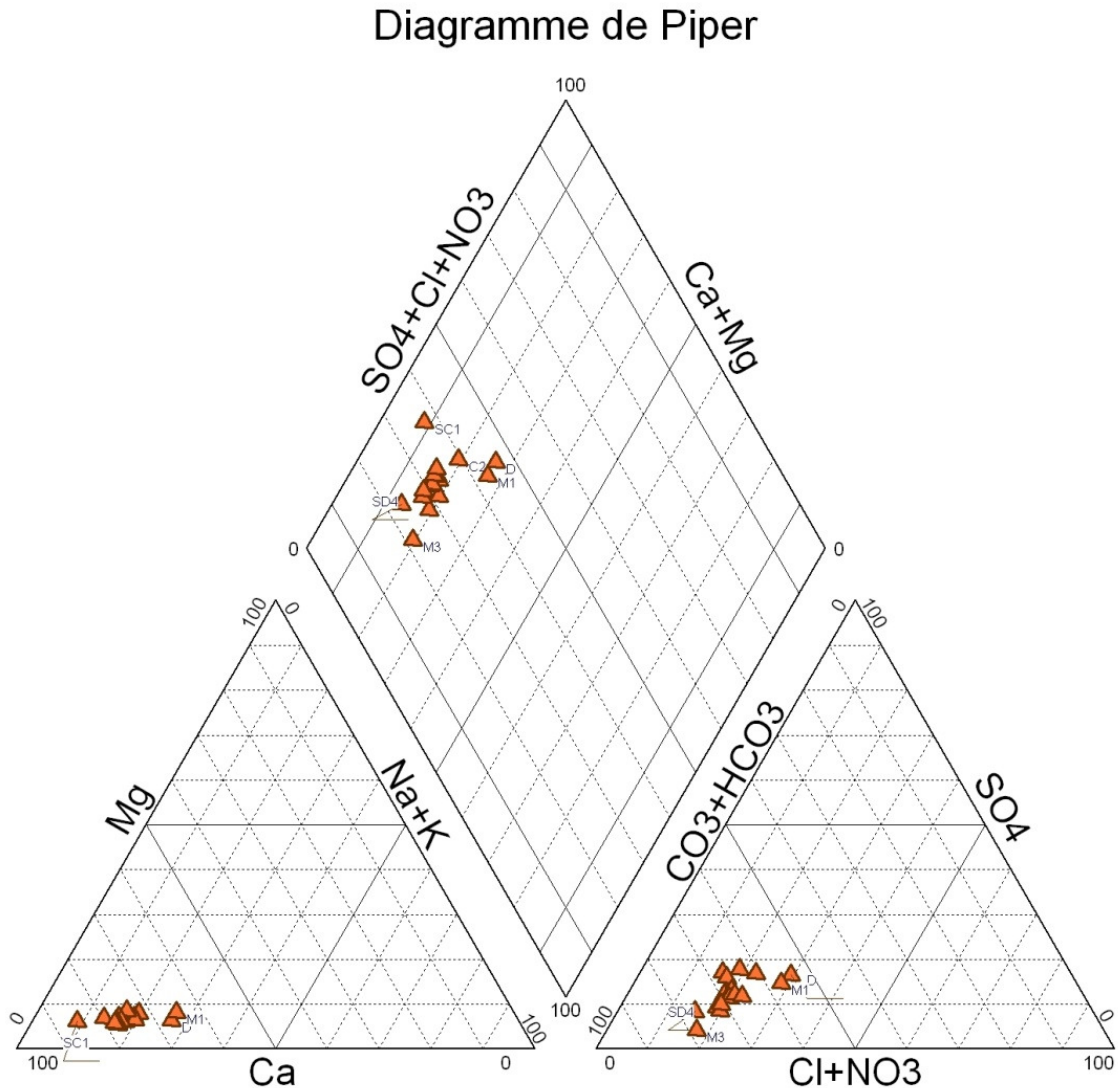


Figure 16: Diagramme de Piper

Quelques remarques concernant les concentrations sont à noter :

⇒ Cl⁻ : la concentration en chlorure varie en fonction de la distance à la mer : plus on est proche de la mer, plus la concentration est importante. Il en est de même pour les ions Na⁺ et K⁺. Cela montre la provenance marine de ces ions : ce sont les sels de mer.

⇒ Les ions Br⁻, qui pourraient servir de traceurs naturels, montrent une très faible variation de concentration. Les analyses montrent des concentrations allant de 0.0017 à 0.005meq/L pour les piézomètres. Seul le piézomètre A montre une concentration en Br⁻ de 0.0037meq/L.

⇒ 3 valeurs de PO₄²⁻ sont au dessus du seuil de détection. On remarque une valeur de 0.01meq/L dans le piézomètre A, une valeur de 0.08meq/L dans la mare en face de ce dernier et une valeur de 0.03meq/L dans une mare plus en hauteur. Cette dernière mare montre un degré d'eutrophisation très élevé.

Quand à la mare dont la concentration en PO_4^{2-} est de 0.08meq/L, elle reçoit les eaux de ruissellement de la route proche du village. Dans ces 2 mares, on remarque en parallèle des fortes teneurs en NH_4^+ qui mettent, entre autres, en avant une forte décomposition des végétaux et animaux.

⇒ NO_3^- : les valeurs varient fortement, entre 0 (valeur inférieure à la valeur de détection) et 0.55 meq/L. Seul 1 piézomètre (SC1) affiche cette valeur extrême de 0.55meq/L de NO_3^- . Le piézomètre SC7, qui est à 50m de ce dernier, présente une valeur de 0.15meq/L. Cette différence peut être due à un fort apport en nitrate à proximité immédiate de ce piézomètre. Mais aucune zone agricole n'est recensée dans cette zone. La déficience de l'assainissement des habitations alentours peut expliquer la valeur extrême de ce piézomètre mais la teneur en chlorures, qui devrait être forte aussi si l'assainissement est défectueux, ne confirme pas cette hypothèse. Enfin, aucun doute ne peut être émis sur la valeur en elle-même car les résultats de la deuxième analyse, réalisée le 30 juin 2010, donnent une valeur de 0.51meq/L. Donc la cause de cette forte valeur reste encore à déterminer.

