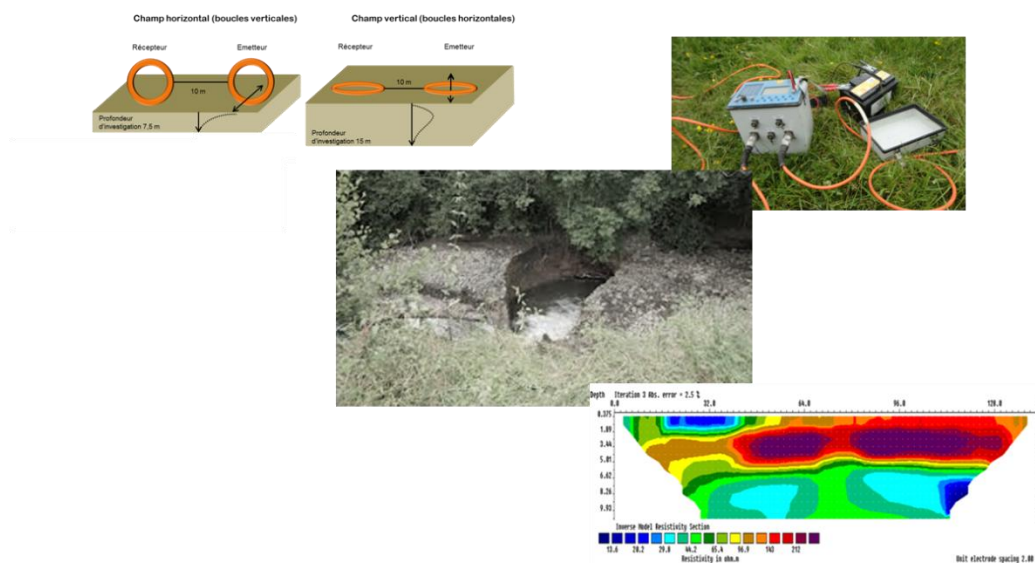


Mémoire de stage de Master 2 Sciences des Environnements Continentaux et
Côtiers,

Spécialité ESEB « Environnement, Sol, Eau, Biodiversité »

Prospections géophysiques sur le cours moyen de la Risle



Fanny NIEPCERON

Maître de stage et tuteur universitaire : Abderrahim JARDANI,

Maître de conférences à l'Université de Rouen

Tuteur professionnel : Véronique FEENY-FEREOL

Rendu le 17 juin 2013 et soutenu le 25 juin 2013

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier, tout d'abord, Abderrahim JARDANI de m'avoir encadré pendant la durée de ce stage et de m'avoir initié les bases de la géophysique.

Je tiens à remercier Robert LAFITE de m'avoir accueilli au sein de l'UMR 6143 CNRS M2C dans le cadre de mon stage de master 2.

Je tiens à remercier Matthieu FOURNIER pour son implication durant ce stage.

Je remercie Véronique FEENY-FEREOL pour l'encadrement apporté par la DREAL.

Je remercie Régis ROYER pour l'aide apportée pour contacter les propriétaires des différents sites.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes collègues d'aquarium pour la bonne ambiance quotidienne, les coups de main dans les moments difficiles, les tournées de pains au chocolat et de s'être relayés pour m'accompagner lors de mes (nombreuses) pauses.

Je remercie particulièrement Clément LATTELAIS pour les sorties terrain : c'est vraiment un « mec or ».

Je dis un grand merci à l'ensemble de l'équipe du M2C pour son accueil, sa disponibilité et sa sympathie, mention spéciale pour Maria et Michel.

Enfin, je souhaite remercier ma sœur, Maïté NIEPCERON, pour ses « coucous » quotidiens, pour son soutien et ses conseils, et principalement pour son masque anti-solvant m'évitant de revenir toute rose lors de la préparation de la sulforhodamine !

Sommaire

INTRODUCTION	9
PARTIE I : PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE	11
I. Cadre et objectifs de l'étude.....	11
1. Présentation du projet d'un Observatoire de la Risle	11
2. Objectifs du stage	11
II. Présentation du bassin versant de la Risle	12
1. Le réseau hydrographique de la Risle	13
2. Contextes climatique et hydrologique	15
3. Contexte géologique	16
4. Contexte hydrogéologique.....	18
PARTIE II : UTILISATION DES METHODES GEOPHYSIQUES POUR LA DETECTION DES CONDUITS KARSTIQUES.....	20
I. Matériels et principe de fonctionnement.....	20
1. La Tomographie de Résistivité Electrique (ERT)	20
2. La méthode électromagnétique basse fréquence : EM-34.....	24
II. Prospection mise en place	28
1. Stratégie de prospection	28
2. Choix des profils pertinents	29
3. Choix de la configuration des dispositifs.....	30
4. Problèmes et limites méthodologiques	31
PARTIE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	32
I. Le site d'Ajou, à proximité du Forage.....	33
1. Présentation des résultats	33
2. Interprétation des résultats	35
II. La perte de la Houssaye	35
Profil longitudinal de la rive droite	36
1. Présentation des résultats	36

2. Interprétation des résultats	38
Profil transversal de la rive droite	39
1. Présentation des résultats	39
2. Interprétation des résultats	41
Profil longitudinal de la rive gauche.....	42
1. Présentation des résultats	42
2. Interprétation des résultats	44
III. La résurgence au niveau de Grosley-sur-Risle	45
1. Présentation des résultats	45
2. Interprétation des résultats	47
IV. Synthèse sur les mesures	47
CONCLUSION	49
LISTE DES FIGURES	50
LISTE DES TABLEAUX	51
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE.....	52
LISTE DES ANNEXES	54

INTRODUCTION

Le karst est un milieu particulier, à la fois relief, paysage et ressource en eau. Il est défini comme l'ensemble des formations superficielles et souterraines engendrées par la dissolution des roches, notamment celles carbonatées (Gilli *et al.*, 2005). Ainsi une unité de drainage karstique se développe au sein de la roche originelle. Elle permet de faire interagir les eaux de surface et les eaux souterraines (Bailly-Comte, 2008 ; Bonacci, 2006).

La région de la Haute-Normandie appartient à la grande unité géologique du Bassin Parisien. La géologie est dominée par d'épaisses couches crayeuses du Crétacé supérieur, qui sont soumises au processus de karstification (Fournier, 2006). Le karst haut-normand est de type binaire, c'est-à-dire que tout ou une partie de l'impluvium est constitué de terrains non karstifiables, qui concentrent les eaux en un point, appelé perte ou bétoire (Jardani, 2007).

Le bassin versant de la Risle, localisé dans le département de l'Eure, dans la partie aval de l'estuaire de Seine, est situé dans un contexte karstique. Des phénomènes de diminution du débit de la Risle, voire de son assèchement total sont connus depuis le XIX^{ème} siècle. De nombreuses bétoires et résurgences sont visibles dans son lit du fait de l'action simultanée de la nature karstique du sous-sol crayeux haut-normand et de la position perchée de la rivière par rapport à la nappe (Fournier, 2012). Le 28 juillet 2012, une bétoire de très grande ampleur s'est ouverte dans le lit de la Risle au niveau des communes d'Ajou et de la Houssaye, en aval de la Ferrière sur Risle. La totalité de la rivière fut absorbée par la perte provoquant un assec sur 12 kilomètres, jusqu'aux résurgences de Grosley-sur-Risle (www.arehndoc.blogspot.fr). Ce phénomène naturel est relativement classique dans un contexte karstique, mais la localisation et les proportions de la perte en font un évènement spectaculaire (www.cnek.org). Ce phénomène est d'autant plus exceptionnel que les ouvertures de bétoire en rivière ne représentent que 1% des ouvertures de pertes (David et De Bechillon, 2010).

Ce phénomène de perte partielle ou totale s'inscrit dans l'évolution naturelle des cours d'eau exogènes, qui traversent les plateaux calcaires. Il s'explique par la suspension de l'écoulement de surface au-dessus de l'aquifère souterrain. Avec le temps, l'érosion mécanique et l'altération géochimique provoquent des fuites de l'écoulement de surface vers l'aquifère souterrain, qui vont s'amplifier jusqu'à la capture soudaine et totale de l'écoulement de surface. Le débit introduit dans la bétoire d'Ajou a été estimé à 400 L/s (www.cnek.org).

D'après les événements hydrogéologiques passés, le cours moyen de la Risle risque de connaître dans un futur plus ou moins proche, de nouveaux épisodes de perte, pouvant modifier son écoulement habituel (BRGM, 2012). Il est donc nécessaire d'approfondir les connaissances concernant le fonctionnement du secteur perché de la Risle, notamment via la création d'un observatoire de la Risle.

Les investigations hydrogéologiques antérieures ont montré de fortes interactions surface-souterrain par le biais d'un réseau karstique. Or les méthodes utilisées habituellement en hydrogéologie (traçage, test de pompage, ...) fournissent une information partielle sur le système (degré de karstification, volume de la ressource, ...) mais elles ne permettent pas de déterminer la structure interne du réseau karstique. Les prospections géophysiques permettent, via l'étude de propriétés physiques du sous-sol, de déterminer les vides et les conduits karstiques (Guerin *et al.*, 2009 ; Chalikakis *et al.*, 2011 ; Zhu *et al.*, 2011 ; Carriere *et al.*, 2013). De ce fait, ce stage contribue à la connaissance préliminaire de la géologie et de la structure du secteur de la Risle perchée. Ce travail constitue un exemple de multi-partenariat avec un co-encadrement par la DREAL-HN (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Haute-Normandie) et du laboratoire M2C (Morphodynamique Continentale et Côtière) UMR 6143 CNRS de l'Université de Rouen.

Ce mémoire sera organisé en trois parties : la première partie présente de façon détaillée le bassin versant de la Risle, la deuxième partie détaille les techniques utilisées pendant ce stage, et la troisième partie traite les résultats obtenus.

Partie I : PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE

I. Cadre et objectifs de l'étude

1. Présentation du projet d'un Observatoire de la Risle

L'épisode d'assec survenu durant l'été 2012, et dans un contexte où d'autres évènements karstiques sont à prévoir, la connaissance du fonctionnement du secteur perché de la Risle est apparue nécessaire. Ce besoin a motivé la création d'un observatoire de la Risle. Il s'agit d'un projet multi-partenaire entre la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), l'AESN (Agence de l'Eau Seine Normandie), l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques), le CDS (Comité Départemental de Spéléologie) de l'Eure, la FDPPMA (Fédération Départementale pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique) de l'Eure, les syndicats d'eau, les ASA (Associations Syndicales Autorisées) de la Risle, le Conseil Général du département de l'Eure, et le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) de la Risle, dont le pilotage est confié au BRGM.

L'objectif général de cet observatoire est d'approfondir la connaissance du fonctionnement de la Risle moyenne pour orienter les décisions futures concernant l'aménagement du bassin versant de la Risle. Plus précisément, l'Observatoire permettra : (i) d'acquérir une meilleure connaissance du sous-sol et de l'hydrosystème, (ii) d'évaluer l'impact de l'évolution du fonctionnement (niveaux, débits, qualité des eaux) du bassin versant sur l'écosystème aquatique, (iii) de déterminer le comportement de la bétouille aménagée dans le temps et son impact amont/aval. De plus, la bétouille ouverte le 28 juillet 2012 étant située en amont de captage pour l'alimentation en eau potable, l'Observatoire a aussi pour but d'estimer et d'anticiper les risques de dégradation de la qualité de l'eau, voire de proposer des mesures de protection.

2. Objectifs du stage

L'objectif de ce stage est de mettre en évidence les interactions surface/souterrain sur le cours moyen de la Risle au moyen de prospections géophysiques. Ce stage fait l'objet d'un co-encadrement entre la DREAL Haute-Normandie et le laboratoire M2C (Morphodynamique Continentale et Côtière) UMR 6143 CNRS.

Le secteur étudié correspond au tronçon perché de la Risle. Il est situé entre Rugles et Beaumont le Roger. Les prospections géophysiques permettront (i) d'établir la géométrie du réseau karstique sous la vallée de la Risle, (ii) d'identifier les écoulements hypodermiques de sub-surface entre les rives et le drain karstique et (iii) d'établir la structure géologique à la limite craie/formations superficielles. Les mesures de géophysique seront menées sur le tronçon perché de la Risle, au niveau de sites stratégiques déterminés suite à une étude bibliographique et cartographique du bassin versant de la Risle. Les techniques de prospection utilisées sont : la Tomographie de Résistivité Electrique (ERT), l'Électromagnétisme (EM), le Potentiel Spontané (PS), et le radar géologique. La stratégie de l'étude est présentée sur la figure 1.

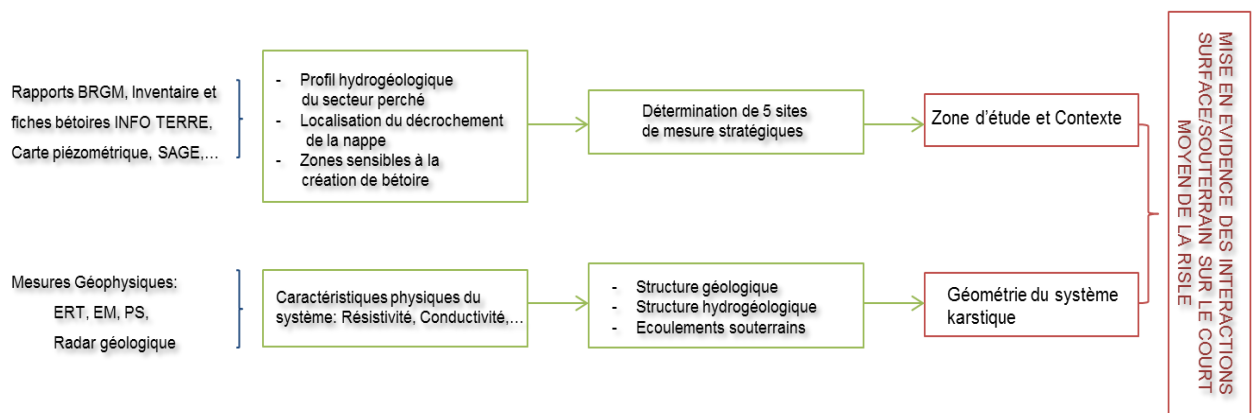


Figure 1: Stratégie globale de l'étude

II. Présentation du bassin versant de la Risle

Le bassin versant de la Risle est situé au Sud de la Haute-Normandie (fig. 2). Il s'étend sur les départements de l'Eure pour la majorité (80%) et de l'Orne (20%), (Jannot, 2010). Il s'agit du plus grand bassin versant du département de l'Eure et le deuxième plus important de la région, avec une superficie de 2 300 km² (SCOT Risle Charentonne, 2007). La Risle prend sa source au niveau des collines du Perche dans le département de l'Orne, sur la commune des Planches (altitude 275 m) et se jette dans l'estuaire de la Seine au niveau des communes de Berville-sur-mer et Saint-Samson de la Roque dans le département de l'Eure (altitude 4 m), (Sage de la Risle, 2007). Le linéaire principal de la Risle mesure environ 149 kilomètres, mais elle atteint les 226 kilomètres en prenant compte les nombreux bras annexes naturels ou usiniers (50% de linéaires secondaires). Son principal affluent est la Charentonne (linéaire de plus de 100 km), grossi lui-même par le Guiel (linéaire de plus de 25 km).

La zone d'étude correspond au cours moyen ou tronçon perché de la Risle. Elle se situe de l'aval de Rugles jusqu'à Beaumont le Roger (Sage de la Risle, 2007). Ce secteur correspond à un tronçon d'environ 41 kilomètres de linéaire principal.

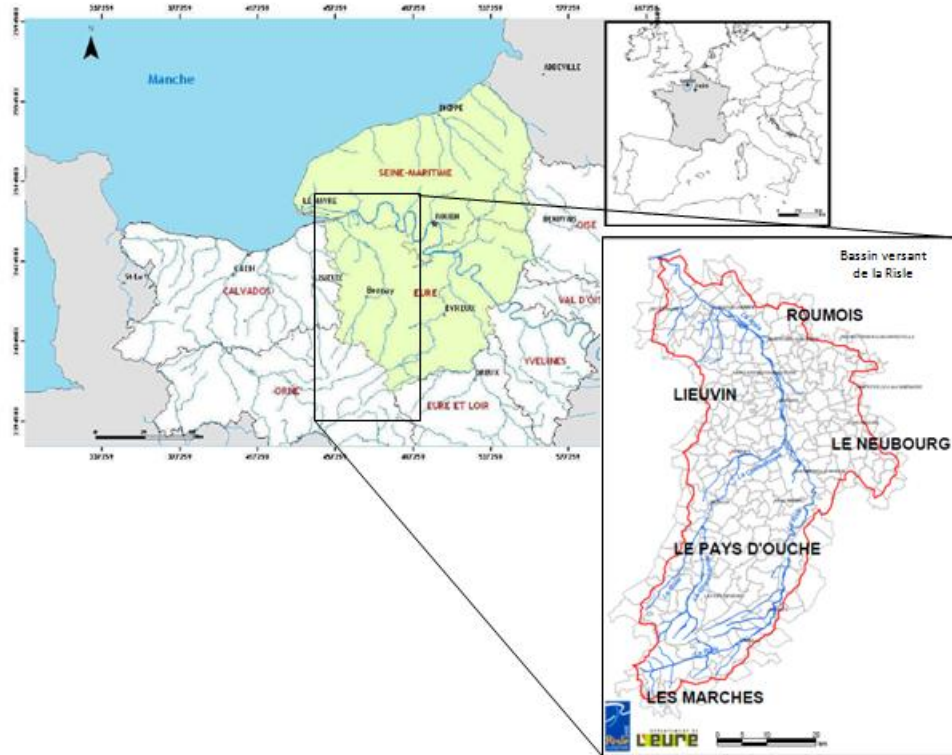


Figure 2: Carte de localisation du bassin versant de la Risle (Slimali, 2009 ; SDAGE Risle, 2005)

1. Le réseau hydrographique de la Risle

Le réseau hydrographique de la Risle peut être divisé en quatre sous-parties, (fig. 3), (Sage de la Risle, 2007) :

- La partie amont = la source et la tête d'alimentation : Sur un tronçon de 43 kilomètres de linéaire principal, la Risle draine un bassin versant imperméable relativement étendu et linéaire, qui tend à avoir une réponse immédiate aux précipitations. Avec l'apport de huit petits affluents latéraux, le débit moyen de la Risle augmente progressivement pour atteindre 2 m³/s en aval de Rugles. La vallée de la Risle sur ce secteur est étroite. Son lit majeur y dépasse rarement 250 mètres. Sur ce tronçon de la Risle, la nappe souterraine est drainée par la rivière par l'intermédiaire de sources ouvertes en son lit (PPT BRGM).