Les paramètres de pH, température et conductivité ont aussi été étudiées. Les résultats sont aussi présentés dans l'annexe 6.

b. Répartition spatiale de chaque élément

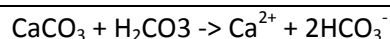
A partir des concentrations de chaque élément, des cartes ont été réalisées afin d'avoir une vision globale sur le site de la répartition spatiale des éléments. Voici ce qui a pu ressortir de ces cartes :

- ⇒ Comme il a été dit précédemment, les ions Cl^- montrent une concentration plus importante à proximité de la mer. Il en est de même pour Na^+ . Ces deux ions ont la même origine : les embruns marins (halite) et du biseau salin. Les ions Ca^{2+} peuvent aussi avoir une origine marine mais en quantité beaucoup plus faible.
- ⇒ Un point semble se détacher des autres par les résultats hydrochimiques : le piézomètre SC1. Il montre une forte valeur en nitrates, en calcium, en sulfate. La différence entre les valeurs de ce piézomètre et du piézomètre SC7, à 80m environ de ce dernier, est importante.

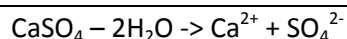
3. Relation entre l'hydrochimie et la géologie

La géologie du site est marquée par la présence de craie, de sables albiens et/ou glauconieux, d'argile et de marnes.

La dissolution de la craie est réalisée selon l'équation suivante :



Grâce au logiciel Diagrammes, nous pouvons créer un graphique permettant de voir si des relations existent entre un ion et un autre. Ainsi, les relations entre Ca^{2+} et HCO_3^- ont pu être confirmées. De plus, on peut remarquer que les ions Ca^{2+} sont aussi corrélés avec les ions SO_4^{2-} . Cela signifie donc qu'une partie des ions Ca^{2+} et les ions SO_4^{2-} viennent de la dissolution du gypse, qui a pour équation :



Les ions Na^+ ont aussi montré une autre origine que les sels. En effet, une relation a pu être mise en avant entre les ions Na^+ et K^+ qui viennent de la glauconie présente dans de nombreux forages du site d'étude.

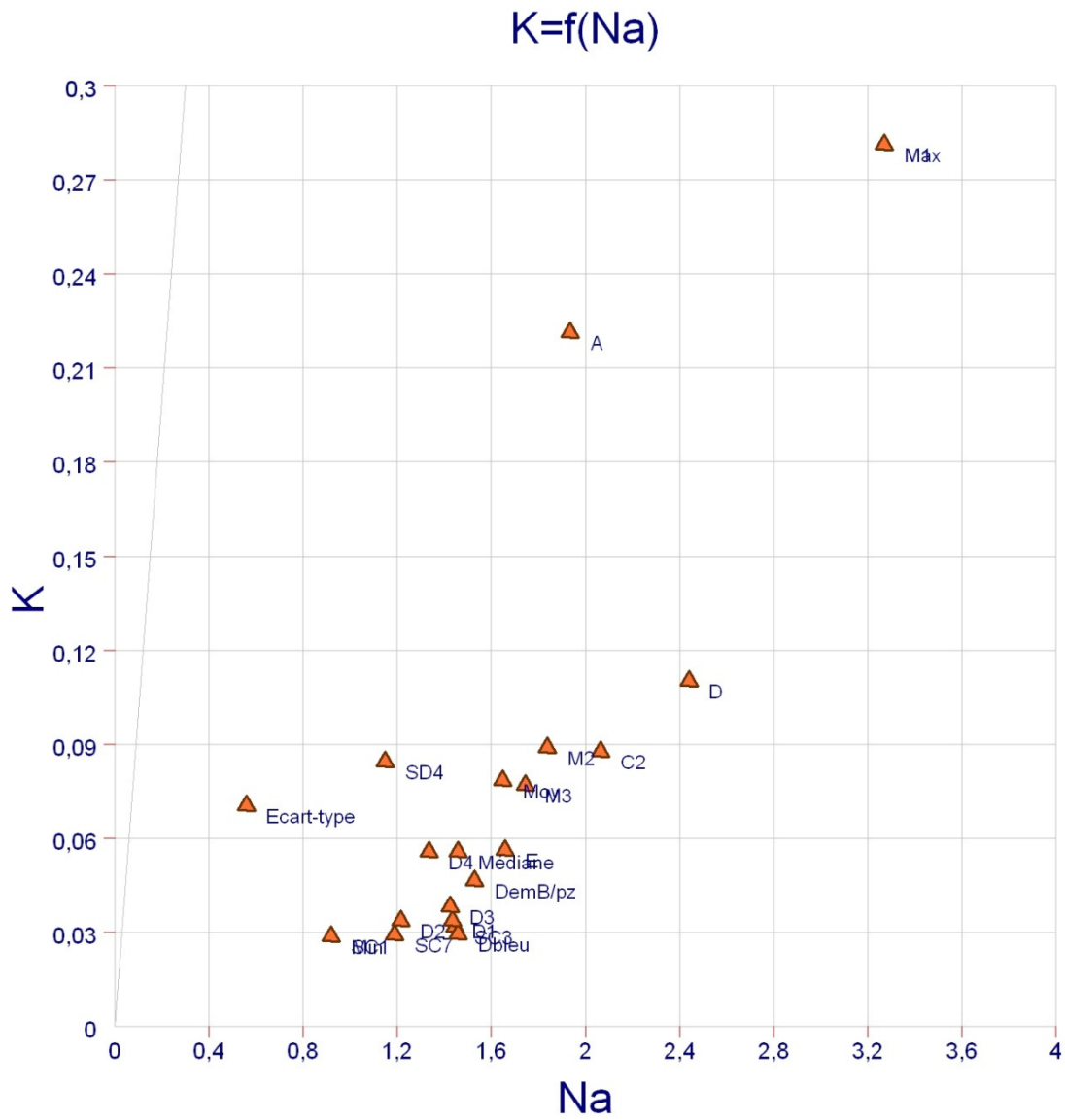


Figure 17: Relation entre K^+ et Na^+

Conclusion

Le but de cette étude hydrogéologique était de décrire globalement le système hydrologique et hydrogéologique afin de mettre en relation les fluctuations des nappes avec les mouvements de terrain.

L'étude a permis de mettre en avant une nappe superficielle, au dessus de la nappe principale, contenue dans la craie. Cela a été fait à partir de l'étude de la piézométrie, la pluviométrie, les pompages d'essais et l'hydrochimie.

Ces différentes parties de l'étude ont aussi montré une réaction assez rapide de la nappe après un évènement pluvieux (10 jours au maximum). Des valeurs de perméabilité et transmissivité ont pu être calculées et le faciès bicarbonaté-calcique a été déterminé.

Pour toutes ces données, une confirmation est nécessaire dans le cas où les données manquantes sur les crépines seraient retrouvées. Un autre échantillonnage des eaux est aussi nécessaire.

La zone de Cricqueboeuf n'a pas été étudiée réellement dans ce stage car il n'est pas du tout équipé en piézomètres. Il semble que les mêmes phénomènes de glissements de terrain interviennent en même temps que sur le site du Cirque des graves. Donc les phénomènes souterrains peuvent être les mêmes. Toutefois, sans données, nous ne pouvons le confirmer.

Bibliographie

Maquaire C. (1990), « Les mouvements de terrain de la côte du Calvados, recherche et prévention », Editions du BRGM

GRESARC (octobre 2005), « Observatoire des Mouvements de terrain sur les côtes du Calvados – Communes de Cricqueboeuf, Villerville et Benerville ; rapport de synthèse »

De La Querrière Ph. - Van Den Avenne S. (juin 1970), « Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 18 juin 1970 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/50000 Le Havre – 97 (sud estuaire) et Lisieux – 121 (Calvados et Eure) »

Champel F.-O. (juin 2006), « Lutte contre les mouvements de terrain RD 513 Licornes-Trescartes, Rapport d'études géotechniques »

Webographie

www.meteociel.fr

www.seine-normandie.brgm.fr

Annexes

Annexe 1 : Cartes de localisation des piézomètres, mares, sources

Annexe 2 : Données des sondages

Annexe 3 : Altitude des piézomètres

Annexe 4 : Graphique des variations piézométriques de chaque piézomètre

Annexe 5 : Equation de Bouwer-Rice

Annexe 6 : Résultats des analyses hydrochimiques

Annexe 1 : Cartes de localisation des piézomètres, mares, sources



Carte 1: Localisation des piézomètres, puits domestiques et inclinomètres



Carte 2: Localisation des sources et sourcins



Carte 3: Localisation des mares

Annexe 2 : Données des sondages

Piézo	Prof	Outil	Tubage	Piézomètre	Crépine	Lithologie	Lithologie
A	7m	Percussion			2m de 5 à 7m	0 à 2,2m	Formation limono-sableuse traces hydromorphie
						2,2 à 3m	Formation limono-sableuse à cailloutis
							traces hydromorphie
						3 à 5m	Formation limono-sableuse à cailloutis anguleux
							et cailloux blancs oxydés ou silex
						5 à 7m	vide
B	8m	Percussion			2m de 6 à 8m	0 à 1m	Formation sableuse avec blocs de craie et silex
						1 à 2m	Formation sablo limoneuse, alternance sables/ craie/limons + traces hydromorphie et racines
						2 à 3m	Craie altérée sableuse avec blocs friables et blocs de craie silicifiée
						3 à 4,20m	Formation limono-sableuse à cailloutis et cailloux craie ou silex + traces hydromorphie racines
						4,2 à 4,3m	craie altérée à grains noirs en blocs
						4,3 à 5,9m	Formation argilo-limoneuse grise marron + traces hydromorphie
						5,9 à 8m	Sables albiens kaki peu glauconieux
C2	8m	Percussion			2m de 6 à 8m	0 à 2,1m	Formation limoneuse avec blocs de craie et silex
						1,9 à 2,1m	Formation limono-argileuse grise noire (organique?)
						2,1 à 3m	Formation limono-sableuse compacte + traces hydromorphie
						3 à 5,2m	Formation limono-sableuse vert grise à grains noirs + traces hydromorphie
						5,2 à 6,4m	Formation limono-argileuse grise + traces hydromorphie
							rouille précipitée dans formation argileuse + noire
						6,4 à 8m	Sables albiens kakis peu glauconieux avec lentilles
							limoneuses + traces hydromorphie

Piézo	Prof	Outil	Tubage	Piézomètre	Crépine	Lithologie	Lithologie
D	8m	Percussion			2m de 6 à 8m	0 à 4m	Formation sableuse avec blocs de craie, blocs de craie silicifiée et silex
						4 à 4,9m	Formation limono-sableuse avec blocs de craie
						4,9 à 5,5m	Formation sableuse avec blocs de craie
						5,5 à 5,9m	Formation limono-sableuse verte grise à grains noirs avec blocs indurés
						5,9 à 7,2m	Sables glauconieux très foncés avec peu de lentilles limoneuses
						7,2 à 8m	Marnes grises
E	8m	Percussion			2m de 6 à 8m	0 à 2m	Craie altérée, blocs et cailloux friables avec matrice sableuse, présence de blocs de craie silicifiés
						2 à 3m	Formation limono-sableuse verte grise à grains noirs avec blocs silex et blocs craie
						3 à 4m	Formation limono-sableuse verte grise à grains noirs avec traces brunes rouilles, oxydation, parties indurées
						4 à 4,5m	Formation limoneuse grise à taches rouilles, racines blanches
						4,5 à 4,7m	Marnes bleues grises avec traces de rouille
						4,7 à 8m	Sables albiens avec très peu de glauconie, traces rouille
F	8m	Percussion			2m de 6 à 8m	0 à 2m	Formation limono-sableuse vert-grise à grains noirs
						2 à 3m	Formation limoneuse compacte avec traces de rouille et manganèse, blocs silex
						3 à 4m	Nombreux blocs silex avec formation limoneuse
						4 à 6m	Craie altérée avec blocs friables et matrice sableuse et blocs de craie silicifiés
						6 à 7m	Formation sablo-limoneuse avec blocs de silex + traces d'oxydo-réduction
						7 à 8m	Sables glauconieux limoneux + traces d'oxydo-réduction