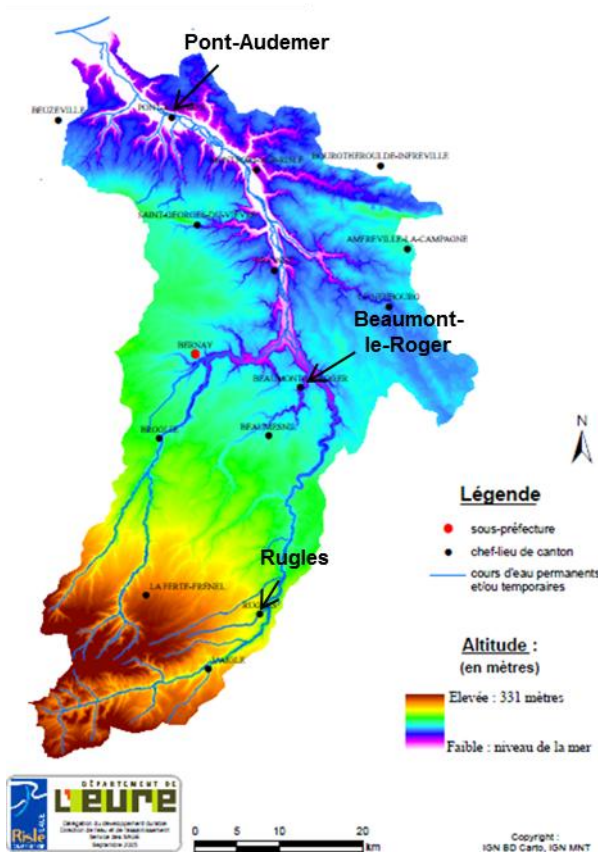


Figure 3: Topographie et réseaux de cours d'eau et talwegs

- Le cours moyen = la Risle perchée:

Ce secteur est situé entre Rugles et Beaumont le Roger, soit un tronçon d'environ 41 kilomètres de linéaire principal. Bien que le débit moyen de la Risle n'évolue pas sur ce tronçon, les caractéristiques de la Risle évoluent avec l'entrée dans l'Eure. La rivière est dite perchée par rapport à l'aquifère de la craie. Le cours d'eau n'est alors plus alimenté par la nappe. Dans ce contexte, il peut se former des pertes dans le lit de la rivière entraînant une baisse ponctuelle de son débit moyen.

- La partie aval : Sur le tronçon de 49

kilomètres de linéaire principal, qui s'étend de Beaumont le Roger jusqu'à Pont-Audemer et le barrage dit de la «Madeleine », la vallée de la Risle s'élargit et le lit majeur s'étend généralement sur

plus de 400 mètres. A partir de Beaumont le Roger, la Risle est réalimentée par des sources aux débits importants, qui sont des exutoires de la nappe de la craie. Sur 20 kilomètres, la Risle grossit très rapidement. Son débit moyen passe ainsi de 5,5 m³/s à Beaumontel, à 10,3 m³/s à Nassandres après la confluence avec la Charentonne. Au niveau de Pont-Audemer, le débit moyen de la Risle atteint 14 m³/s.

- La Risle maritime : Sur ce secteur de 16 kilomètres de linéaire principal, le régime de la Risle change totalement puisqu'elle est soumise à la marée. Le tracé de la Risle a été fortement modifié par les chenalisations successives, nécessaires pour la rendre navigable.

2. Contextes climatique et hydrologique

a) Contexte climatique

Le climat du bassin versant de la Risle est de type sub-océanique (Sage de la Risle, 2007). Il se caractérise par :

- une fréquence assez élevée du nombre de jours de pluie (en moyenne 170 jours/an),
- une pluviométrie bien répartie sur l'année (rapport entre la quantité de pluies tombée le mois le plus pluvieux et le mois le moins pluvieux de seulement 1,5 à 1,9),
- la douceur des températures (température moyenne d'environ 10°C).

Sur le bassin versant de la Risle, Jannot (2010) a montré avec la méthode du double cumul que les pluies sont réparties de façon homogène, bien qu'il existe un gradient de pluviométrie d'Ouest en Est. La pluviométrie décroît de Beuzeville vers les plateaux du Neubourg, avec des variations importantes puisqu'en moins de 50 kilomètres, l'écart peut atteindre 180 à 200 millimètres.

En moyenne, les mois les plus secs sont Avril et Août. Par contre, les automnes se révèlent plus humides avec un maximum pour le mois de décembre. La pluviométrie hivernale est caractérisée par des pluies généralement faibles mais continues sur plusieurs jours, alors que la période estivale est caractérisée par des pluies orageuses, pouvant être localement violentes mais de courtes durées.

b) Régime hydrologique

La Risle est soumise à un régime hydrologique pluvio-océanique, caractérisé par un étiage plus ou moins marqué en été, et des hautes eaux durant l'hiver et le printemps (SCOT Risle Charentonne, 2007). Les régimes hydrologiques mensuels sont caractérisés par une forte variabilité interannuelle, notamment en hiver. Les débits augmentent d'amont en aval, avec 1,395 m³/s à Rai (station amont) et 12,09 m³/s à Pont-Authou (station aval). Cependant, le profil en long du débit de la Risle présente des ruptures de continuum des débits, conséquence de la présence de pertes dans le lit de la rivière (fig. 4). Ces phénomènes résultent de la nature karstique du système et de la présence d'une faille et d'un anticlinal (cf contexte hydrogéologique).

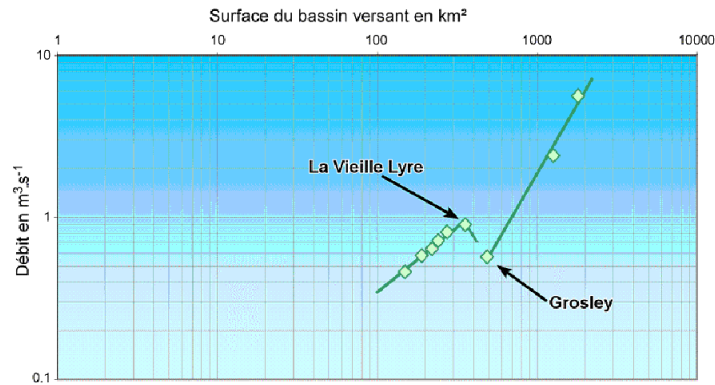


Figure 4: Profil hydrologique sur graphe bilogarithmique de la Risle avant sa jonction avec la Charentonne d'après les données de la DIREN (Rapport stage Chapalain, 2005 dans thèse Valdes, 2005)

3. Contexte géologique

Le bassin versant de la Risle est situé à l'extrémité Ouest du synclinal du bassin de Paris (fig. 5). L'aval immédiat de la tête d'alimentation est situé aux limites du Perche sur des formations peu perméables du Jurassique supérieur (Oxfordien moyen et supérieur), du Crétacé inférieur (Albien et Aptien), (Sage de la Risle, 2007). Ces formations sont essentiellement composées de marnes, d'argiles silteuses ou sableuses, et également de calcaires très durs.

Le reste du bassin versant de la Risle est caractérisé par un substrat crayeux recouvert de formations superficielles, proportionnellement beaucoup plus perméable que le substratum précédent (Slimali, 2009).

Les formations superficielles sont constituées par des dépôts tertiaires ponctuels et des argiles à silex résultant de l'altération de la craie (Laignel, 1997). Ces couches d'argiles à silex sont recouvertes par des loess, c'est-à-dire des dépôts sédimentaires d'origine éolienne. Les épaisseurs de formations superficielles, argiles et loess, sont réparties de façon hétérogène sur le bassin versant de la Risle. Les épaisseurs d'argiles à silex diminuent globalement d'amont en aval d'environ 20 à 6 mètres et les épaisseurs plus importantes (jusqu'à 30 mètres) de loess se concentrent au niveau de la jonction Risle/Charentonne (Annexe I).

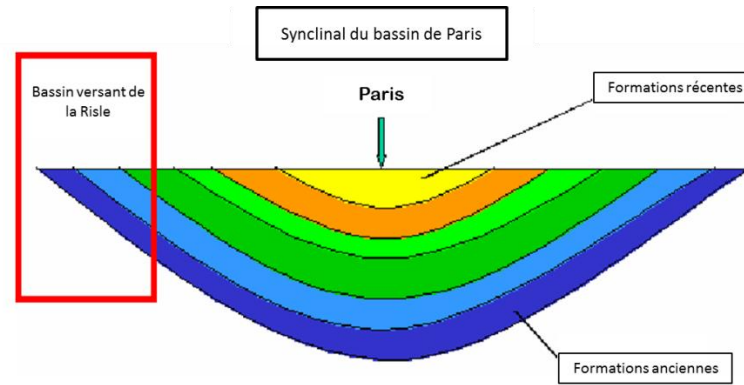


Figure 5: Positionnement du bassin versant de la Risle sur le Synclinal du bassin de Paris (SDAGE Risle, 2005)

Le changement de faciès géologique entre les formations du Perche et le substratum crayeux, à proximité de l'entrée du département de l'Eure, explique la modification de comportement de la Risle. Elle devient perchée par rapport à la nappe entre Rugles et Beaumont le Roger (fig. 6). A l'interface de ces deux couches, la nappe souterraine n'est pas suffisamment proche pour alimenter la rivière (Calandre et Jacono, 2006). Dans ce contexte, la nappe est alimentée par la rivière notamment via l'ouverture de bétoires (SDAGE Risle, 2005).

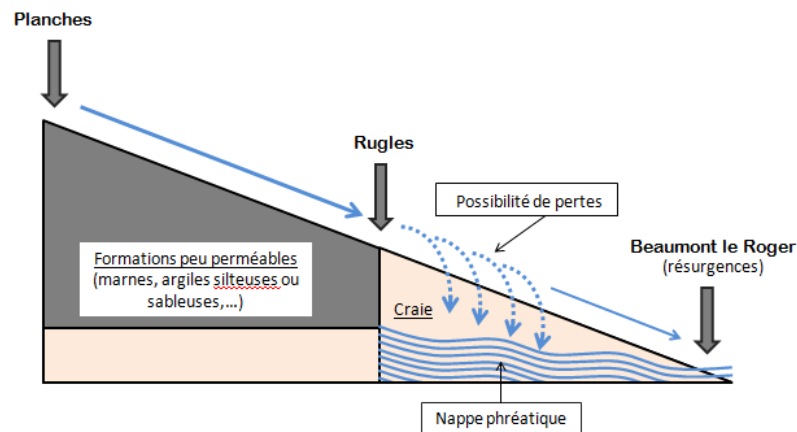


Figure 6: Coupe schématique modifiée du cours moyen de la Risle (SDAGE Risle, 2005)

4. Contexte hydrogéologique

Le bassin versant de la Risle possède trois aquifères principaux (du plus superficiel au plus profond) :

- la nappe de la craie,
- la nappe de l'Albien,
- la nappe de l'Oxfordien,

auxquels s'ajoutent, dans une moindre mesure, les nappes alluviales d'accompagnement des cours d'eau de la Risle et de la Charentonne (Slimali, 2009 ; Sage de la Risle 2007).

L'aquifère de la craie est le principal aquifère de la région Haute-Normandie, tant en volume qu'en exploitation (Valdes, 2005). Situé le plus en superficie, l'aquifère de la craie est soumis aux interactions surfaces/souterrains, d'autant plus qu'il s'agit d'un aquifère à surface libre.

La délimitation du bassin versant hydrogéologique de la Risle est relativement proche de la délimitation du bassin versant topographique (fig. 7).

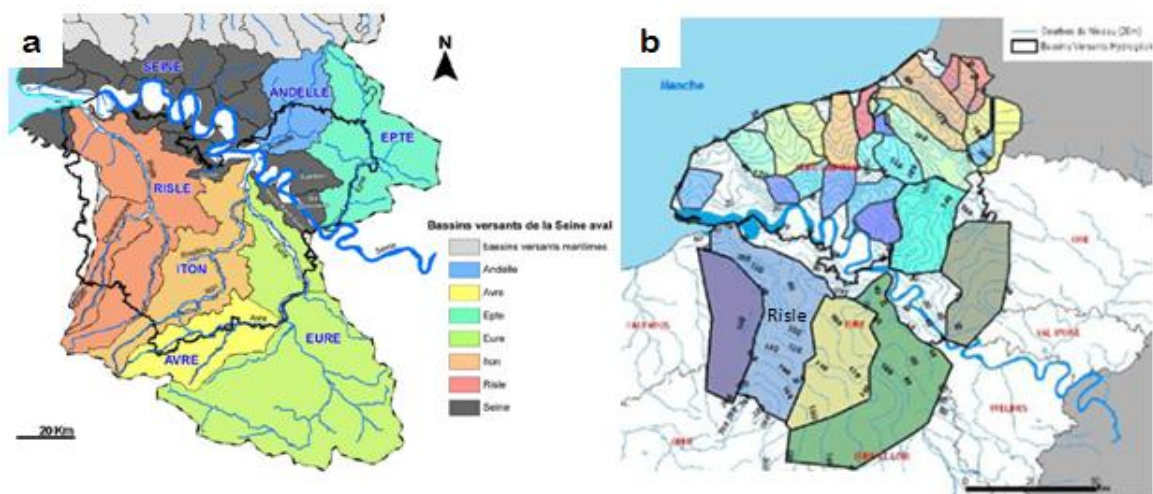


Figure 7: (a) Carte de la localisation des bassins versants du département de l'Eure (Valdes, 2005); (b) carte des bassins versants souterrains de la Haute-Normandie (Mesquita, 2009)
Projection Lambert II étendu

De façon générale sur le secteur du bassin versant de la Risle, la surface piézométrique épouse bien la forme du relief (fig. 3 et Annexe II). Néanmoins, la géométrie de l'aquifère de la craie est très variable, et notamment sur le tronçon étudié compris entre Rugles et Beaumont le Roger (Jannot, 2010). La puissance de la nappe passe de plus de 80 mètres en aval à moins de 10 mètres en amont du bassin versant.

L'étude du profil de la Risle illustre les variations de la puissance de l'aquifère en fonction du contexte structural : épaisseur maximale dans les zones synclinales et épaisseur moindre de l'aquifère et affleurement de la nappe dans les zones anticlinales (fig. 8). Ces variations sont à l'origine des ruptures de continuum des débits observées précédemment (fig. 4). Les zones de ruptures se situent au cœur de la zone synclinale (axe S1), où l'aquifère est localement décroché par rapport à la rivière. Ce décrochement est à l'origine de l'ouverture de pertes au sein du lit de la rivière. Le site de Grosley-sur-Risle, à partir duquel les phénomènes de ruptures de continuums de débit cessent, est situé en aval de l'axe de l'anticlinal (A1), (Dupont *et al.*, 2006).

Ce secteur est caractérisé par un affleurement des eaux souterraines (accroissement du nombre de sources) permettant une réalimentation de la rivière par la nappe (Fournier, 2012).

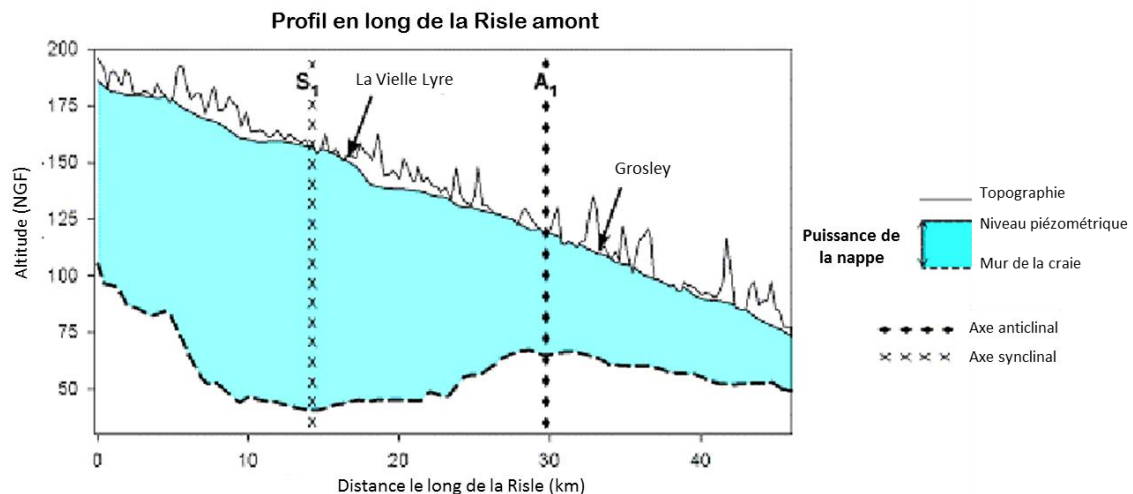


Figure 8: Profil de la nappe de la craie le long de la Risle amont avant la jonction avec la Charentonne (Dupont *et al.*, 2006)

L'existence d'un réseau karstique de très grande ampleur a été mise en évidence par traçages (fluorescéine) à partir de multiples pertes et bétoures observées sur l'ensemble du bassin versant de la Risle. Une connexion a été mise en évidence entre les bétoures et la majorité des captages d'eau potable (Sage de la Risle, 2007).

Remarque : Il est à noter que les ouvertures de bétoures observées en 2005 et notamment en 2012 correspondent à des périodes où les niveaux piézométriques étaient très bas. Ces observations ont été mesurées sur cinq piézomètres (Goupillères, Nogent-le-Sec, Roussière, Graveron-Semerville, Bois Arnault). Les niveaux piézométriques observés correspondent en moyenne à une période de retour de 10 ans voir plus (Annexes III à VII).

PARTIE II : UTILISATION DES METHODES GEOPHYSIQUES POUR LA DETECTION DES CONDUITS KARSTIQUES

Les prospections géophysiques offrent des techniques rapides et non invasives pour permettre d'identifier les caractéristiques du sous-sol (Ahmed & Carpenter, 2003 ; Lekmine, 2011). L'objectif de ces mesures est de décrire la structure interne d'un sol (nature des matériaux, épaisseurs, fracturation, ...) par la mesure d'une grandeur physique en surface (vitesse des ondes sismiques, résistivité, conductivité,...), (CETE, 2009). Cette partie s'intéresse plus particulièrement à l'utilisation de méthodes électromagnétiques et électriques pour la détection de bêttoires ou de conduits karstiques (Jardani, 2007). Dans cette partie, ne sont développées que les techniques utilisées dans la première partie du stage, à l'origine des résultats présentés.