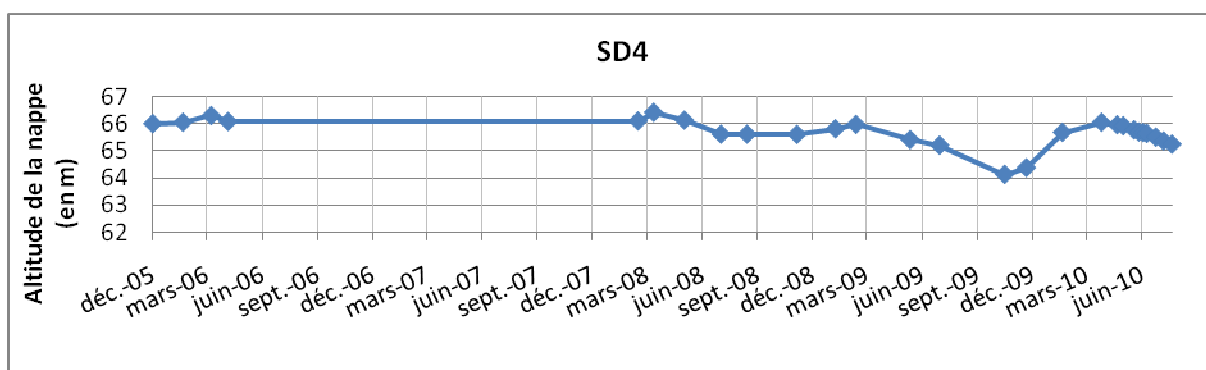
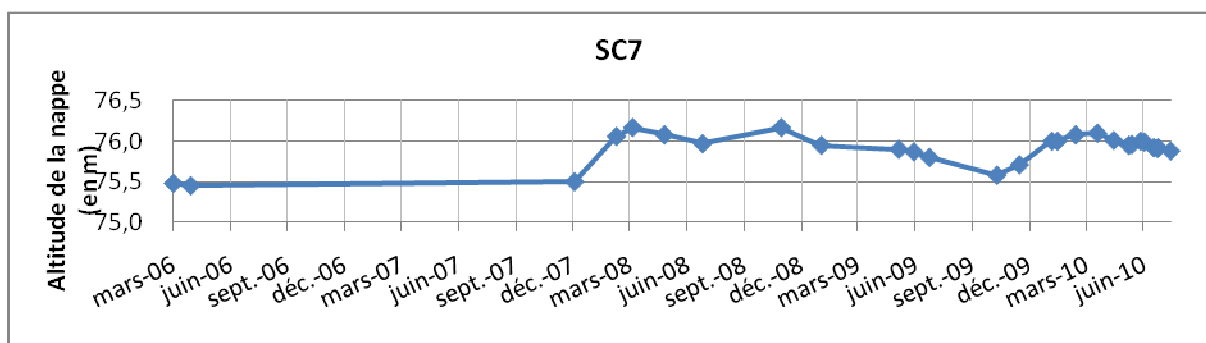
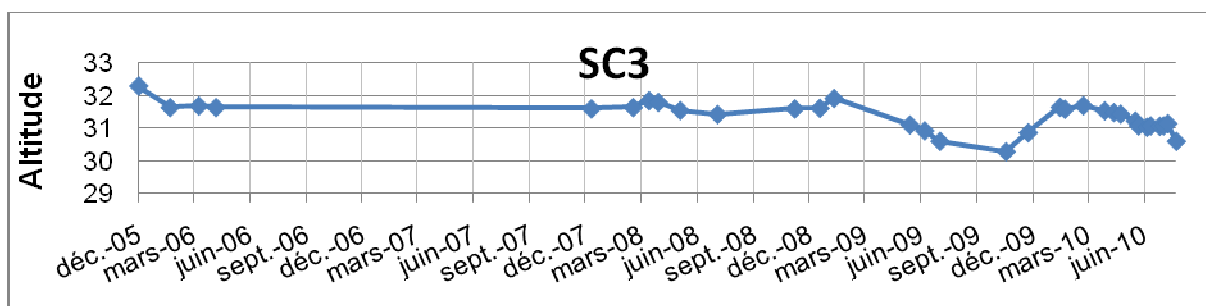
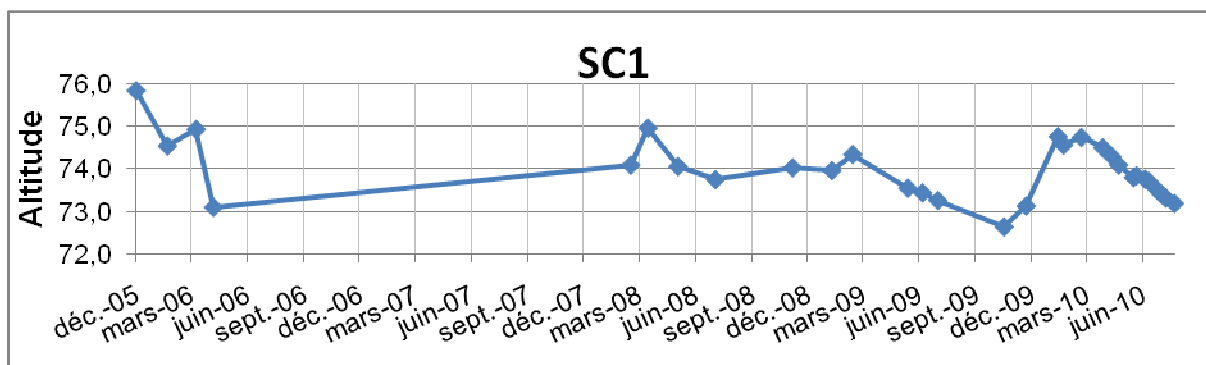
Piézo	Prof	Outil	Tubage	Piézomètre	Crépine	Lithologie	Lithologie
SC1	20m	Carottier battu diam 114mm	diam 120/140mm		?	0 à 3m	Limons argilo-sableux marron brun roux à blocs et débris calcaires et silex, peu consistant
						3 à 15m	Salbes +/- argileux glauconieux marron jaune blanc gris bleu à cailloux et blocs de silex et calcaire peu consistant
						15 à 20m	Alternance argile sableuse glauconieuse marron beige / argile grise noire assez consistante riche en veine sableuse glauconieuse verte foncé et veines sableuses rousses
SC3	20m	Carottier battu diam 114mm	diam 120/140mm		?	0 à 4m	argile limoneuse marron beige à nodule calcaire peu consistant
						4 à 7,10m	Sable limoneux +/- argileux glauconieux beige marron vert peu consistant
						7,10 à 8m	Blocs de calcaire dans matrice limoneuse argileuse beige blanc
						8 à 11m	Sable grossier très glauconieux + traces hydromorphie
						11 à 15m	Argile marron foncé à passées de sables grossiers glauconieux vert moyennement consistant
						15 à 20m	Argile grise noire à débris coquilliers
SC7	30m	Carottier battu diam 114mm	diam 125/147mm	diam 104/114mm	?	0 à 7m	Limon sableux +/- argileux marron brun à débris et blocs calcaire et silex, peu consistant
						7 à 21m	Sable vert foncé glauconieux, peu consistant
						21 à 26m	Sable et cailloutis verts gris foncé tacheté rouille
						26 à 30m	Marne grise avec passées argileuses marron
SD4	21,38m	semi destructif Taillant diam 125mm		Diam 50mm	? De 0 à 22m (observations terrain)?	0,4 à 7m	Limon argileux +/- sableux à blocs et débris calcaires
						7 à 21m	Alternance de sables verts foncés et d'argiles noires