I. Matériels et principe de fonctionnement

1. La Tomographie de Résistivité Electrique (ERT)

Les méthodes électriques, ici la tomographie de résistivité électrique, repose sur la mesure de différence de potentiel électrique entre des électrodes (Jardani, 2007). En hydrogéologie, la prospection électrique est principalement utilisée pour localiser et estimer les directions et les vitesses d'écoulement des eaux souterraines (Lekmine, 2011).

a) Principe de la mesure

La prospection électrique est une méthode d'exploration du sous-sol, qui repose sur la détermination de la distribution des valeurs de résistivité électrique ρ ($\Omega.m$) à partir de mesures réalisées en surface du sol (Hoareau *et al.*, 2010). La résistivité électrique caractérise l'aptitude d'un matériau à empêcher le passage d'un courant électrique (Jardani, 2007). Sa connaissance permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol (Bernard *et al.*, 2006). La figure 9 illustre le principe de la mesure de ERT. La profondeur d'investigation est fonction de l'écartement entre les électrodes. Les mesures de résistivité sont réalisées avec un Syscal Pro Switch 72, distribué par Iris Instrument.

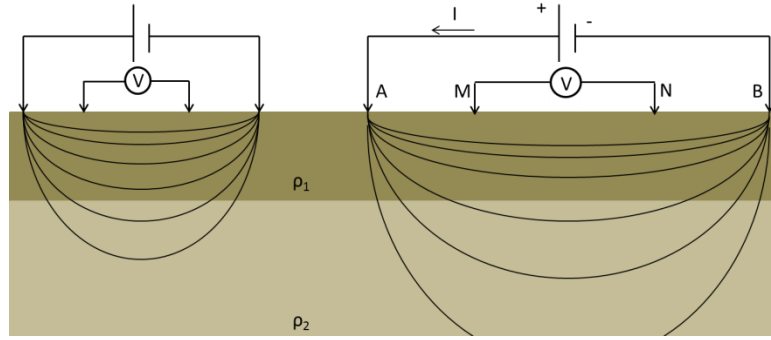


Figure 9: Principe de la prospection électrique

Un courant électrique d'intensité I est injecté en surface via deux électrodes d'injection : A et B, et la différence de potentiel électrique (ΔV) est mesurée entre deux électrodes de mesure : M et N (Bernard, 2006). La valeur de potentiel autour d'une électrode de mesure est obtenue en résolvant l'équation de Poisson de l'électrostatique (Jardani, 2007).

b) Calcul de la résistivité

Pour un sous-sol homogène, les valeurs de potentiel aux points M et N sont donnés par :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \text{ et } V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right)$$

D'où la différence de potentiel MN:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)$$

A partir de la mesure de différence de potentiel (ΔV), il est possible de calculer la résistivité électrique d'une formation (Hoareau et al., 2010).

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} = \frac{\Delta V_{MN}}{I} K, \text{ avec } K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1}$$

Le facteur géométrique K dépend du dispositif de mesure utilisé. Il existe différents dispositifs ou arrangements pour les électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N), plus ou moins sensibles à la façon dont varie la résistivité au sein du milieu étudié (fig.10), (Dahlin et Zhou, 2004 ; Locke, 2004).

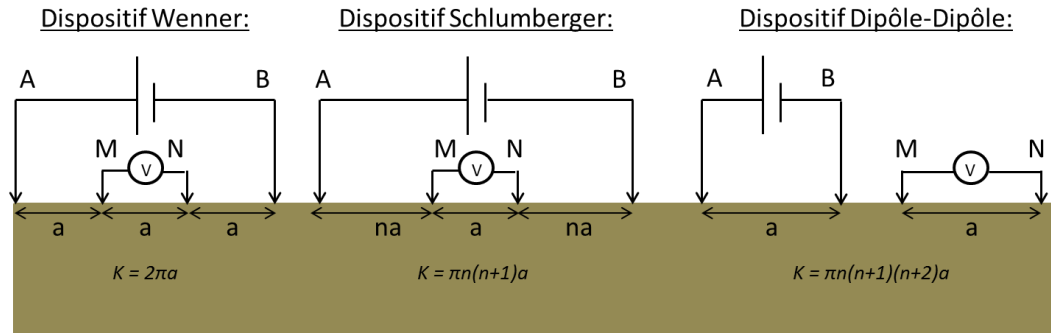


Figure 10: Présentation des principaux dispositifs utilisés en tomographie

Le choix du dispositif est fonction de l'objet étudié et des objectifs de l'étude (résolution...). Le dispositif Wenner est un quadripôle avec une distance identique entre chaque électrode, où le dipôle de mesure est placé au centre du dispositif. Ce dispositif est recommandé pour l'étude des structures horizontales, comme les terrains stratifiés. Le dispositif Schlumberger présente la même configuration que le dispositif Wenner mais où la distance entre les électrodes M et N est faible. Ce montage est destiné aux terrains présentant des structures à la fois horizontales et verticales. Le dispositif Dipôle-Dipôle est un quadripôle où le dipôle d'injection et le dipôle de mesure sont séparés. L'écart entre les électrodes de chaque dipôle est constant (a) mais la distance entre les dipôles est variable. Ce montage est recommandé surtout pour les structures verticales telles que les failles. Ce dispositif présente une sensibilité importante au bruit. Les profondeurs d'investigation varient selon le montage envisagé, les dispositifs Schlumberger et Dipôle-Dipôle proposent une prospection plus profonde que le dispositif Wenner (Jardani, 2007).

Les mesures de tomographie utilisent le sondage et le profilage simultanément, c'est-à-dire que le profil se déplace le long d'un transect composé d'un grand nombre d'électrodes, quadripôle par quadripôle avec une distance inter-électrodes de plus en plus importante.

Lorsque le sous-sol n'est pas homogène, la résistivité mesurée est dite apparente car elle correspond à la résistivité brute d'un volume de sol mesurée entre deux électrodes. Elle résulte de la contribution de chacun des éléments du sol traversés par le courant injecté, en fonction de leur résistivité et de leur localisation par rapport aux sources de courant (Jardani, 2007).

Les mesures de tomographie de résistivité électrique de surface permettent d'obtenir un modèle de la structure du sol, c'est-à-dire une coupe de la résistivité en fonction de la profondeur. Ceci passe par le principe de modélisation inverse, qui est fréquemment utilisé en sciences de la Terre pour estimer indirectement les propriétés des systèmes géologiques naturels à partir de mesures physiques (Lekmine, 2012).

En tomographie, il s'agit de convertir les résistivités apparentes mesurées sur le terrain en résistivité vraie du sous-sol sous la forme d'un modèle mathématique de structure du sol (Bernard *et al.*, 2006). Ces modèles idéalisés de la réalité physique ne permettent pas une description parfaite de l'environnement. Le nombre fini de mesures contraint l'inversion à une description approximative du système pouvant être décrit par plusieurs modèles. (Lekmine, 2012). L'interprétation des données se fait maintenant de façon routinière par des logiciels spécialisés comme le logiciel Res2Dinv, de Geotomo Software utilisé ici. Le principe de l'interprétation des mesures de ERT est présenté en figure 11.

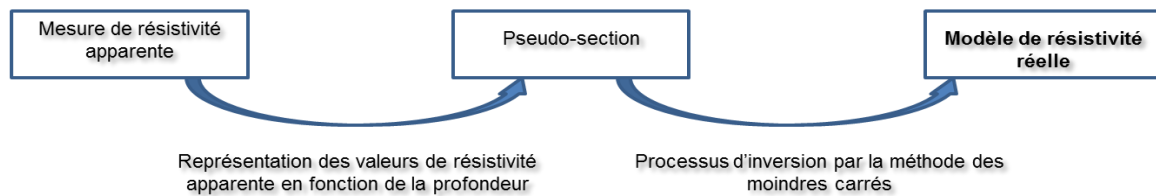


Figure 11: Principe de l'interprétation des données de ERT

La première étape dans l'interprétation des données de tomographie de résistivité électrique consiste à construire une pseudo-section, c'est-à-dire une coupe représentant les valeurs de résistivité apparentes mesurée en fonction de la profondeur, (fig. 12).

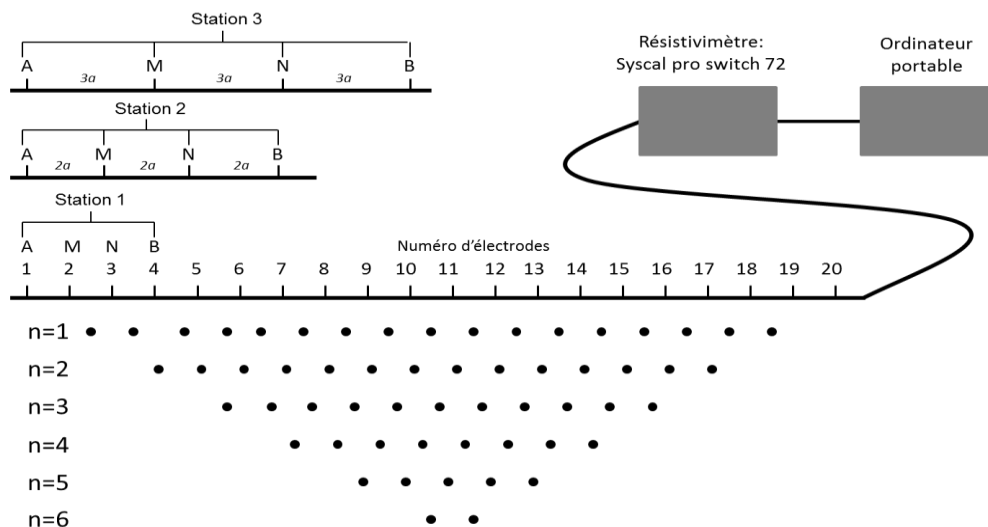


Figure 12: Principe de construction d'une pseudo-section (dans Jardani, 2007, d'après Barker, 1979)

La représentation de la résistivité intrinsèque du sol en fonction de la profondeur est obtenue grâce à un modèle d'inversion, choisi le plus proche des valeurs mesurées. Le logiciel Res2Dinv utilise la méthode d'inversion des moindres carrés pour inverser les mesures de résistivité apparente et ainsi obtenir la représentation des variations de la résistivité réelle en fonction de la profondeur réelle (Join *et al.*, 2007).

Cette inversion est réalisée suivant un processus itératif qui minimise l'écart entre la pseudo-section mesurée et la pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique (Jardani, 2007).

Au final, les résultats sont présentés sous la forme de trois profils (fig. 13) avec respectivement :

- La représentation de la pseudo-section à partir des mesures de résistivités apparentes
- La représentation de la pseudo-section calculée
- La représentation du modèle d'inversion de la résistivité

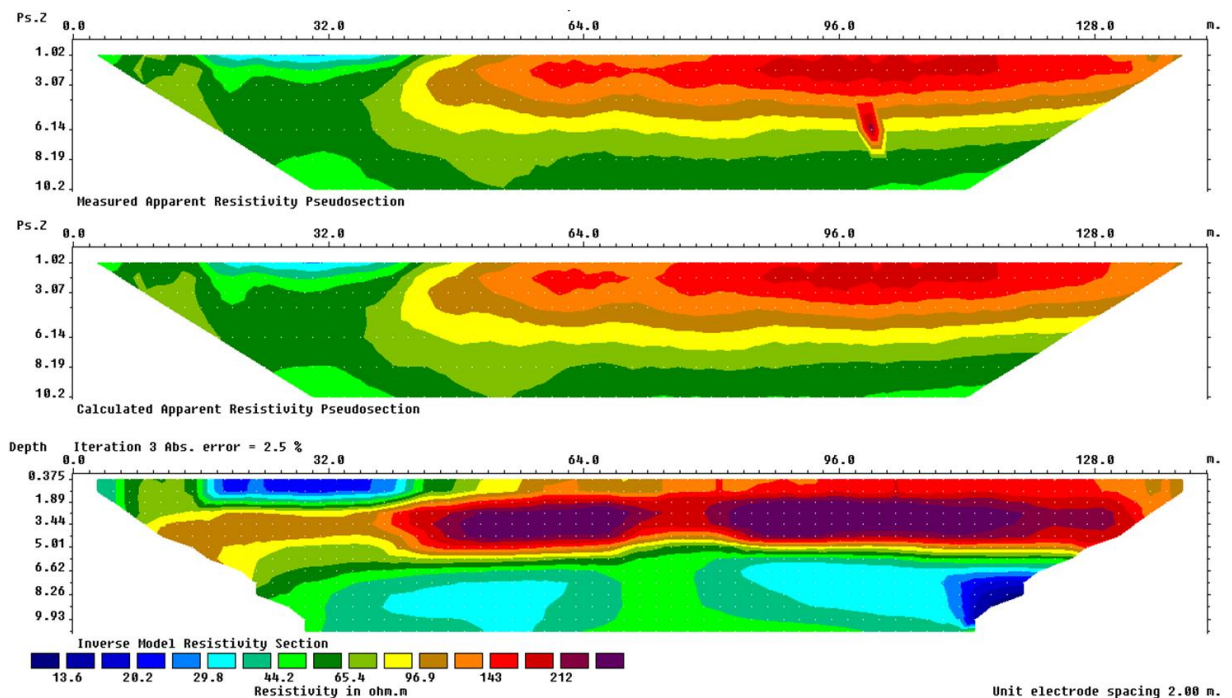


Figure 13: Présentation des résultats obtenus avec la tomographie de résistivité électrique

2. La méthode électromagnétique basse fréquence : EM-34

Les méthodes électromagnétiques sont couramment utilisées pour l'étude des fractures et des discontinuités (Ahmed & Carpenter, 2003). Il faut distinguer deux types de méthodes : la méthode Slingram à basses fréquences et les méthodes de dispersion à hautes fréquences (radar géologique), (Jardani, 2007).

a) Principe de la mesure

Le principe des méthodes électromagnétiques basse fréquences est basé sur la mesure d'une conductivité apparente σ_a du sous-sol par l'analyse des modifications d'un champ électromagnétique (Borne, 1990). Les mesures sont réalisées grâce au conductivimètre EM-34, développé par GEONICS (Canada). Le conductivimètre se compose de deux bobines, l'une émettrice, l'autre réceptrice (McNeil, 1980). L'émetteur génère un champ magnétique primaire (H_p) à une fréquence donnée, via une bobine d'induction reliée à une source oscillante (fig. 14), (Bievre, 2007). Lorsque le champ magnétique primaire rencontre une anomalie conductrice, il en résulte un champ magnétique secondaire (CETE, 2009). La réunion de ces deux champs magnétiques est mesurée par le récepteur.

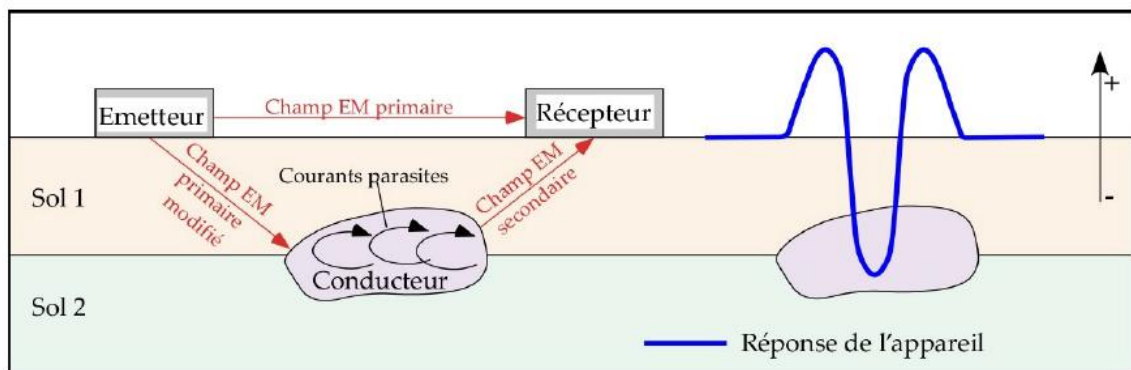


Figure 14: Principe général de la prospection électromagnétique en champ proche (Bievre, 2007)

Le rapport des champs magnétiques primaire et secondaire en quadrature est alors directement proportionnel à la conductivité apparente du sous-sol.

La mesure de ce rapport permet de décrire les hétérogénéités conductrices du sous-sol en termes de conductivité apparente σ_a (S/m), (inverse de la résistivité apparente ρ_a (Ω/m)), (Bievre, 2007).

$$\sigma = \frac{2}{\pi f \mu_0 r^2} \left| \frac{H_s}{H_p} \right| = \frac{1}{\rho_a}$$

σ_a : conductivité apparente (mS/m),

r : distance émetteur-récepteur

μ_0 : perméabilité magnétique du vide ($=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

f : fréquence d'auscultation (Hz)

H_s : champ électromagnétique secondaire

H_p : champ électromagnétique primaire

ρ_a : résistivité apparente ($\Omega.m$)

Il est possible d'utiliser la méthode EM-34 selon deux dispositifs : HDM : Horizontal Dipole Mode (champ horizontal, boucles verticales) et VDM : Vertical Dipole Mode (champ vertical, boucles horizontales) comme indiqué sur la figure 15 (Jardani, 2007). La contribution de la couche située à proximité de la surface est très importante lors de mesure en dipôle horizontal, le champ magnétique secondaire étant influencé principalement par les couches superficielles du sous-sol. Inversement, lorsque le dipôle est vertical, le champ magnétique est influencé majoritairement par les couches situées plus en profondeur. Dans cette configuration, la sensibilité aux variations de conductivité des couches superficielles est moindre (Jardani, 2007 ; Bievre, 2007).

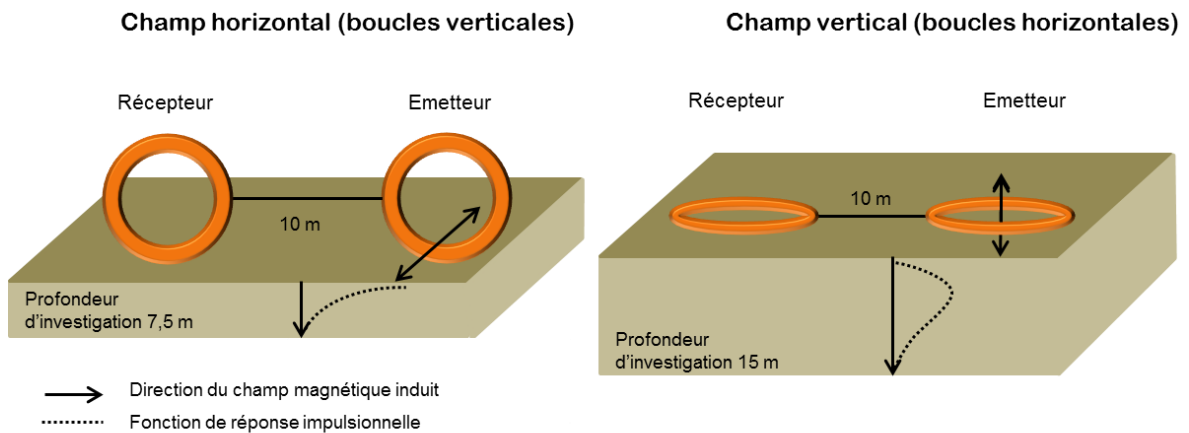


Figure 15: Dispositifs EM 34 et profondeur d'investigation (d'après Jardani, 2007)

La profondeur d'investigation dépend de la distance entre les bobines et de leur arrangement (tableau 1), (Borne, 1990). Toutefois, plus l'écartement des bobines augmente, plus la résolution de la mesure diminue.

Espacement des bobines		Fréquence d'acquisition (kHz)	Profondeur d'exploration (m)		Résolution (m)
			Champ horizontal (HDM)	Champ vertical (VDM*)	
EM 34	10 m	6,4	7,5	15	2
	20 m	1,6	15	30	4
	40 m	0,4	30	60	8

Tableau 1: Profondeurs d'investigation indicatives (Bievre, 2007)

L'appareillage affiche directement la valeur de la conductivité apparente du sous-sol, exprimée en milliSiemens par mètre (mS/m). Par convention, le point de mesure est situé au milieu des deux bobines. Le pas d'acquisition est fixé en fonction de la taille et de la géométrie des anomalies étudiées, ainsi que de la taille de la surface à prospector.

b) Traitement des mesures

Les mesures d'électromagnétisme EM-34 donne une mesure ponctuelle de la conductivité, située au centre de l'espacement des deux bobines. Comme vu précédemment, la profondeur de la mesure est fonction de l'écartement des bobines. Les données peuvent être représentées sous forme de profil de conductivité pour la profondeur correspondant à l'écartement des bobines. Le profil représente la valeur de conductivité en fonction de la position sur la longueur du segment (fig. 16).

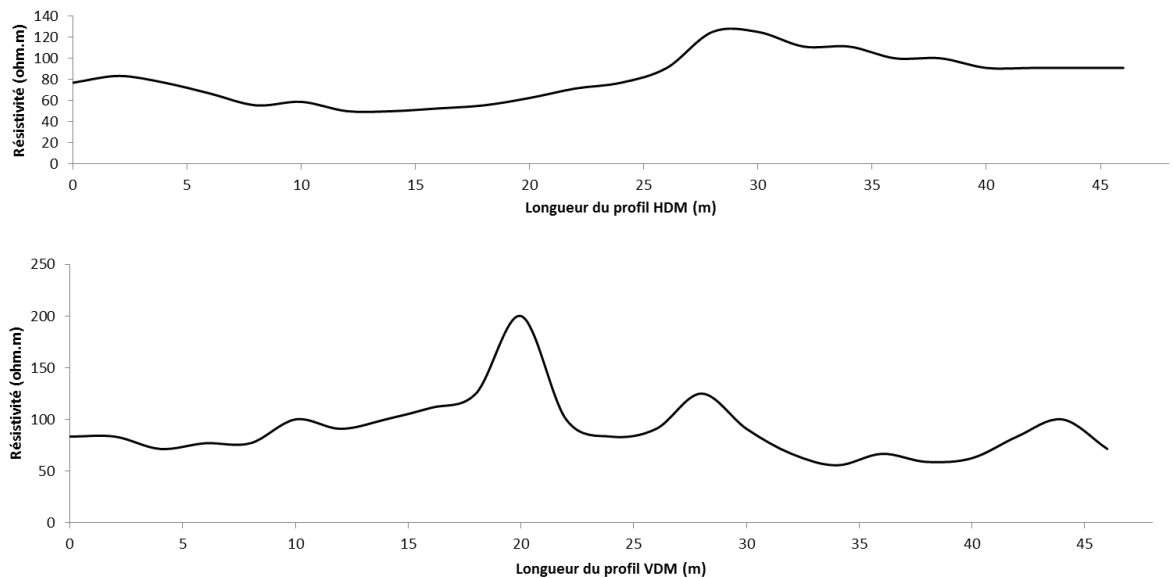


Figure 16: Exemple de représentation des données d'électromagnétisme EM-34

Lorsque les prospections quadrillent de façon rapprochée un secteur, il est possible d'obtenir une carte de conductivité par interpolation, pour les différentes profondeurs prospectées (Wudba, 2003).

Lorsque plusieurs prospections géophysiques sont menées sur un même site, il peut être utile de convertir les mesures de conductivité (S/m) en valeurs de résistivité ($\Omega.m$), sachant que $\sigma = \frac{1}{\rho}$, avec σ , la conductivité et ρ , la résistivité.

Depuis quelques années, des algorithmes d'inversion ont été développés afin de déterminer la distribution 3-D des valeurs de conductivité électriques (Marescot, 2003).

II. Prospection mise en place

1. Stratégie de prospection

Le secteur de la Risle étudié représente un tronçon de 41km entre Rugles et Beaumont le Roger. Etant donné qu'il est impossible de prospecter toute la longueur de ce secteur, l'étude a été recentrée sur des sites qui apparaissent stratégiques dans la compréhension de la karstification de la vallée de la Risle. Le choix s'est porté sur 5 sites (fig. 17), soit situés au niveau de points stratégiques du secteur perché :

- Le décrochement de la nappe au niveau du lieu-dit « Les Petits Bottereaux » à proximité de Ambenay
- Le forage d'Ajou
- La reconnexion de la nappe au niveau de la pisciculture de Grosley-sur-Risle,

soit au niveau de niveau de bétoures répertoriées :

- La bétoure de la Houssaye ouverte le 28 juillet 2012
- Le secteur de Val Gallerand au niveau de la bétoure ouverte en 2005

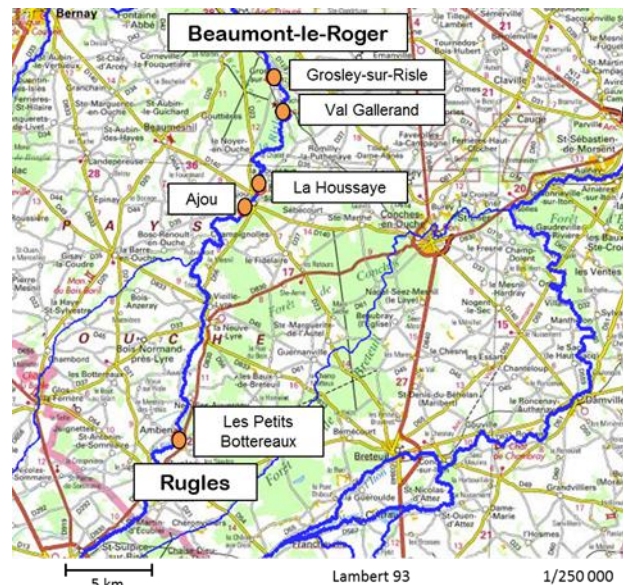


Figure 17: Carte de localisation des sites

Les sites de décrochement et de reconnexion de la nappe permettent de circonscrire le réseau karstique présent sous la Risle. Le décrochement de la nappe a été localisé approximativement au niveau du point P5601, référencé par le BRGM. Il s'agit d'un point d'injection utilisé lors d'une campagne de traçage en 1982. La reconnexion de la nappe est étudiée au niveau de la résurgence observée dans le lit de la Risle le 2 août 2012. Cette résurgence est située au niveau des ballastières de la SNCF, juste en amont du barrage de dérivation de la pisciculture de Grosley-sur-Risle.

Le forage d'Ajou est situé au fond de la vallée de la Risle. Des études géophysiques ont déjà été menées en 1991 au niveau de ce site. Elles ont montré des zones de craie compacte et d'autres plus altérées (De La Queriére et Mathieu, 1993). Ce forage est connu pour recouper un conduit karstique d'au moins un mètre de diamètre.

Ayant le log géologique du forage, ce site permet de comparer les mesures obtenues avec la géophysique et le log géologique (Annexe VIII).

Les sites présentant des bêttoires connues témoignent de la présence en souterrain du réseau karstique. Leur prospection peut permettre de recouper le karst et d'obtenir des informations afin d'appréhender sa localisation et sa géométrie.

Le stage n'étant qu'à sa moitié, seuls les sites du Forage d'Ajou, de la perte de la Houssaye et de la résurgence de Grosley-sur-Risle sont présentés dans ce rapport.

2. Choix des profils pertinents

Pour localiser et caractériser la géométrie de réseaux karstiques, il est conseillé de réaliser des profils positionnés transversalement par rapport au système étudié, (Zhu *et al.*, 2011). La figure 18 présente les types de profils, longitudinal et transversal, ainsi que la position de différents profils réalisés lors de cette étude. Lors de ce stage, les caractéristiques du terrain n'ont pas permis de pouvoir réaliser des profils transversaux. A Ajou, les profils ont été réalisés parallèlement au chemin, situé le long du champ où le forage est implanté. Sachant que le forage recoupe un conduit karstique d'environ 1 mètre de diamètre, les profils ont été centrés sur la position du forage dans le but d'essayer de visualiser cette cavité. N'ayant pas de certitude quant à l'orientation de ce conduit, l'idéal aurait été de réaliser deux profils perpendiculaires, or la présence d'une culture de colza haute a rendu impossible la réalisation d'un profil transversal au chemin. Au niveau de la perte de la Houssaye, deux profils longitudinaux ont été réalisés de part et d'autre de la perte afin de caractériser au mieux la géologie et la géométrie du karst sur ce secteur.

Sur ce site, la rive droite a permis d'effectuer un profil transversal afin d'essayer d'appréhender la localisation du système karstique. L'idéal aurait été de réaliser un profil transversal centré sur la perte, la réalité du terrain et la hauteur d'eau de Risle actuellement ne l'ont pas permis. Au niveau de la pisciculture, la géométrie des berges n'a rendu possible qu'un profil longitudinal situé au niveau de la résurgence observée le 2 août 2012.

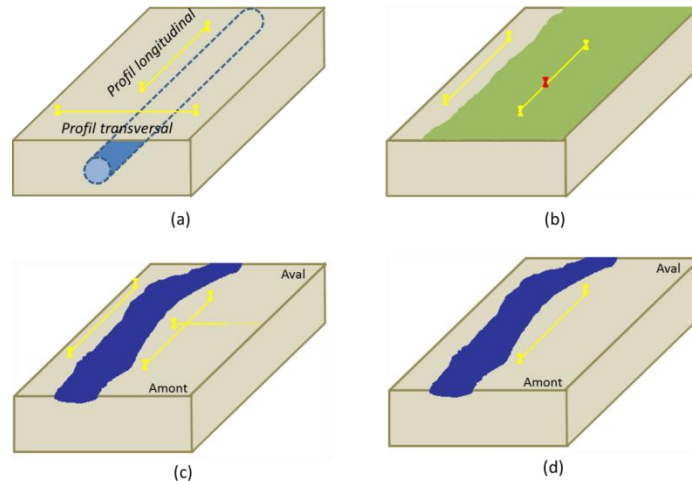


Figure 18: Schéma de la localisation des différents profils: (a) Profils théoriques, (b) Profils à Ajou, (c) Profils à la Houssaye, (d) Profil de Grosley-sur-Risle

3. Choix de la configuration des dispositifs

a) *La tomographie de résistivité électrique*

La tomographie de résistivité électrique est un outil efficace pour caractériser la géologie du sous-sol et les zones karstiques grâce aux contrastes de résistivité (Robert *et al.*, 2011). Le choix du dispositif de mesure dépend des objectifs de l'étude et des structures recherchées (Jardani, 2007). Lors de cette étude, les objectifs sont d'approfondir la connaissance de la géologie du secteur perché de la Risle et d'établir la géométrie du réseau karstique sous la vallée de la Risle. Les structures étudiées étant principalement horizontales, chaque site a été prospecté au moyen d'un dispositif Wenner. Au vue des premiers résultats, le dispositif Dipôle-Dipôle a aussi été utilisé au niveau de la perte de la Houssaye et du forage d'Ajou afin d'essayer de mettre en évidence d'éventuelles structures verticales. Les résultats obtenus avec ce dispositif n'ont pas été concluant suite à une erreur de programmation. Il a donc été choisi de ne pas présenter ces résultats.

Lorsque les caractéristiques du terrain le permettent, le choix de la longueur du profil, influençant directement sur la profondeur d'investigation, est préférentiellement de 355 mètres (soit un intervalle de 5 mètres inter-électrodes). Cette configuration permet d'envisager de prospecter le sous-sol sur une profondeur avoisinant les 40 mètres.

Pour les profils de la Houssaye, la géométrie du site a nécessité de réduire l'écart inter-électrodes à 2 mètres, réduisant la profondeur de prospection à moins de 15 mètres.

b) L'électromagnétisme EM-34

L'électromagnétisme permet de mettre en évidence des anomalies conductrices, pouvant indiquer de la présence de zones altérées, saturées en eau résultant de processus de karstification. L'étude des données géologiques et des coupes stratigraphiques disponibles indiquent que le toit de la craie se situe en moyenne entre 4 et 11 mètres en profondeur. Dans le but de visualiser les anomalies conductrices témoignant de zones d'altération de la craie saturée en eau tout en conservant une résolution correcte, il a été choisi de réaliser des mesures tous les 5 mètres avec un écartement inter-bobines de 10 mètres. Cette configuration permet de mesurer la conductivité du sous-sol à une profondeur de 7,5 mètres avec le dipôle horizontal et de 15 mètres avec le dipôle vertical.

4. Problèmes et limites méthodologiques

La principale difficulté dans l'interprétation des données de tomographie de résistivité électrique concerne la non-unicité des solutions. Pour une même mesure de pseudo-section plusieurs modèles d'inversion s'approchant de la valeur de résistivité apparente mesurée peuvent être générés. Or certains peuvent être très différents, voir aberrants par rapport à la structure du terrain étudié. L'interprétation des données nécessite donc d'avoir des connaissances concernant le site étudié ou l'acquisition d'informations complémentaires permettant de confirmer cette interprétation (Hoareau, 2010).

La principale difficulté avec les mesures d'électromagnétisme concerne leur forte sensibilité aux éléments conducteurs présents au niveau de la zone d'étude. Ainsi, des mesures peuvent être bruitées par la présence à proximité d'éléments conducteurs tels que des clôtures métalliques, des canalisations, ou encore des voitures. De plus, les mesures d'électromagnétisme ne permettent que de mesurer que la conductivité apparente du milieu à une profondeur donnée. Récemment, avec le développement des algorithmes d'inversion des données géophysiques, il est devenu possible d'obtenir une géométrie 3-D de la distribution de conductivité électrique réelle des couches prospectées (Jardani, 2007).

Partie III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats obtenus jusqu'à maintenant sont présentés par site prospecté. Les données sont présentées sous forme de fiche de résultats avec la localisation du site et du profil, les caractéristiques de chaque profil, les profils de résistivité issus de l'électromagnétisme EM 34 et le modèle obtenu par tomographie de résistivité électrique (fig.19, 21, 23, 25 et 27). Pour chaque site, un schéma d'interprétation simplifié est aussi proposé.

L'électromagnétisme mesure la conductivité du sous-sol (mS/m). Les données obtenues sont converties en résistivité (= inverse de la conductivité) afin de faciliter la comparaison des mesures obtenues sur un même site avec les deux techniques (Tomographie et Electromagnétisme).

Les modèles de résistivité obtenus avec la tomographie sont analysés directement, les modèles calculés permettant une représentation visuelle des contrastes. Les profils d'EM 34 ont été replacés sur les modèles de tomographie au niveau des profondeurs d'investigation correspondantes afin de faciliter la comparaison des valeurs obtenues.

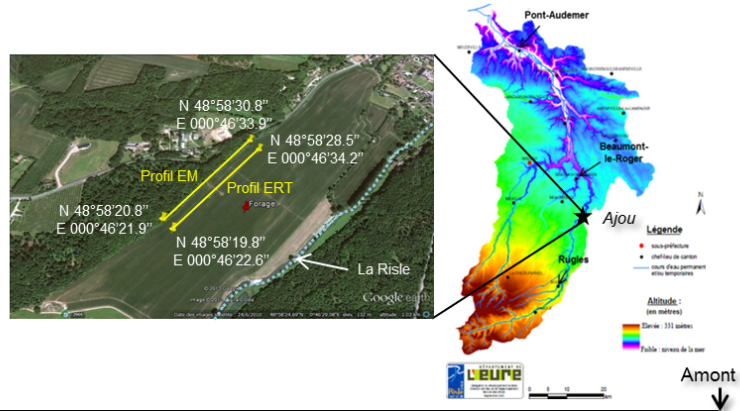
Les données d'électromagnétisme sont aussi analysées afin d'étudier la répartition des valeurs de résistivité par classes dans le but d'essayer de conclure sur la nature et l'état de la roche encaissante, ainsi que sur la présence ou non d'anomalie.

I. Le site d'Ajou, à proximité du Forage

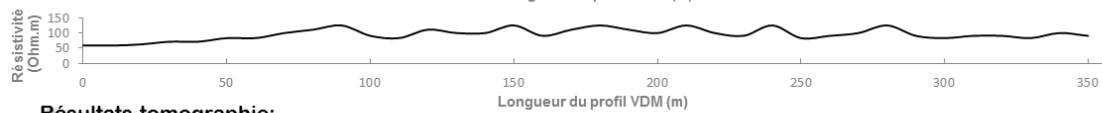
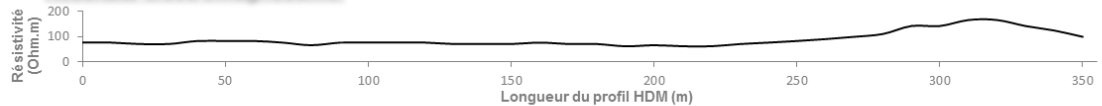
1. Présentation des résultats

Forage Ajou:

- Profil longitudinal par rapport à la Risle, positionné au niveau du forage, orienté Nord-Est /Sud -Ouest
- Tomographie:
 - Dispositif Wenner
 - Espacement: 5m
 - 3 itérations
 - Erreur Abs. 1.24%
- Electromagnétisme:
 - Espacement: 10m
 - Mesure tous les 5m



Résultats électromagnétisme:



Résultats tomographie:

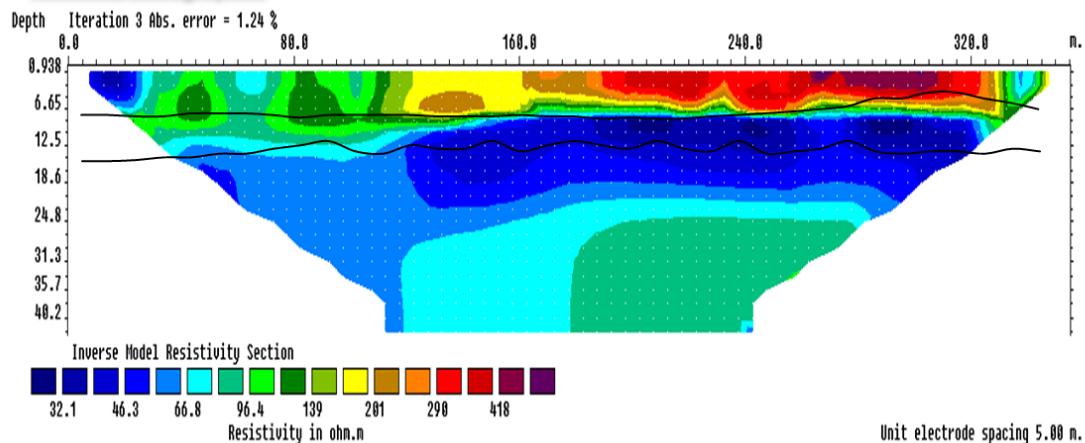


Schéma de la géologie:

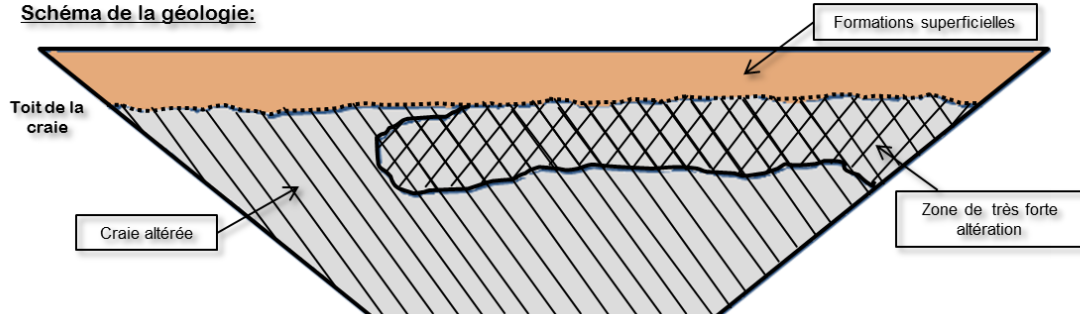


Figure 19: Fiche de présentation des résultats pour le site d'Ajou

a) Les données d'électromagnétisme EM-34

La prospection d'électromagnétisme a été réalisée le long un profil de 72 points. Sur l'ensemble des mesures, les valeurs de résistivité observées se situent entre 58 et 167 $\Omega.m$. Sur les deux profils (7,5 et 15 mètres de profondeur), la répartition des valeurs de conductivité est très inégale (fig. 20).