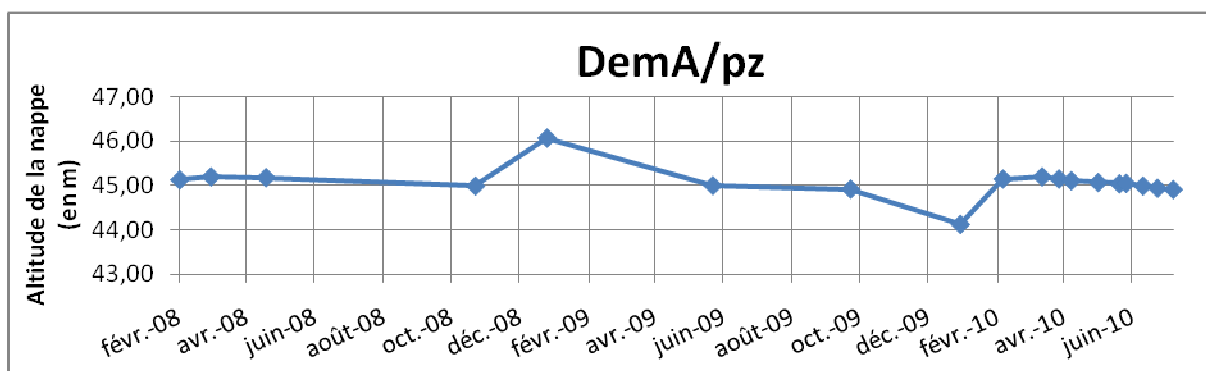
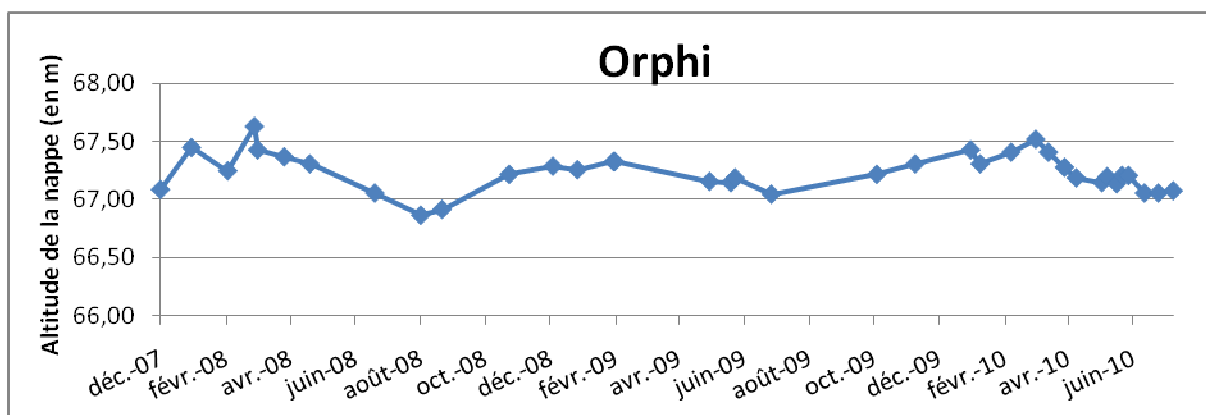
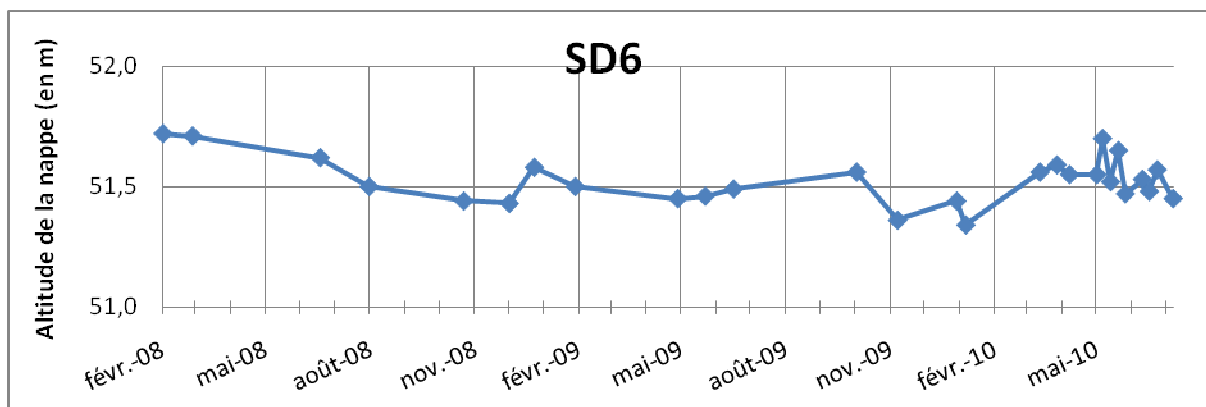
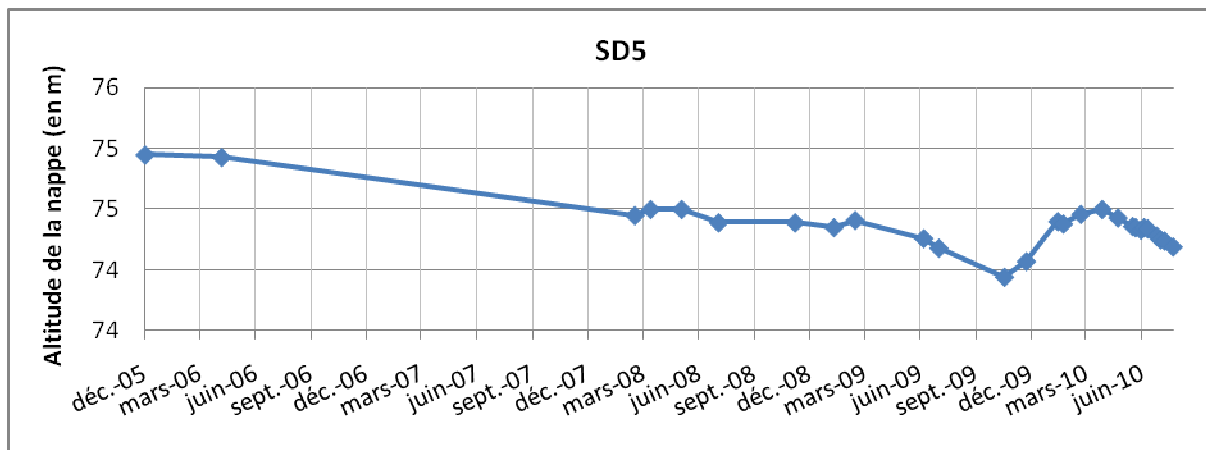
Piézo	Prof	Outil	Tubage	Piézomètre	Crépine	Lithologie	Lithologie
SD5	25m	Carottier rotation diam 125mm	diam 127/178mm	Diam 104/114mm	de 0 à 25m	0,3 à 3,4m	Limono-argileux marron brun à cailloux et cailloutis calcaires et silex
						3,4 à 7m	Limon sableux glauconieux +/- argileux beige-brun peu consistant
						7 à 20,40	Sable vert foncé glauconieux peu consistant
						20,40 à 25m	Sables et cailloutis vert gris foncé tacheté de rouille
SD6	21m	Taillant diam 145mm	diam 145/177mm	diam 104/114mm	de 0 à 17m	0,4 à 5,5m	Limons +/- argileux marron-jaune à cailloutis
						5,5 à 14m	Sables gris verdâtres
						14 à 19m	sables +/- argileux jaune-vert
						19 à 21m	argile sableuse à passées marron-gris
Orphi	15m	taillant 64mm		PVC 50mm	de 10 à 15m	0 à 1,7m	Graviers et cailloux siliceux (remblais)
						1,7 à 7,2m	Sable +/- argileux beige verdâtre à cailloux, peu consistant
						7,2 à 11,60m	Argile sableuse gris-foncé verdâtre, saturée
						11,60 à 12,5m	Sable argileux gris-verdâtre, saturé
						12,5 à 15m	Argile sableuse gris-foncé verdâtre