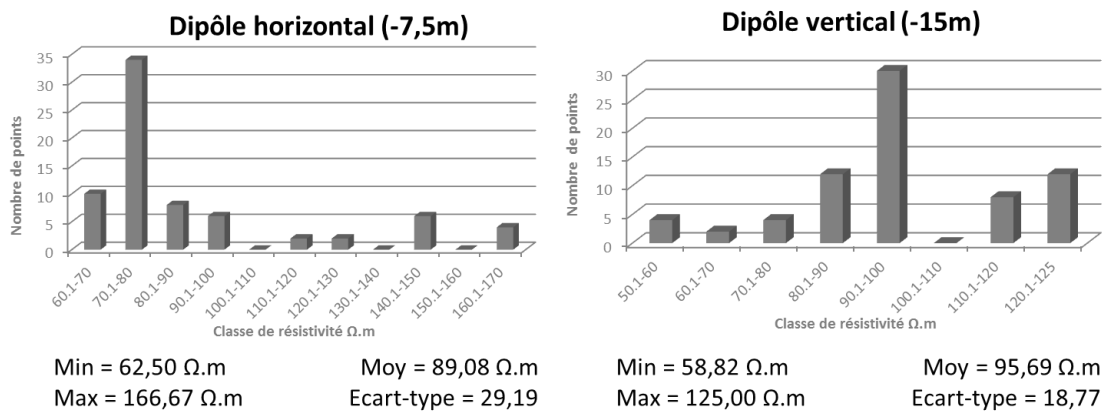


Figure 20: Distribution des valeurs de résistivité par classes, pour le site d'Ajou

Le profil situé à environ 7,5 mètres de profondeur présente des valeurs de résistivité majoritairement comprises entre 60 et 80 $\Omega.m$ (61%). Le reste des mesures présentent des valeurs de résistivité supérieures, comprises entre 80 et 170 $\Omega.m$.

Le profil situé à environ 15 mètres de profondeur présente des valeurs de résistivité majoritairement comprises entre 80 et 100 $\Omega.m$ (58%). La classe 90-100 $\Omega.m$ est la médiane de la distribution des valeurs de résistivité, 14% des valeurs sont comprises entre 50 et 80 $\Omega.m$ et les 18% restantes sont comprises entre 110 et 125 $\Omega.m$.

b) Les données de tomographie

Le modèle d'inversion de la résistivité est obtenu à partir de 612 points de mesure de résistivité apparente. Le modèle couvre une profondeur d'environ 45 mètres. Les valeurs de résistivité obtenues s'étendent de 30 à 500 $\Omega.m$. Ce modèle laisse apparaître un contraste dans la distribution des valeurs de résistivité. La résistivité de la partie superficielle de la section, entre 0 et 8 mètres de profondeur, est comprise entre environ 100 et 500 $\Omega.m$. La partie plus profonde (-8 à -42 mètres) présente une résistivité plus faible, comprise entre environ 30 et 100 $\Omega.m$. Il convient tout de même de distinguer une zone présentant des valeurs de résistivité très faibles (30 à 60 $\Omega.m$) étendue de -10 à -20 mètres, sur la partie plus en amont du profil.

2. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à partir des deux techniques montrent un contraste de résistivité avec une partie superficielle (environ 0 à -8 mètres) plus résistante et une partie profonde plus conductrice. Ce contraste de résistivité peut s'expliquer par le changement de lithologie (toit de la craie) estimé à environ 11 mètres de profondeur d'après le log du forage (Annexe VIII). La zone plus résistante peut être interprétée comme une couche de formation de superficielle. Ceci est en corrélation avec le log du forage qui indique une couche d'argile à silex entre -1 et -11 mètres. La partie plus conductrice (30 à 100 $\Omega.m$) peut être assimilée à une couche de craie plus ou moins altérée. L'anomalie de conductivité (30 à 60 $\Omega.m$) observée sur la partie amont du profil traduit une zone où l'altération de la craie est très élevée. Cette zone pourrait témoigner de la présence d'une cavité ou d'un conduit karstique. Cette observation est en corrélation avec la présence d'une cavité d'un mètre de diamètre, à environ 17 mètres de profondeur, indiquée sur le log du forage. Cette interprétation est synthétisée par le schéma de la géologie présenté sur la fiche de résultat.

II. La perte de la Houssaye

Afin d'appréhender au mieux la structure de ce site et grâce aux caractéristiques du terrain à cet endroit, trois transects de 142 mètres ont été prospectés au niveau de la perte située à la Houssaye. La géométrie de la rive droite de la Risle a permis de réaliser un profil longitudinal (le long de la berge) et un profil transversal (perpendiculaire à la berge) centrés sur la position de la perte. Sur la rive gauche de la Risle, la présence d'un versant à pente forte et peu accessible n'a pas rendu possible la réalisation d'un profil transversal. Sur cette berge, seul le profil longitudinal a été réalisé, symétriquement à celui de la rive droite par rapport à la Risle.

Profil longitudinal de la rive droite

1. Présentation des résultats

La Houssaye, rive droite:

- Profil longitudinal par rapport à la Risle, positionné au niveau de la perte, orienté Nord /Sud
- Tomographie:
 - Dispositif Wenner
 - Espacement: 2m
 - 3 itérations
 - Erreur Abs. 2.4%
- Electromagnétisme:
 - Espacement: 10m
 - Mesure tous les 5m

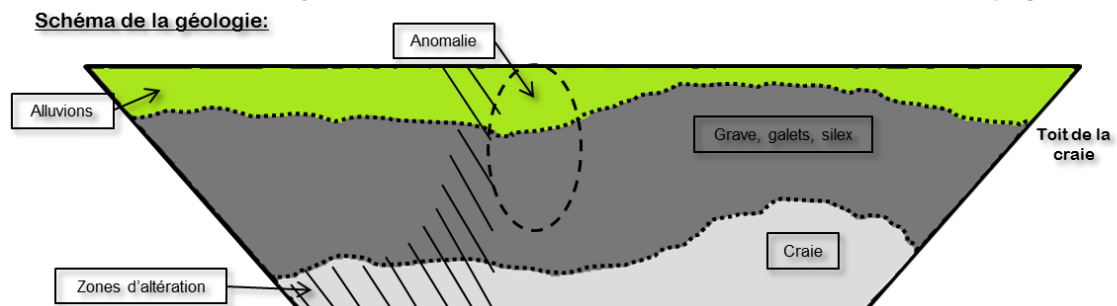
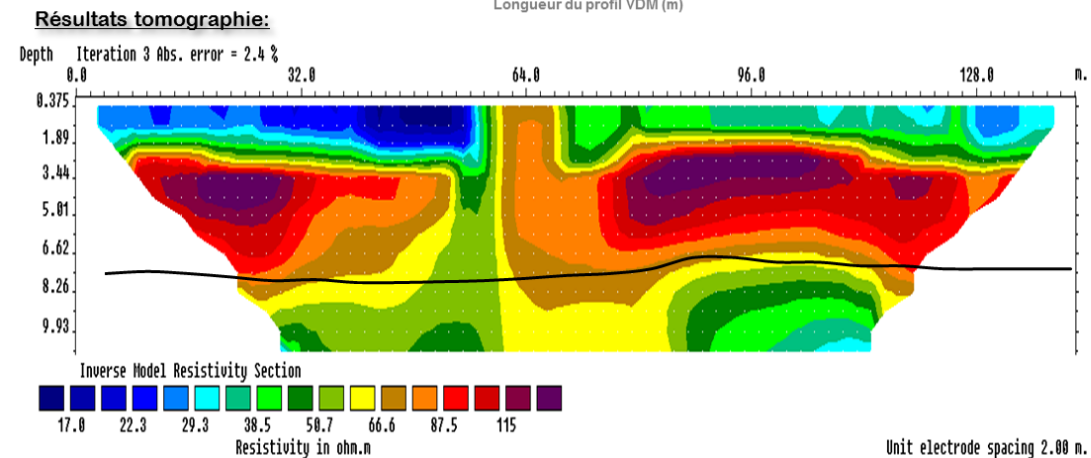
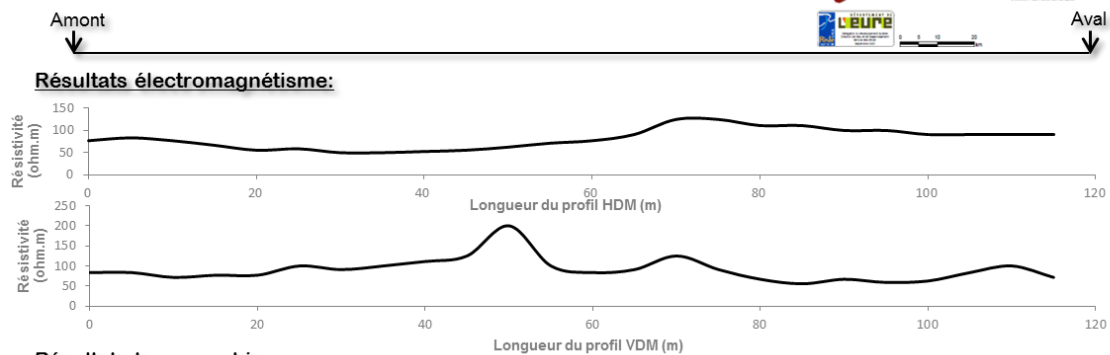
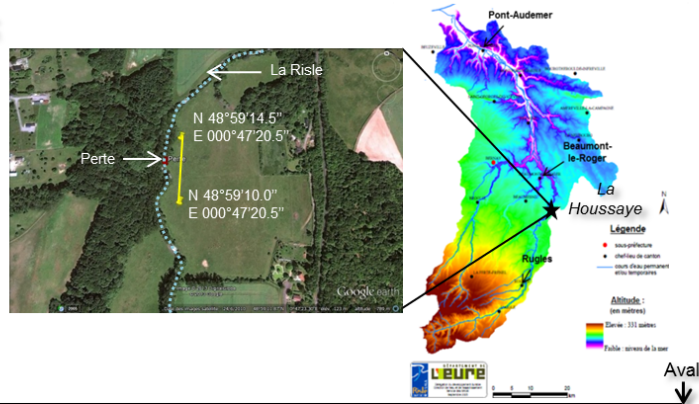


Figure 21: Fiche de présentation des résultats pour le profil longitudinal de la rive droite de la Risle, au niveau de la perte de la Houssaye

a) Les données d'électromagnétisme EM-34

La mesure d'électromagnétisme a été menée sur un profil de 24 points, long de 140 mètres. L'ensemble des valeurs de résistivité observées se situent entre 50 et 200 $\Omega.m$ (entre 50 et 125 $\Omega.m$ pour le dipôle horizontal et entre 55,56 et 200 $\Omega.m$ pour le dipôle vertical). Sur les deux profils, à -7,5 et -15 mètres, la distribution des valeurs de résistivité est très variable (fig. 22).

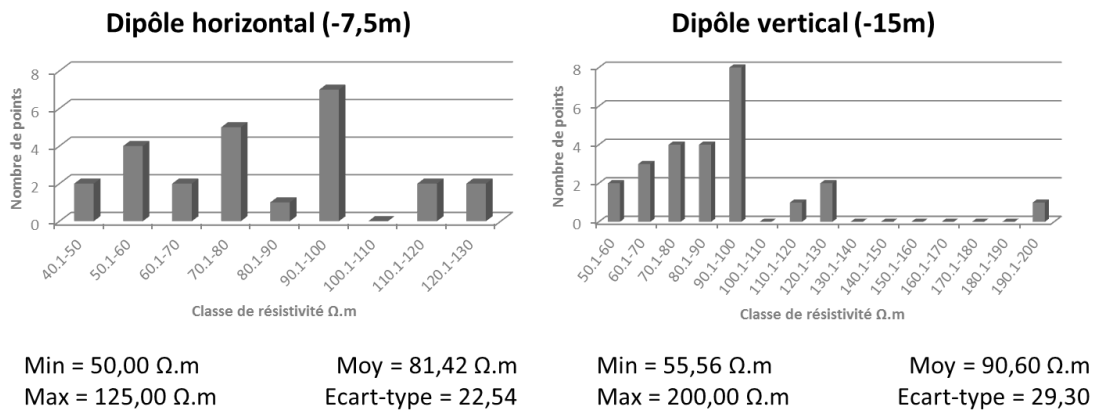


Figure 22: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le profil longitudinal de la rive droite de la Risle, la Houssaye

Sur le profil mesuré à 7,5 mètres de profondeur, la résistivité s'étend principalement entre 40 et 100 $\Omega.m$ (>80%). Les classes de résistivité les plus représentées sont 90-100 $\Omega.m$ (30%) et 70-80 $\Omega.m$ (20%).

Sur le profil mesuré à 15 mètres de profondeur, l'étendue des valeurs de résistivité est plus grande (jusqu'à 200 $\Omega.m$), mais la majorité des valeurs de résistivité sont comprises entre 50 et 100 $\Omega.m$ (>90%). La classe de résistivité la plus représentée est 90-100 $\Omega.m$, elle regroupe plus de 30% de la distribution des valeurs de résistivité.

Outre la mesure à 190-200 $\Omega.m$ observée une fois sur le profil situé plus en profondeur, les deux distributions des valeurs de résistivité sont assez semblables sur les deux profils.

b) Les données de tomographie de résistivité électrique

Le modèle d'inversion a été calculé à partir de 402 points de mesure de résistivité apparente et couvre une profondeur avoisinant 10 mètres. Les valeurs de résistivité s'étendent de 15 à 140 $\Omega.m$, environ. Trois formations horizontales se distinguent sur ce profil par contraste de résistivité. La partie la plus superficielle du modèle, de 0 à -2 mètres présente une résistivité comprise entre 15 et 40 $\Omega.m$.

La partie intermédiaire, de -2 à -8 mètres, présente une résistivité plus élevée comprise entre 50 et 140 $\Omega.m$. La partie située plus en profondeur (-8 à -10 mètres) présente une résistivité comprise entre 30 et 50 $\Omega.m$. Une anomalie est observée au centre du modèle avec la rupture de la partie intermédiaire où la résistivité mesurée est nettement inférieure (environ 30 $\Omega.m$) à celle observée à cette profondeur.

2. Interprétation des résultats

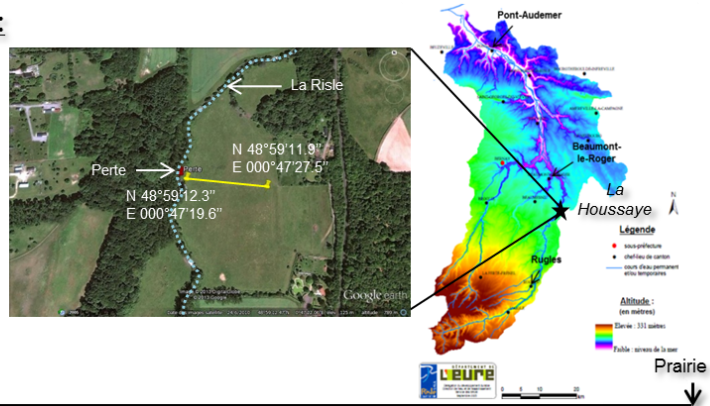
Seul le profil d'électromagnétisme situé à -7,5 mètres pourra être comparé avec les mesures de tomographie qui ne couvrent que les 10 premiers mètres du sous-sol. L'interprétation est synthétisée par le schéma de la géologie présenté sur la fiche de résultats. La formation observée plus en profondeur présente une résistivité moyenne d'environ 50 $\Omega.m$. Cette formation peut être interprétée comme la zone d'altération du toit de la Craie, bien que celui soit estimé à 4 mètres de profondeur sur le log géologique disponible (Annexe IX). Pour la formation de -2 à -8 mètres, les valeurs de résistivité mesurées par tomographie (50 à 140 $\Omega.m$) sont cohérentes avec celles obtenues par électromagnétisme à cette profondeur (40 à 100 $\Omega.m$). La formation observée à cette profondeur, plus résistante, peut être assimilée à une couche de grave de fond composée de galets et de silex. Ceci est cohérent avec la structure géologique proposée par le log géologique, mais aussi avec la position de la zone d'étude. Les mesures au niveau de la Houssaye sont positionnées dans le lit majeur de la Risle, ce qui est en corrélation avec l'hypothèse de trouver des traces de grave de fond soient retrouvées sur le modèle de tomographie. La formation superficielle (0 à -2 mètres) peut être interprétée comme une couche de dépôt de débordement provenant de la Risle. Les valeurs de résistivité observées (70 à 140 $\Omega.m$) sont cohérentes avec celles des alluvions sèches (50 à 90 $\Omega.m$), (Bouguern et Baker, 2007). A priori, l'anomalie observée dans la partie centrale du profil est due à l'altération du sous-sol à cet endroit. Elle pourrait être la conséquence de la présence de la perte, sur la rive opposée.

Profil transversal de la rive droite

1. Présentation des résultats

La Houssaye, rive droite:

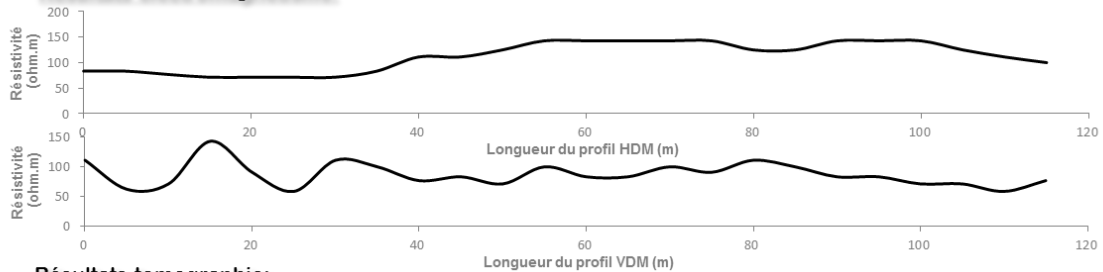
- Profil transversal par rapport à la Risle, positionné au niveau de la perte, orienté Ouest/Est
- Tomographie:
 - Dispositif Wenner
 - Espacement: 2m
 - 3 itérations
 - Erreur Abs. 2.5%
- Electromagnétisme:
 - Espacement: 10m
 - Mesure tous les 5m



Rivière

Prairie

Résultats électromagnétisme:



Résultats tomographie:

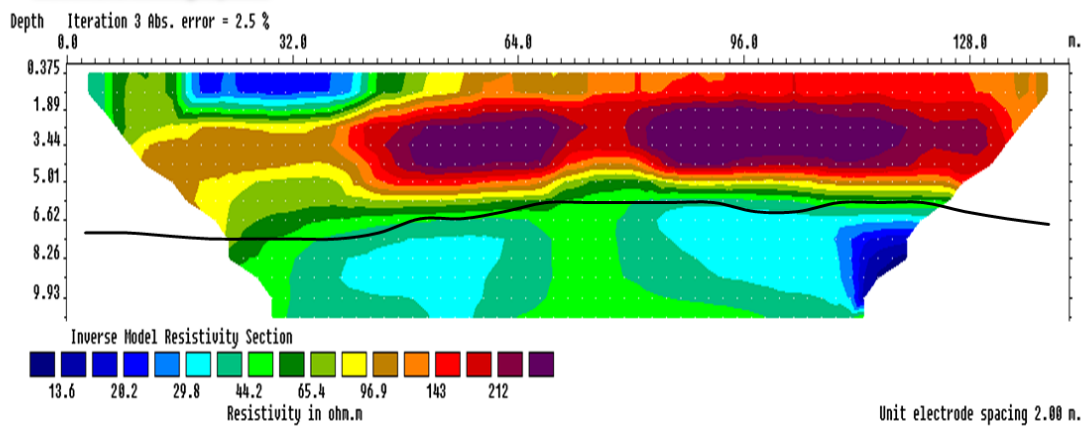


Schéma de la géologie:

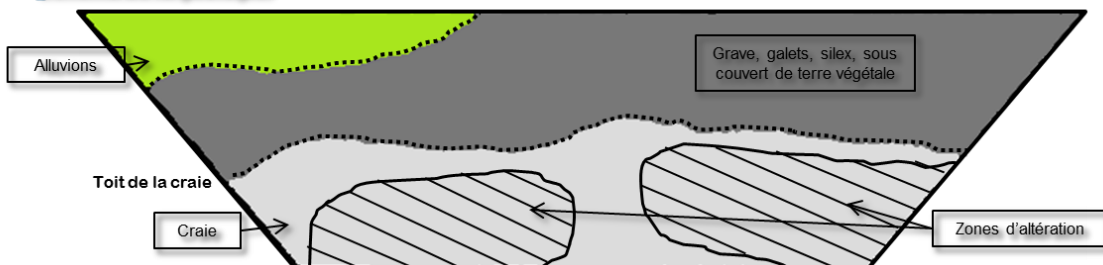


Figure 23: Fiche de présentation des résultats pour profil transversal de la rive de la Risle, à la Houssaye

a) Les données d'électromagnétisme EM-34

La mesure d'électromagnétisme a été menée sur un profil de 24 points, long de 140 mètres. L'ensemble des valeurs de résistivité observées se situent entre 59 et 143 $\Omega.m$ (entre 71 et 143 $\Omega.m$ pour le dipôle horizontal et entre 59 et 143 $\Omega.m$ pour le dipôle vertical). Sur les deux profils, à -7,5 et -15 mètres, la distribution des valeurs de résistivité est très variable (fig. 24).

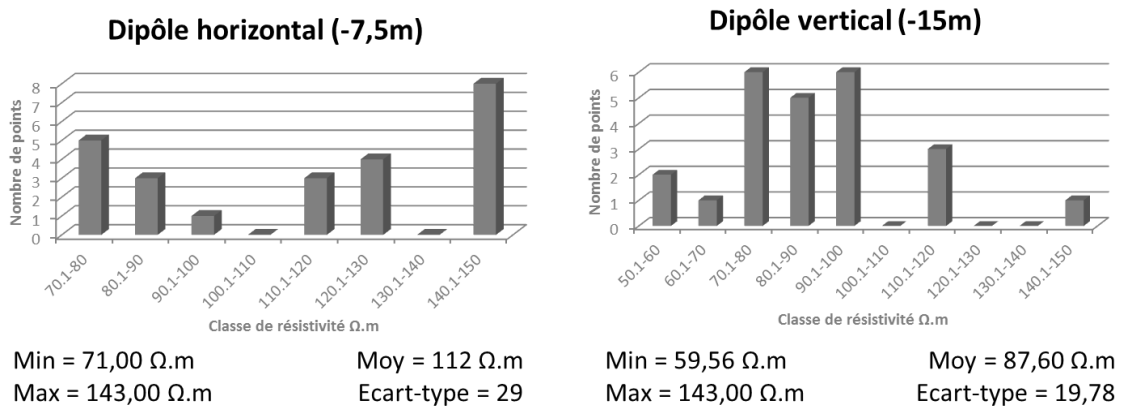


Figure 24: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le profil transversal de la rive droite de la Risle, la Houssaye

Sur le profil mesuré à -7,5 m de profondeur, la classe de résistivité la plus représentée est celle 140-150 $\Omega.m$ (33%). Sur ce profil, d'après l'étude de la distribution des valeurs de résistivité, trois classes de résistivité apparaissent : 70-90 $\Omega.m$ (34%), 110-130 $\Omega.m$ (30%) et 140-150 $\Omega.m$ (33%).

Sur le profil mesuré à 15 mètres de profondeur, les mesures de résistivité atteignent des valeurs un peu plus faibles (< 60 $\Omega.m$), mais la majorité des valeurs de résistivité sont comprises entre 70 et 100 $\Omega.m$ (75%).

b) Les données de tomographie de résistivité électrique

Le modèle d'inversion a été calculé à partir de 402 points de mesure de résistivité apparente (profil de 142 mètres) et couvre une profondeur avoisinant 10 mètres. Les valeurs de résistivité s'étendent de 10 à 220 $\Omega.m$, environ. Trois formations horizontales se distinguent sur ce profil par contraste de résistivité. La partie la plus superficielle du modèle, de 0 à -3,50 mètres présente une résistivité comprise entre 20 et 40 $\Omega.m$. Cette formation n'est visible que sur une cinquantaine de mètres de long en partant de la rivière.

La partie intermédiaire, de 0/-3,50 à -6 mètres, présente une résistivité plus élevée comprise entre 80 et 220 $\Omega.m$. La partie située plus en profondeur (-6 à -10 mètres) présente une résistivité comprise entre 10 et 50 $\Omega.m$.

2. Interprétation des résultats

Comme précédemment, seul le profil d'électromagnétisme situé à -7,5 mètres pourra être comparé avec les mesures de tomographie puisque la profondeur d'investigation ne couvrent que les 10 premiers mètres du sous-sol. L'interprétation est synthétisée par le schéma de la géologie présenté sur la fiche de résultats. Les trois formations observées sur le profil longitudinal sont retrouvées au niveau du profil transversal bien qu'il existe une légère variation de profondeur concernant l'apparition des changements dans la lithologie (contrastes de résistivité), (tableau 2).

	Profil longitudinal	Profil transversal
Formation superficielle	15 à 40 $\Omega.m$	20 à 40 $\Omega.m$
Formation intermédiaire	50 à 140 $\Omega.m$	80 à 220 $\Omega.m$
Formation profonde	30 à 50 $\Omega.m$	10 à 50 $\Omega.m$

Tableau 2: Tableau de comparaison des valeurs de résistivité pour les différentes formations du sous-sol entre le profil longitudinal et le profil transversal de la rive droite de la Risle

La comparaison entre les données d'électromagnétisme à 7,5 mètres de profondeur (59 à 143 $\Omega.m$) et celle de tomographie de résistivité électrique pour la même profondeur (10 à 50 $\Omega.m$) montre qu'il n'y a pas de cohérence entre les valeurs de résistivité. La forte propriété résistante de la couche supérieure, située à proximité du profil (limite lithologique à -6 mètres) a peut-être influencé la mesure d'électromagnétisme. La formation la plus superficielle n'est pas continue sur la longueur du profil. Elle ne couvre que les cinquantes premiers mètres. Ceci est cohérent avec l'hypothèse que cette couche soit composée de dépôts de débordement de la Risle. Dans cette hypothèse, le changement de lithologie marque la fin de la zone d'expansion de crue de la Risle à cet endroit.

Profil longitudinal de la rive gauche

1. Présentation des résultats

La Houssaye, rive gauche:

- Profil longitudinal par rapport à la Risle, positionné au niveau de la perte, orienté Nord-Est/Sud-Ouest

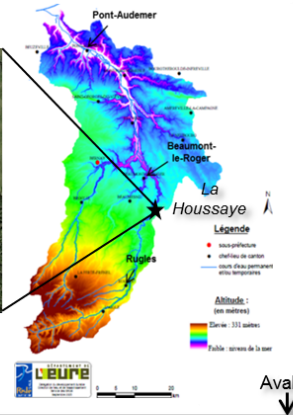
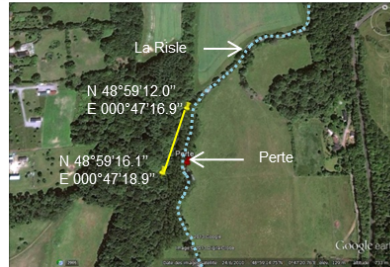
- Tomographie:

- Dispositif Wenner
- Espacement: 2m
- 3 itérations
- Erreur Abs. 1.5%

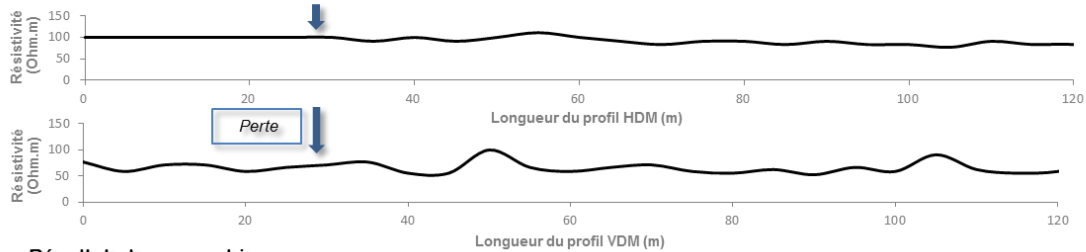
- Electromagnétisme:

- Espacement: 10m
- Mesure tout les 5m

Amont



Résultats électromagnétisme:



Résultats tomographie:

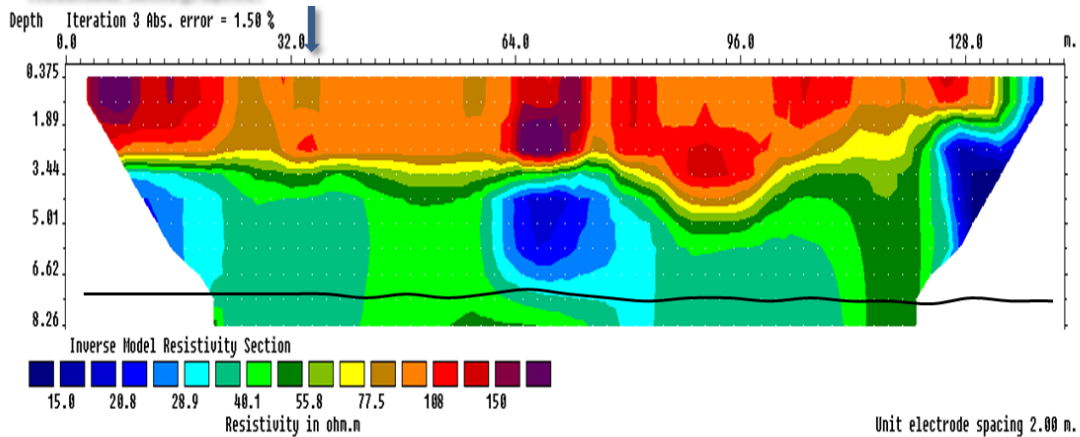


Schéma de la géologie:

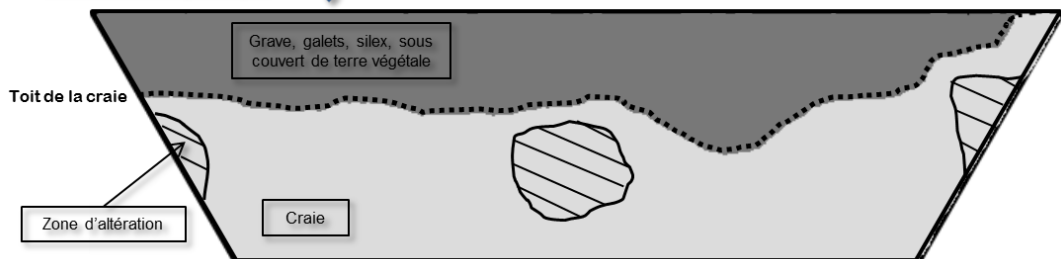


Figure 25: Fiche de résultats pour le profil longitudinal de la rive gauche de la Risle, la Houssaye

a) Les données d'électromagnétisme EM-34

La mesure d'électromagnétisme a été menée sur un profil de 28 points, long de 145 mètres. L'ensemble des valeurs de résistivité observées se situent entre 47,62 et 111,11 $\Omega.m$ (entre 47,62 et 111,11 $\Omega.m$ pour le dipôle horizontal et entre 53 et 111,11 $\Omega.m$ pour le dipôle vertical). Sur les deux profils, mesurés à 7,5 et 15 mètres de profondeur, la distribution des valeurs de résistivité est très variable bien que l'étendue des valeurs prises par les mesures de résistivité soit similaire (fig. 26).

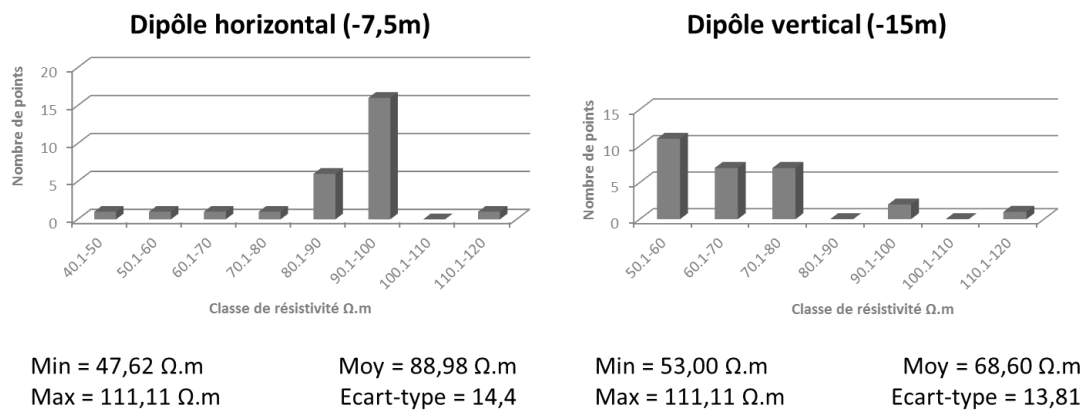


Figure 26: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le profil longitudinal de la rive gauche, la Houssaye

Sur le profil mesuré à -7,5 m de profondeur, la classe de résistivité la plus représentée est celle 90-100 $\Omega.m$ (60%). La répartition des valeurs de résistivité est très hétérogène sur ce profil puisque les deux classes 80-90 et 90-100 $\Omega.m$ représentent plus de 80 % de l'ensemble des mesures.

Sur le profil mesuré à 15 mètres de profondeur, les trois premières classes de résistivité (50-60 $\Omega.m$, 60-70 $\Omega.m$ et 70-80 $\Omega.m$) regroupent plus de 90% des valeurs de résistivité mesurées. Le reste des valeurs observées sont réparties entre deux classes : 90-100 $\Omega.m$ (7%) et 110-120 $\Omega.m$ (3%).

b) Les données de tomographie de résistivité électrique

Le modèle d'inversion a été calculé à partir de 420 points de mesure de résistivité apparente (profil de 142 mètres) et couvre une profondeur avoisinant 8 mètres. Les valeurs de résistivité s'étendent de 10 à 165 $\Omega.m$, environ. Le modèle montre un contraste de résistivité, à environ 2-2,5 mètres de profondeur, avec des valeurs de résistivité qui passent de 75-165 $\Omega.m$ à 10-75 $\Omega.m$.

Sur la partie inférieure du modèle située entre -2,5 et -8 mètres, trois zones se distinguent par leurs valeurs de résistivité nettement inférieure au reste du milieu.

2. Interprétation des résultats

Seul le profil d'électromagnétisme situé à -7,5 mètres pourra être comparé avec les mesures de tomographie qui ne couvrent que les 8 premiers mètres du sous-sol. L'interprétation est synthétisée par le schéma de la géologie présenté sur la fiche de résultats. Le contraste de résistivité observé sur le modèle de tomographie marque un changement dans la lithologie à cet endroit. Cette hypothèse est en corrélation avec le log géologique disponible pour le secteur de la Houssaye, qui estime le mur de la craie à 4 mètres de profondeur. La formation de 0 à -2,5 mètres présente des valeurs de résistivité élevée (75-165 $\Omega.m$). Ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues au niveau de la formation intermédiaire observée sur la rive droite. Cette formation peut être assimilée comme la continuité de la couche de grave de fond observée sur l'autre rive. La formation observée plus profondément peut être identifiée comme de la craie. Les valeurs de résistivité qui y sont mesurées par tomographie de résistivité électrique (de 10 à 75 $\Omega.m$) sont cohérentes avec celles mesurées par électromagnétisme (principalement 70-80 $\Omega.m$) pour cette profondeur. Les valeurs de résistivité mesurée restent proches de celles obtenues pour la même lithologie sur la rive opposée. Les zones présentant des valeurs de résistivité particulièrement faibles peuvent être assimilées à des zones de très fortes altérations de la matrice crayeuse. Ces zones à forme circulaire pourraient laisser penser à la présence de conduits.