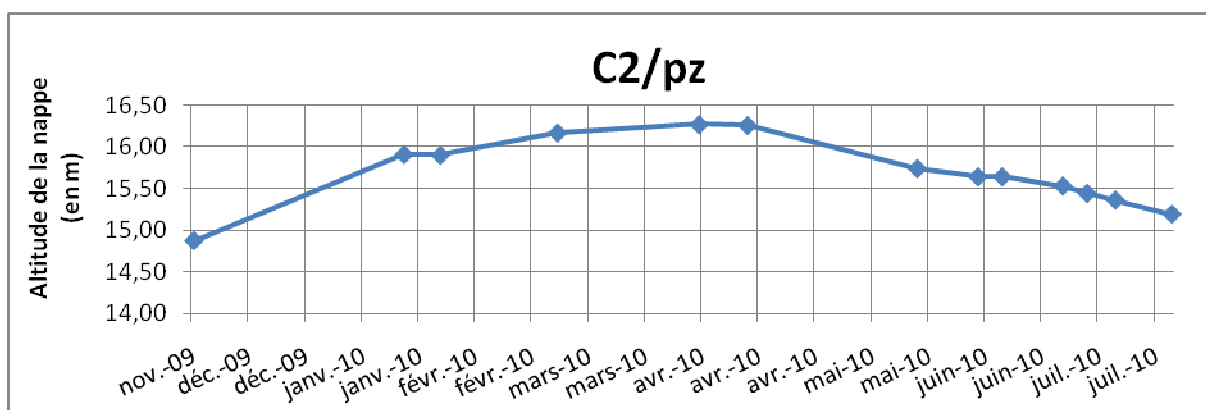
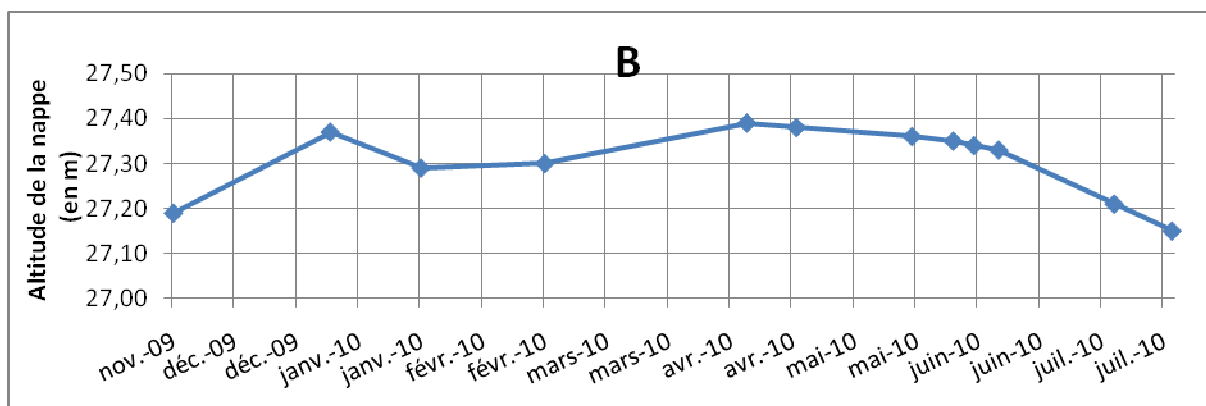
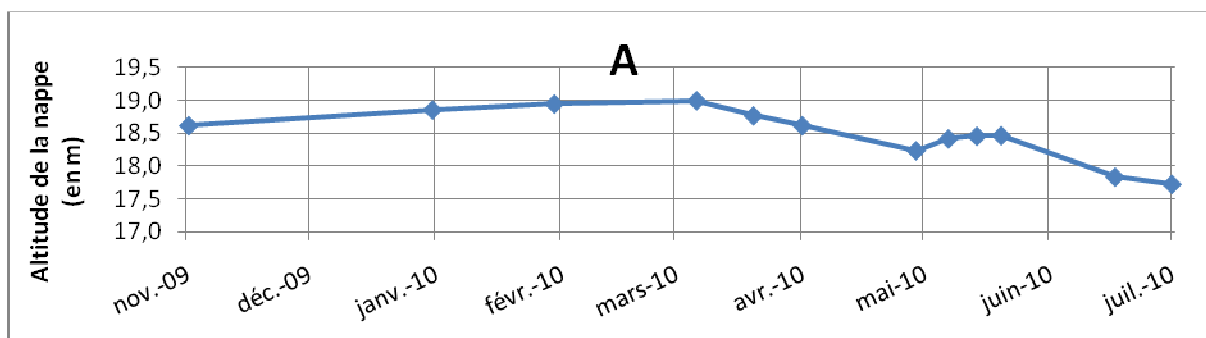
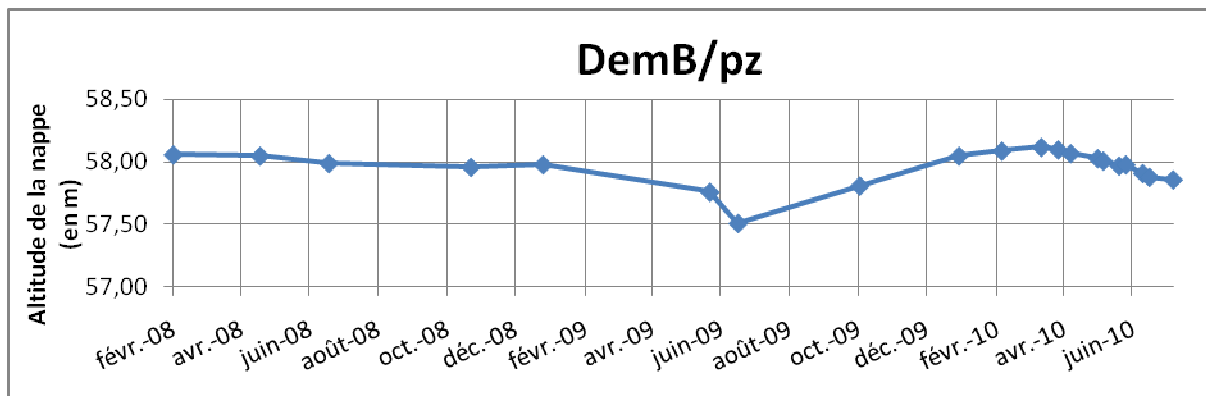
Annexe 3 : Altitude des piézomètres