III. La résurgence au niveau de Grosley-sur-Risle

1. Présentation des résultats

Pisciculture de Grosley-sur-Risle:

- Profil longitudinal par rapport à la Risle, orienté Nord/Sud
- Tomographie:
 - Dispositif Wenner
 - Espacement: 5m
 - 3 itérations
 - Erreur Abs. 1.59%
- Electromagnétisme:
 - Espacement: 10m
 - Mesure tous les 5m

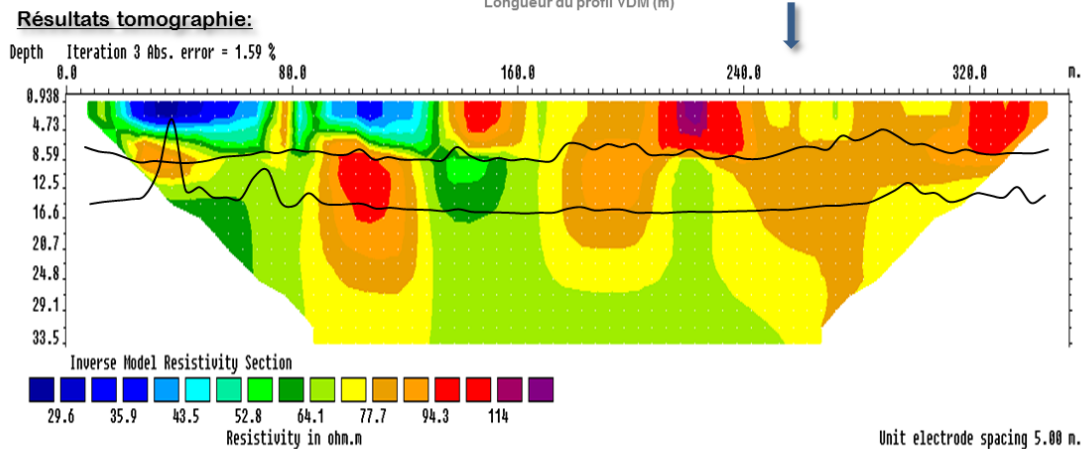
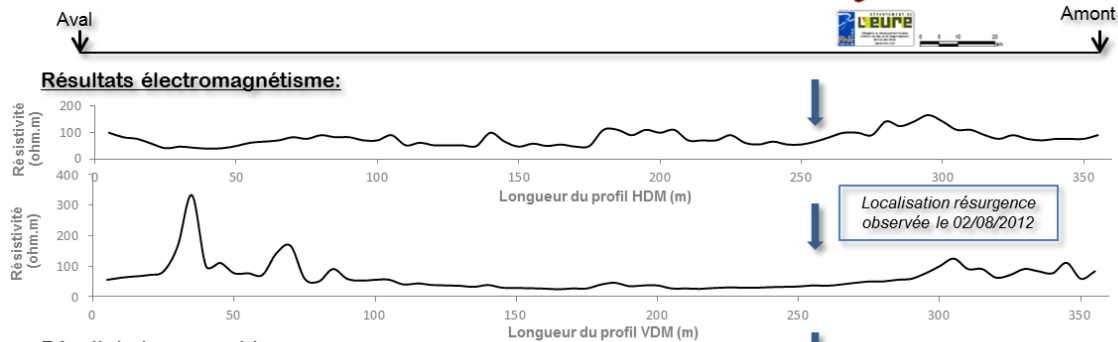
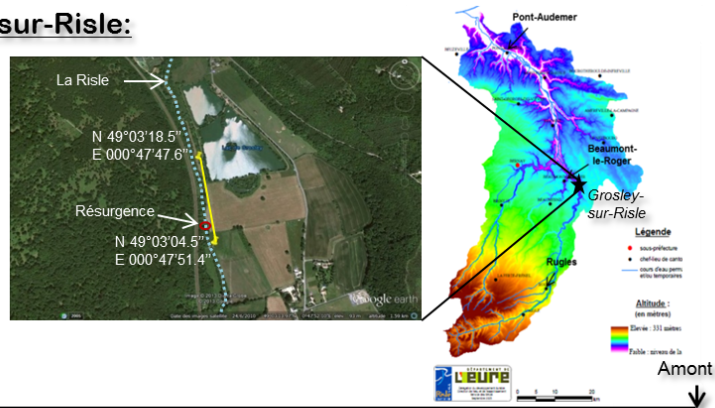


Schéma de la géologie:

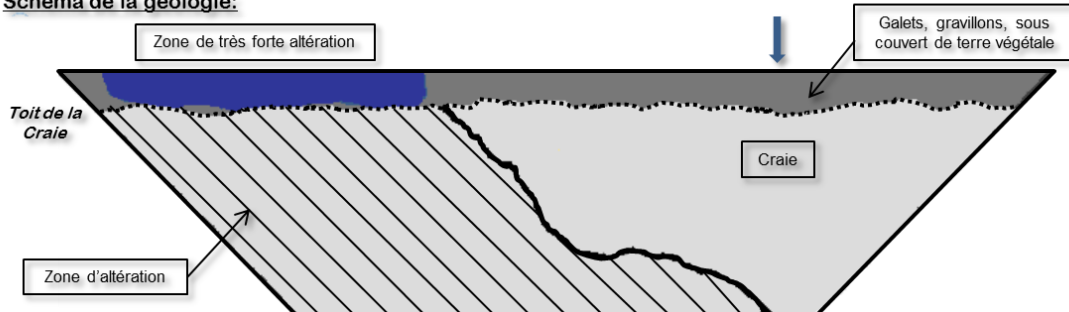


Figure 27: Fiche de présentation des résultats pour le site de Grosley-sur-Risle

a) Les données d'électromagnétisme EM-34

La mesure d'électromagnétisme a été menée sur un profil de 72 points, long de 355 mètres. L'ensemble des valeurs de résistivité observées se situent entre 24,39 et 333,33 $\Omega.m$ (entre 40,00 et 166,67 $\Omega.m$ pour le dipôle horizontal et entre 24,39 et 333,33 $\Omega.m$ pour le dipôle vertical). Sur les deux profils, mesurés à 7,5 et 15 mètres de profondeur, la répartition des valeurs de résistivité est très variable (fig. 28).

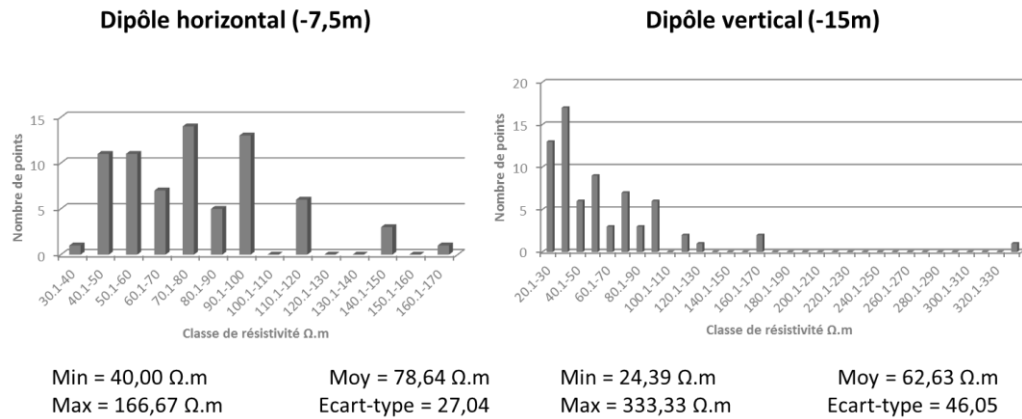


Figure 28: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le site de Grosley-sur-Risle

Sur le profil mesuré à -7,5 m de profondeur, les valeurs de résistivité sont principalement comprise entre 40 et 100 $\Omega.m$ (85 %), la classe de résistivité la plus représentée étant 70-80 $\Omega.m$ (20%).

Sur le profil mesuré à 15 mètres de profondeur, l'étendue des valeurs de résistivité mesurées est plus importante. Néanmoins, la distribution des valeurs de résistivité est principalement comprise entre 20 et 100 $\Omega.m$ (>90%). De plus, sur la gamme de valeurs de résistivité 170-340 $\Omega.m$, seule une mesure est observée à 333,33 $\Omega.m$.

b) Les données de tomographie de résistivité électrique

Le modèle d'inversion a été calculé à partir de 620 points de mesure de résistivité apparente (profil de 355 mètres) et couvre une profondeur avoisinant 35 mètres. Les valeurs de résistivité s'étendent de 25 à 130 $\Omega.m$, environ. Un contraste de résistivité est observé au niveau de 9 mètres de profondeur. Globalement, la section située en superficie présente une résistivité plutôt élevée avec des valeurs comprises entre 60 et 130 $\Omega.m$ par rapport au reste du profil. Les 130 premiers mètres de cette section contrastent du reste de la section avec des valeurs de résistivité comprises entre 25 et 50 $\Omega.m$.

La section située plus en profondeur (de -9 à -35 mètres) présente une gamme de valeurs de résistivité comprise entre 60 et 90 $\Omega.m$. Les valeurs de résistivité de cette section suivent un gradient positif d'aval en amont.

2. Interprétation des résultats

Le contraste de résistivité observé sur le modèle de tomographie témoigne (-9 mètres) d'un changement dans la lithologie à cet endroit. L'interprétation est synthétisée par le schéma de la géologie présenté sur la fiche de résultats. D'après le log géologique situé à Beaumont le Roger, le plus proche du lieu de mesure (Annexe X), le mur de la craie est estimé à 5,50 mètres de profondeur. La variation de profondeur observée peut s'expliquer par la distance entre les deux points de mesure. Le site étant dans le lit majeur de la Risle, la formation de 0 à -9 mètres peut être assimilée à des graviers et gravillons provenant de la grave de fond. Au début du profil, la zone présentant de très faibles valeurs de résistivité est située entre le lit de la rivière et les étangs de pêche de Grosley-sur-Risle, visibles sur la photo aérienne du site présentée dans la fiche de résultats. Les valeurs de résistivité observées peuvent indiquer la présence de connexions entre la nappe et les étangs. La section située plus en profondeur présente un gradient oblique de résistivité positif qui augmente d'aval en amont. Les valeurs de résistivité les plus élevées peuvent être assimilées à de la craie tandis que les valeurs de résistivité les plus faibles peuvent être interprétées comme une zone d'altération de la matrice crayeuse. A la surface, la position de ce gradient est légèrement en aval de la position de la résurgence observée l'été 2012 lors de la période d'assec. Cette zone d'altération pourrait témoigner de la remontée de la nappe à cet endroit. Sur le tronçon prospecté, les mesures d'électromagnétisme et de tomographie de résistivité électrique sont cohérentes. Néanmoins, une anomalie résistante (333,33 $\Omega.m$) apparaît sur le profil d'électromagnétisme située à 15 mètres de profondeur. N'ayant pas de mesures de tomographie à ce niveau (le profil se rétrécissant avec la profondeur), il est difficile d'en interpréter la cause.

IV. Synthèse sur les mesures

Globalement, les mesures réalisées sur les différents sites montrent que la géologie le long du tronçon perché de la Risle est plutôt homogène avec une couche crayeuse jusqu'à environ 5/10 mètres de profondeur.

Elle est souvent recouverte de grave de fond, lorsque les transects se situent dans le lit majeur de la Risle, ou bien de formations superficielles.

Au niveau du site d'Ajou, la craie apparaît particulièrement altérée, ce qui est en corrélation avec la présence d'une cavité sur le log géologique.

Au niveau de la perte de la Houssaye, il existe des variations dans la géométrie du sous-sol entre la rive gauche et la rive droite. Tout d'abord, la rive gauche ne présente pas de trace de dépôts de débordement de la Risle, ce qui semblerait indiquer qu'elle est surélevée par rapport à la rive opposée. De plus, le toit de la craie est légèrement plus bas au niveau de la rive droite (fig. 29). Enfin, le niveau d'altération de la craie est plus important au niveau de la rive gauche (valeurs de résistivité plus faibles) ce qui pourrait expliquer que la bétroie ouverte l'été 2012 se soit ouverte le long de cette rive.

Au niveau de la résurgence à Grosley-sur-Risle, la remontée de la nappe pourrait être caractérisée par le gradient oblique de résistivité observé.

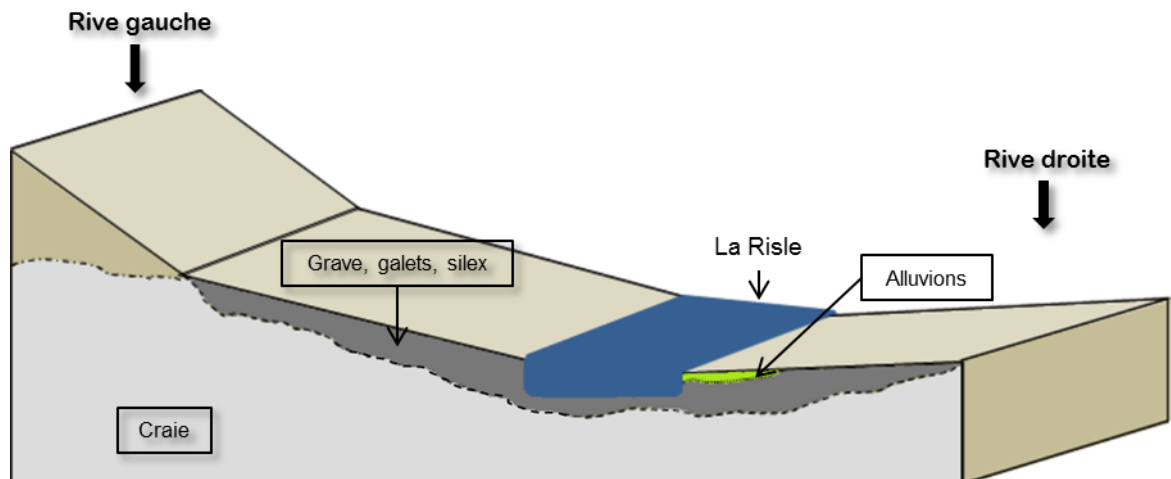


Figure 29: Schéma de la situation au niveau du site de la Houssaye

CONCLUSION

Les manifestations du caractère karstique du sous-sol du bassin versant de la Risle (baisse de débit, assèchement) sont connues depuis le XIX^{ème} siècle. Ces phénomènes hydrogéologiques se développent sur le secteur perché de la Risle, situé entre Rugles et Beaumont le Roger. La connaissance du karst est apparue nécessaire suite à l'ouverture d'une bétoire de taille exceptionnelle l'été 2012, d'autant plus qu'il est certain que la Risle connaîtra de nouveaux épisodes karstique.

Des investigations hydrogéologiques ont déjà été menées sur le bassin versant de la Risle. Elles ont montré de fortes interactions surface/souterrain via un réseau karstique. A travers ce stage, la prospection géophysique menée sur le secteur perché de la Risle permet d'approfondir les connaissances concernant la structure interne du réseau karstique. Jusqu'à maintenant, les sites ont été étudiés au moyen de technique faisant appel aux principes d'électricité et d'électromagnétisme : la tomographie de résistivité électrique et l'électromagnétisme EM-34.

Les résultats des prospections menées montrent que la géologie du sous-sol entre Rugles et Beaumont le Roger est relativement homogène. Sur le secteur étudié, le toit de la craie se situe entre -4 et -8 mètres. La couche de craie présente une altération plus ou moins importante. L'altération est la plus forte au niveau du site d'Ajou et de la rive gauche de la Risle à la Houssaye, où des phénomènes karstiques ont déjà été observés. Au niveau de la résurgence, la présence d'un gradient de résistivité pourrait être assimilée à la remontée de la nappe jusqu'à la surface.

Ce mémoire ne couvre que la première moitié de ce stage. De nouvelles prospections devraient permettre d'étudier les sites des Petits Bottereaux (décrochement de la nappe) et du Val Gallerand. Il serait aussi intéressant de réaliser de nouvelles prospections, notamment au moyen de potentiel spontané, sur les sites présentés dans ce rapport afin de préciser les hypothèses élaborées ici.