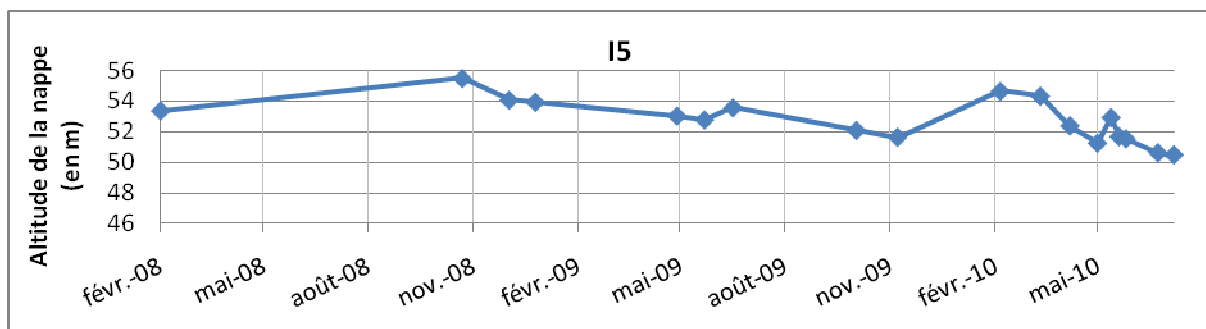
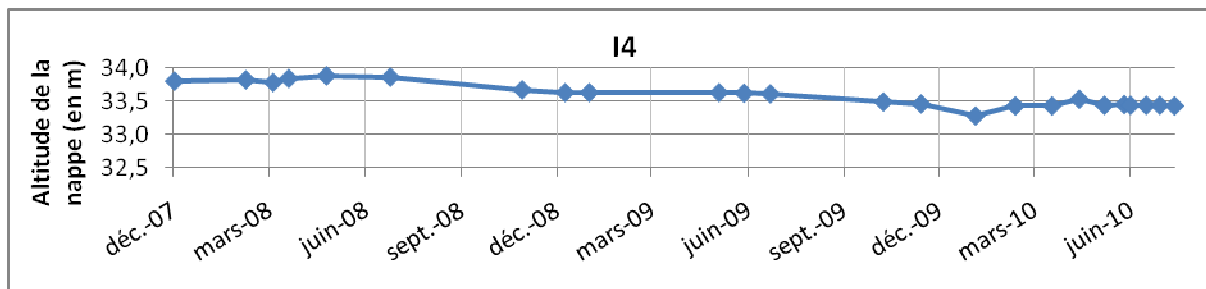
Piézo	Altitude (m)
A	22,32
B	33
C2	19,22
D	21,17
E	24,37
F	48,67
SC1	77,5
SC3	34
SC7	77,6
SD4	74
SD5	76,5
SD6	64
DemA	50,8
DemB	60,19
Orphi	70,105

Annexe 4: Graphiques des variations piézométriques de chaque piézomètre









Annexe 5 : Equation de Bouwer-Rice

Assumptions and Conditions:

- The assumptions and conditions underlying Cooper's method, except for the seventh assumption which is replaced by:
- The inertia of the water column in the well is not negligible; the head change in the well at the time $t > t_s$ can be described as an exponentially damped cyclic fluctuation.

And the following condition is added:

- The storativity and the skin factor are already known or can be estimated with fair accuracy.

Unconfined Aquifers, Steady State- Bouwer- Rice Method

The Bouwer and Rice Method is based on Thiem's equation:

$$Q = 2\pi Kd \frac{h_t}{\ln(R_c/r_w)} \quad (16.16)$$

The head's subsequent rate of rise, dh/dt , can be expressed as

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q}{\pi r_c^2} \quad (16.17)$$

Combining Equations 16.16 and 16.17, integrating the result, and solving for K, yields

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_c/r_w)}{2d} \frac{1}{t} \ln \frac{h_o}{h_t} \quad (16.18)$$

where

- r_c = radius of the unscreened part of the well where the head is rising
- r_w = horizontal distance from well centre to undisturbed aquifer
- R_c = radial distance over which the difference in head, h_o , is dissipated in the flow system of the aquifer
- d = length of the well screen or open section of the well
- h_o = head in the well at time $t_o = 0$
- h_t = head in the well at time $t > t_o$

The geometrical parameters r_c , r_w , and d are shown in Figure 16.5.

Bouwer and Rice determined the values of R_c experimentally, using a resistance network analog for different values of r_w , d , b , and D (Figure 16.6). They derived the following empirical equations, which relate R_c to the geometry and boundary conditions of the system:

- For partially penetrating wells

$$\ln \frac{R_c}{r_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(b/r_w)} + \frac{A + B \ln[(D-b)/r_w]}{d/r_w} \right]^{-1} \quad (16.19)$$

where A and B are dimensionless parameters, which are functions of d/r_w ;

- For fully penetrating wells

$$\ln \frac{R_c}{r_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(b/r_w)} + \frac{C}{d/r_w} \right]^{-1} \quad (16.20)$$

where C is a dimensionless parameter, which is a function of d/r_w .

(b = distance from water table to the bottom of the bore hole or well screen.)

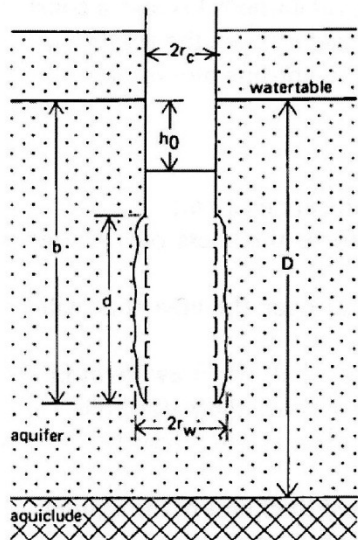


Figure 16.5 An unconfined aquifer, partially penetrated by a large-diameter well from which a slug of water has been removed

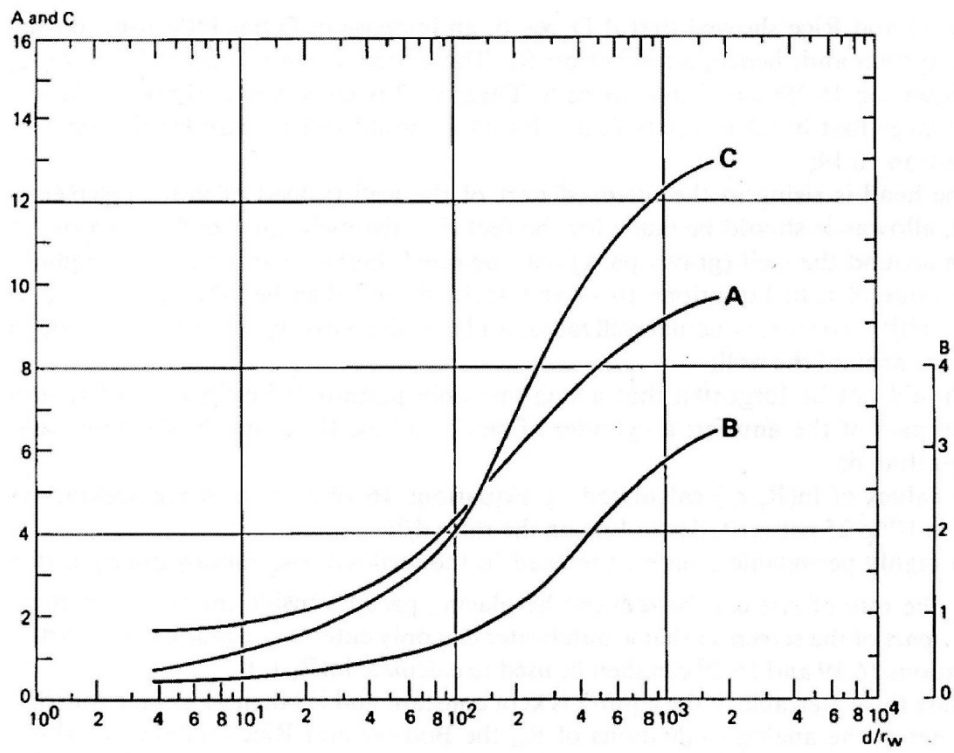


Figure 16.6 The Bouwer and Rice curves showing the relation between the parameters A, B, C, and d/r_w

Annexe 6 : Résultats des analyses hydrochimiques (en meq/L)

Lieu: Villerville

Date : Mai 2010

Nom des échantillons	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Bal	S.A	S.C
E	6,06		1,33		0,0025	0,11		1,55	1,66	0,00	0,06	0,59	7,31	3%	9,05	9,61
C2	6,36		2,34		0,0025			1,76	2,06		0,09	0,72	8,17	3%	10,46	11,04
D	4,90	0,01	2,68		0,0025			1,50	2,44		0,11	0,60	6,36	2%	9,09	9,50
A	7,36	0,01	1,94		0,0037	0,11	0,01	1,30	1,93		0,22	0,88	7,96	1%	10,73	11,00
SD4	6,60		1,20		0,0018	0,09		0,72	1,15		0,08	0,64	7,26	3%	8,61	9,13
M1	7,64		3,79		0,0050		0,08	1,96	3,27		0,28	1,07	8,61	-1%	13,47	13,23
M2	6,84	0,00	1,76		0,0027			0,88	1,84		0,09	0,71	7,40	3%	9,48	10,04
M3	6,92	0,00	1,52		0,0026		0,03	0,37	1,75		0,08	0,61	6,88	3%	8,85	9,31
SC1	6,40		1,36	0,01	0,0025	0,55		1,79	0,92		0,03	0,67	9,46	5%	10,11	11,08
SC7	5,08		1,25		0,0019	0,15		0,60	1,19		0,03	0,40	5,67	1%	7,08	7,28
DemB/pz	5,92	0,00	1,51		0,0023	0,02		1,42	1,53		0,05	0,77	6,85	2%	8,87	9,20
SC3	5,84		1,48		0,0022	0,11		1,02	1,45		0,03	0,53	6,78	2%	8,45	8,79
Dbleu	5,88		1,63		0,0020	0,08		1,14	1,46		0,03	0,65	6,98	2%	8,74	9,12
D1	5,70		1,49		0,0019	0,18		0,95	1,43		0,03	0,53	6,57	1%	8,32	8,57
D2	5,30		1,42		0,0017	0,01		0,74	1,22		0,03	0,49	6,01	2%	7,47	7,75
D3	5,84		1,63		0,0031	0,18		1,04	1,42		0,04	0,52	7,01	2%	8,70	9,00
D4	5,50		1,66	0,02	0,0023	0,19		0,99	1,33		0,06	0,49	6,74	2%	8,36	8,62

Date : juillet 2010

Nom des échantillons	HCO₃⁻	F⁻	Cl⁻	NO₂⁻	Br⁻	NO₃⁻	PO₄⁻	SO₄⁻
sc1 30-06			0,98		0,00	0,51		0,69
sc3 30-06		0,01	1,44		0,00	0,07		0,95
sc7			1,22		0,00	0,12		0,62
sd4			1,15		0,00	0,05		0,68
sd5			1,23		0,00	0,18		0,67
sd6			1,50		0,00	0,08		0,83
c2			2,28		0,00			0,56
D			2,62		0,00			0,72
E			1,49		0,00	0,09		0,74
DemB		0,00	1,59		0,00	0,08		0,62
DR2 06-07		0,00	1,44		0,00	0,15		0,94
DR bleu 06-07		0,00	1,64		0,00	0,09		1,03

Date	26/05/2010		
	T °c	pH	Conducti (µS/cm)
E	13,1	6,75	892
C2	13,4	6,7	1070
D	14,5	6,93	948
A	13,5	6,63	1044
SD4	13	6,66	831
M1	18,7	7,99	1311
M2	18,6	6,99	911
M3	16,7	6,79	892
SC1	12	6,63	994
SC7	10,5	6,83	708
DemB/pz	11,9	6,69	881
SC3	11,3	6,73	849
Dbleu	12,2	7,58	878
D1	12,4	7,14	835
D2	12,9	7,52	760
D3	11,7	6,91	873
D4	11,6	6,86	850
Date	juil-10		
SC1	11,9	6,81	958
SC7	10,6	6,98	711
SD5	10,9	7,01	709
DemB	12,3	7,14	915
SC3	11,5	7,35	847
SD4	13,5	7,19	823
Dbleu	14,1	7,95	877
D2	13,3	7,62	838
A	11,1	7,06	1044
C2	13,1	7,12	1083
D	13	7,28	928
E	14,2	7,11	918