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Stratégie globale de l'étude.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 2: Carte de localisation du bassin versant de la Risle (Slimali, 2009 ; SDAGE Risle, 2005)</i>	<i>13</i>
<i>Figure 3: Topographie et réseaux de cours d'eau et talwegs</i>	<i>14</i>
<i>Figure 4: Profil hydrologique sur graphe bilogarithmique de la Risle avant sa jonction avec la Charentonne d'après les données de la DIREN.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5: Positionnement du bassin versant de la Risle sur le Synclinal du bassin de Paris</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6: Coupe schématique modifiée du cours moyen de la Risle (SDAGE Risle, 2005)</i>	<i>17</i>
<i>Figure 7: (a) Carte de la localisation des bassins versants du département de l'Eure (Valdes, 2005); (b) carte des bassins versants souterrains de la Haute-Normandie (Mesquita, 2009).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 8: Profil de la nappe de la craie le long de la Risle amont avant la jonction avec la Charentonne (Dupont et al., 2006).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 9: Principe de la prospection électrique.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 10: Présentation des principaux dispositifs utilisés en tomographie</i>	<i>22</i>
<i>Figure 11: Principe de l'interprétation des données de ERT.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 12: Principe de construction d'une pseudo-section (dans Jardani, 2007, d'après Barker, 1979).....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 13: Présentation des résultats obtenus avec la tomographie de résistivité électrique</i>	<i>24</i>
<i>Figure 14: Principe général de la prospection électromagnétique en champ proche (Bievre, 2007)</i>	<i>25</i>
<i>Figure 15: Dispositifs EM 34 et profondeur d'investigation (d'après Jardani, 2007).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 16: Exemple de représentation des données d'électromagnétisme EM-34</i>	<i>27</i>
<i>Figure 17: Carte de localisation des sites.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 18: Schéma de la localisation des différents profils: (a) Profils théoriques, (b) Profils à Ajou, (c) Profils à la Houssaye, (d) Profil de Grosley-sur-Risle</i>	<i>30</i>
<i>Figure 19: Fiche de présentation des résultats pour le site d'Ajou.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 20: Distribution des valeurs de résistivité par classes, pour le site d'Ajou.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 21: Fiche de présentation des résultats pour le profil longitudinal de la rive droite de la Risle, au niveau de la perte de la Houssaye.....</i>	<i>36</i>

<i>Figure 22: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le profil longitudinal de la rive droite de la Risle, la Houssaye</i>	<i>37</i>
<i>Figure 23: Fiche de présentation des résultats pour profil transversal de la rive de la Risle, à la Houssaye</i>	<i>39</i>
<i>Figure 24: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le profil transversal de la rive droite de la Risle, la Houssaye</i>	<i>40</i>
<i>Figure 25: Fiche de résultats pour le profil longitudinal de la rive gauche de la Risle, la Houssaye.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 26: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le profil longitudinal de la rive gauche, la Houssaye.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 27: Fiche de présentation des résultats pour le site de Grosley-sur-Risle</i>	<i>45</i>
<i>Figure 28: Distribution des valeurs de résistivité par classes pour le site de Grosley-sur-Risle</i>	<i>46</i>
<i>Figure 29: Schéma de la situation au niveau du site de la Houssaye.....</i>	<i>48</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Profondeurs d'investigation indicatives (Bievre, 2007).....	26
Tableau 2: Tableau de comparaison des valeurs de résistivité pour les différentes formations du sous-sol entre le profil longitudinal et le profil transversal de la rive droite de la Risle.....	41

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- AHMED S., CARPENTER P.J.** 2002 - Geophysical response of filled sinkholes, soil pipes and associated bedrock fractures in thinly mantled karst, east-central Illinois - *Environmental Geology*. Vol. 44. 705-716.
- BAKER R.** 1979 - Signal contribution section and their use in resistivity studies - *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. Vol. 59. 123-129.
- BAILLY-COMTE V.** 2008 - Interactions hydrodynamiques surface/souterrain en milieu karstique, Approche descriptive, analyse fonctionnelle et modélisation hydrologique appliquées au bassin versant expérimental du *Coulazou, Causse d'Aumelas*, France - *Thèse, Université de Montpellier*. 228p.
- BERNARD J., LEITE O., VERMEERSCH F.** 2006 - Multi-electrode resistivity for environmental and mining applications - *www.iris-instrument.com*
- BIEVRE G.** 2007 - Méthodes géophysiques pour la reconnaissance des digues des voies navigables - Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales. *Notice GF 07-01*. 83p.
- BONACCI O.** 2006 - Complementarities of karst hydrology and hydrogeology - *Proc. 8th Conference on limestone Hydrology*, Neuchâtel.
- BORNE V.** 1990 - La méthode électromagnétique EM 34-3 pour la prospection de sub-surface - *Bulletin of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY*. Paris. n°42. 11-20.
- BRGM.** 2012 - Perte totale de la Risle en été 2012. Bétoire formée à La Houssaye (27). Expertise BRGM réalisée dans le cadre de sa mission d'appui à la Police de l'Eau - Bureau de Recherches Géologiques et Minières. *Communication orale du 13 décembre 2012*.
- CARRIERE S.D., CHALIKAKIS K., SENECHAL G., DANQUIGNY C., EMBLANCH C.** 2013 - Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone - *Journal of Applied Geophysics*. In press. 22p.
- CALANDRE P., JACONO D.** 2006 - Protection et gestion des rivières du secteur Seine-Aval - *Guide Eau Seine Normandie*. 142 p.
- CETE (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Normandie Centre)**, 2009 - Slingram, Méthodes électromagnétiques basses fréquences - *Maquette 010 - LRR - 09*.
- CHALIKAKIS K., PLAGNES V., GUERIN R., VALOIS R., BOSH F.P.** 2011 - Contribution of geophysical methods to karst-system exploration : an overview - *Hydrogeology Journal*. Vol. 19. 1169-1180.
- CHAPALAIN B.** 2005 - Estimation, validation, et représentation de données hydrologiques de synthèse sur la Haute-Normandie - *Rapport de Master 2, Université de Rouen*, 55 p.
- DAHLIN T., ZHOU B.** 2004 - A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays - *Geophysical Prospecting*. Vol. 52. 379-398.

- DAVID P.Y., DE BECHILLON M.** 2010 - Inventaire régional Haute-Normandie des bétouilles, itinéraires souterrains des eaux (traçages) et des exutoires - *Rapport final Année 2. BRGM/RP-58189-FR*. 64p.
- DE LA QUERIERE P., MATHIEU F.** 1993 - Reconnaissance des milieux karstiques et poreux en pays crayeux pour l'implantation des forages d'alimentation en eau potable - *Rapport BRGM R37653*. 53p.
- DUPONT J.P., FOURNIER M., MASSEI N., VALDES D., DUPUIS E., SLIMALI S., LAIGNEL B.** 2006 - Contribution de l'aquifère de la craie au débit de la Seine aval : suivi et interprétation des données hydrologiques acquises sur le site témoin de Norville - *Rapport d'activité du GIP Seine Aval*. 23p.
- FOURNIER M.** 2006 - Identification des modalités de transport et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données au système du Hannebot (Seine-Maritime, France) - *Thèse, Université de Rouen*. 228p.
- FOURNIER M.** 2012 - Engouffrement de la Risle - *Note de synthèse : traçage*. 2p.
- GILLI E., MANGAN C., MUDRY J.** 2005 - Hydrologie, objets, méthodes, applications - *Dunod. Herstal*. 303p.
- GUERIN R., BALTASSAT J.M., BOUCHER M., CHALIKAKIS K., GALIBERT P.Y., GIRARD J.F., PLAGNES V., VALOIS R.** 2009 - Geophysical characterisation of karstic network – Application to the Ouyse system (Poumeysen, France) - *Comptes Rendus Geosciences*. Vol. 341. 810-817.
- HOAREAU J., LAPEGUE J., LIVOVSCHI I.** 2010 - Utilisation du Syscal dans le cadre de mission de prospection géophysique - *Rapport technique de la Direction Scientifique et Technique ACF-France (Action Contre la Faim)*. 76 p.
- JANNOT A.** 2010 - Fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Risle : analyse des régimes et modélisation - *Mémoire de stage Master 2 DYGEC « Dynamique des hydrosystèmes et Géosystèmes dans les Environnements Continentaux, Université de Rouen*, 39 p.
- JARDANI A.** 2007 - Nouvelles approches géophysiques pour l'identification des dolines et des cavités souterraines dans un contexte karstiques - *Thèse, Université de Rouen*. 203p.
- JOIN J.L., LAURENCIN X., SAVIN C., PARISOT J.C., BEAUVAIS A., GERAUD Y.** 2007 - Résolution spatio-temporelle des mesures de Tomographie de Résistivité Electrique sur un profil latéritique. Application à la prospection minière des massifs de Nouvelle Calédonie - 6^{ème} colloque GEOFCAN du 25-26/09/2007, Bondy France. 71-74.
- LAIGNEL B.** 1997 - Les altérites à silex de l'Ouest du Bassin de Paris : caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats - *Thèse de doctorat, Université de Rouen*, Edit. BRGM, Orléans, 264, 219p.
- LEKMINE G.** 2011 - Quantification des paramètres de transport des solutés en milieux poreux par tomographie de résistivité électrique : Développements méthodologiques et expérimentaux - *Thèse, Université de Paris Sud XI*. 150 p.
- LOKE M.H.** 2004 - Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys - www.geoelectrical.com
- McNEIL J.D.** 1980 - Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number - *Technical note TN.6. Geonics Ltd, Toronto*. 15p.

MARESCOT L. 2003 - Un algorithme d'inversion par moindres carrés pondérés : application aux données géophysiques par méthodes électromagnétiques en domaine fréquence - *Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles*. Vol. 88. 277-300.

MESQUITA J. 2009 - Facteurs de contrôle climatique et géomorphologique de la variabilité hydrologique de bassins versants en substrat carbonaté. Comparaison Haute-Normandie (FR) et Région d'Austin, Texas (USA) - *Thèse de doctorat, Université de Rouen*, 300 p.

PROSCOT, SCOT (Schéma de COhérence Territoriale) Risle et Charentonne, Partie 1, Février 2007.

Res2Dinv, Geotomo Software, 2010-2011.

ROBERT T., DASSARGUES A., BROUYERE S., KAUFMANN O., HALLET V., NGUYEN F. 2011 - Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods for a water well drilling program in fractured/karstified limestones - *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 75. 42-53.

SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) de la Risle, Etat des lieux I « Caractéristiques générales du bassin versant », décembre 2007.

SLIMALI S. 2009 - Les fonctionnements hydrologiques de l'aquifère karstifié de la Craie de Haute-Normandie : conséquences des contextes morphologiques et structuraux - *Thèse de doctorat, Université de Rouen*, 286 p.

VALDES D. 2005 - Variabilité spatiale du fonctionnement hydrologique de l'aquifère karstique de la craie (département de l'Eure, France) - *Thèse de doctorat, Université de Rouen*, 258 p.

WUBDA M. 2003 - Reconnaissance Géophysique du bassin versant d'Ara (Djougou, Nord Bénin) - *Mémoire de DESS, Université de Paris, Pierre et Marie CURIE*. 66p.

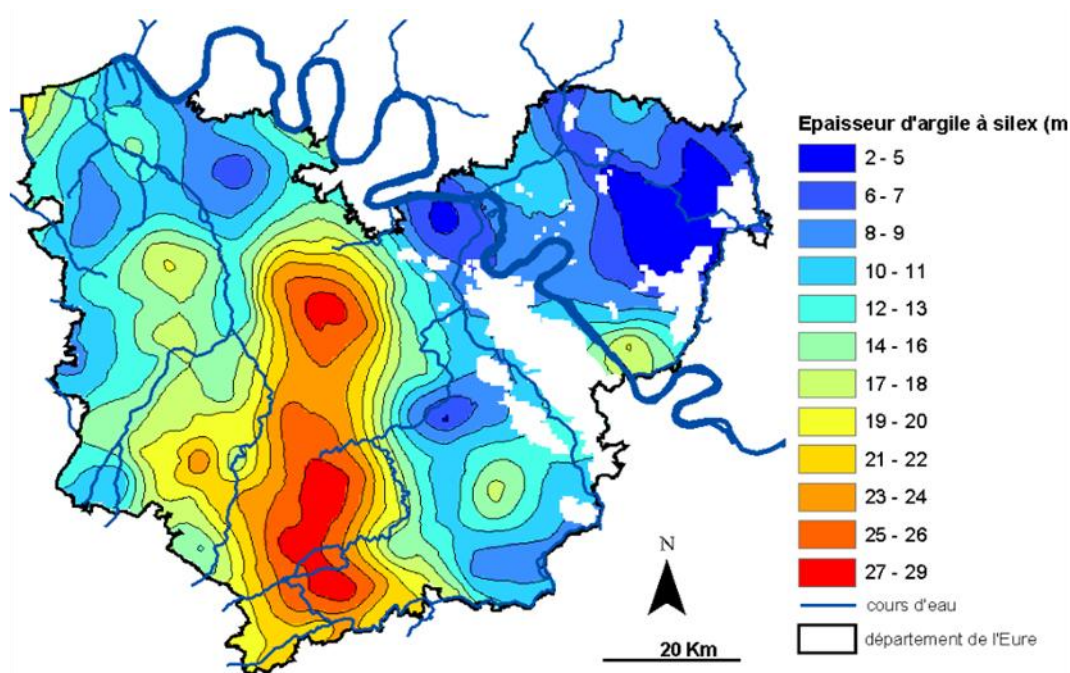
ZHU J., CURRENS J.C., DINGER J.S. 2011 - Challenges of using electrical resistivity method to locate karst conduits – A field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky - *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 75. 523-530.

www.arehndoc.blogspot.fr

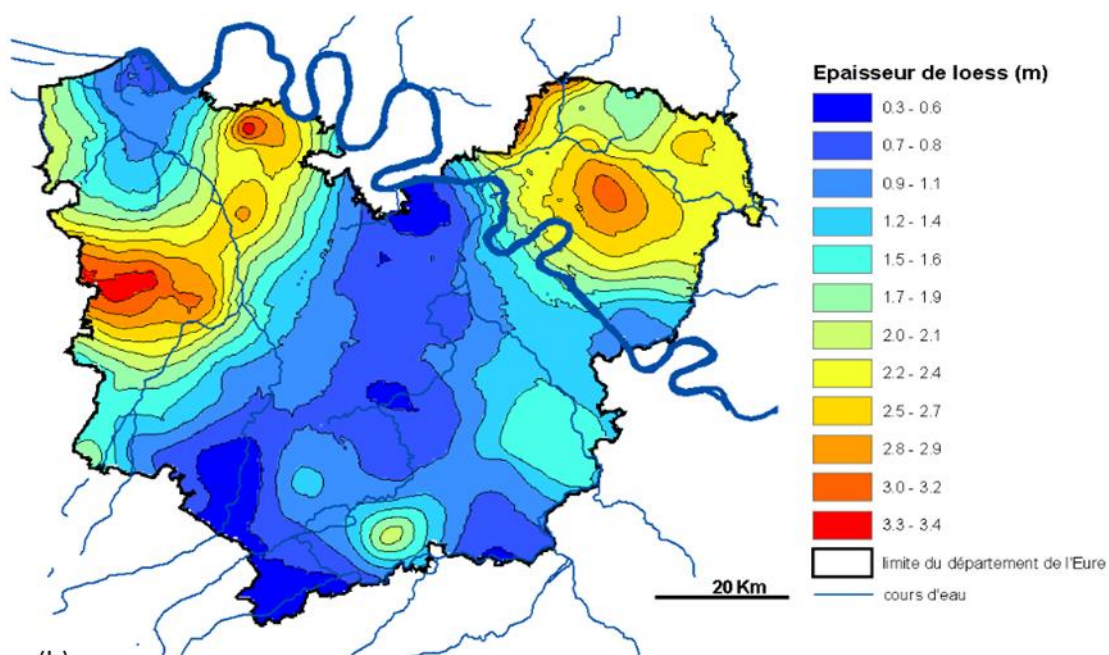
www.cnek.org

LISTE DES ANNEXES

Annexe I: Cartes de la répartition des épaisseurs d'argiles à silex (a) et des épaisseurs de loess (b) dans le département de l'Eure, Projection: Lambert II étendu (Laignel, 1997)	I
Annexe II: Carte de la piézométrie sur le bassin versant de la Risle (Sage de la Risle, 2007)	II
Annexe III: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Goupillières en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)	III
Annexe IV: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Nogent le Sec en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES).....	IV
Annexe V : Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de la Roussière en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES).....	V
Annexe VI: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Graveron-Semerville en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)	VI
Annexe VII: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Bois Arnault en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES).....	VII
<i>Annexe VIII: Log géologique du forage d'Ajou (point 01495X0029/S1), (ficheinfoterre.brgm.fr)</i>	<i>VIII</i>
<i>Annexe IX: Log géologique au niveau de la Houssaye (point 01495X0001/111111), (ficheinfoterre.brgm.fr)</i>	<i>VIII</i>
<i>Annexe X: Log géologique pour le site de Grosley-sur-Risle (point 01491X0045/F), (ficheinfoterre.brgm.fr)</i>	<i>IX</i>

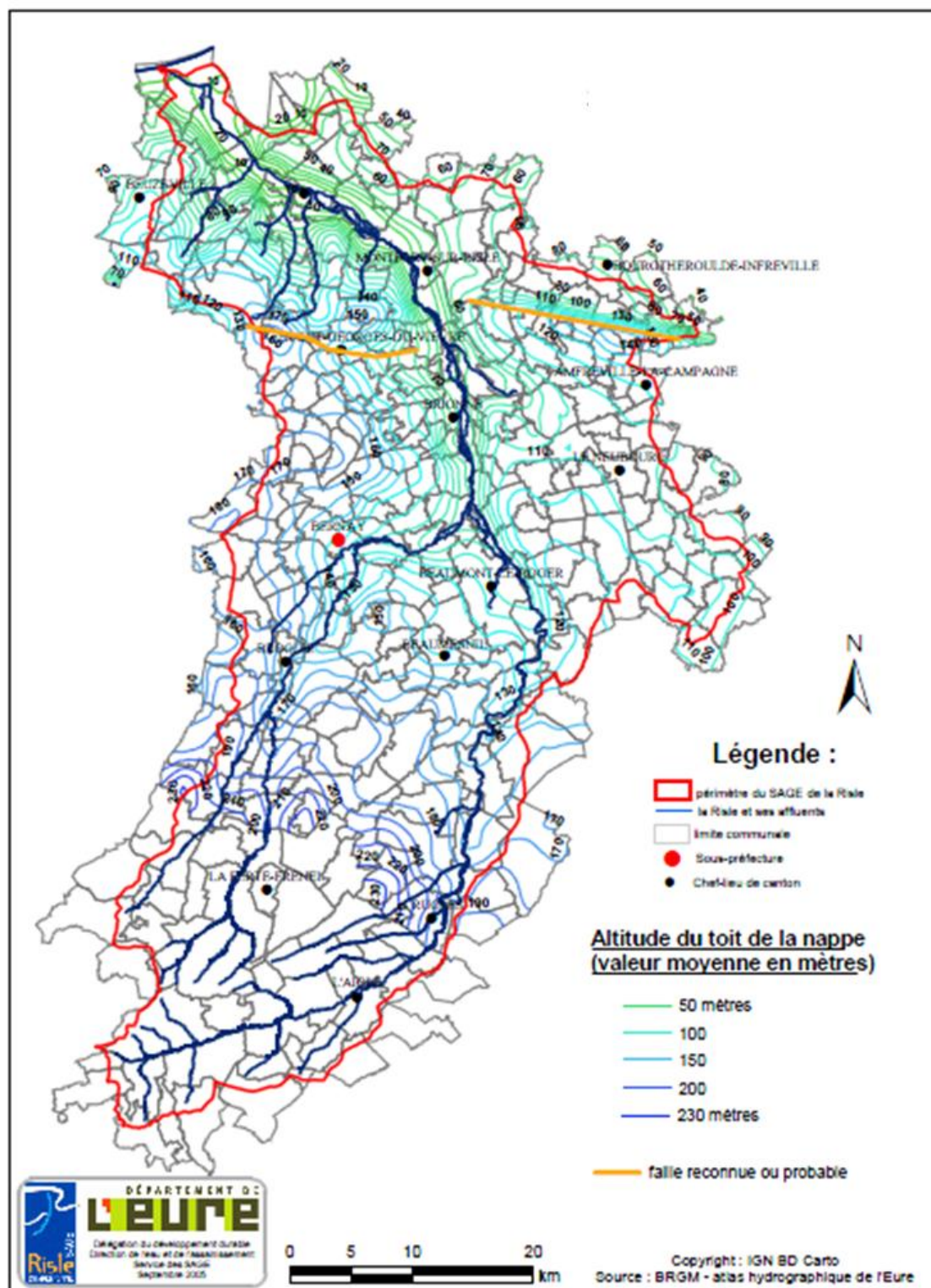


(a)

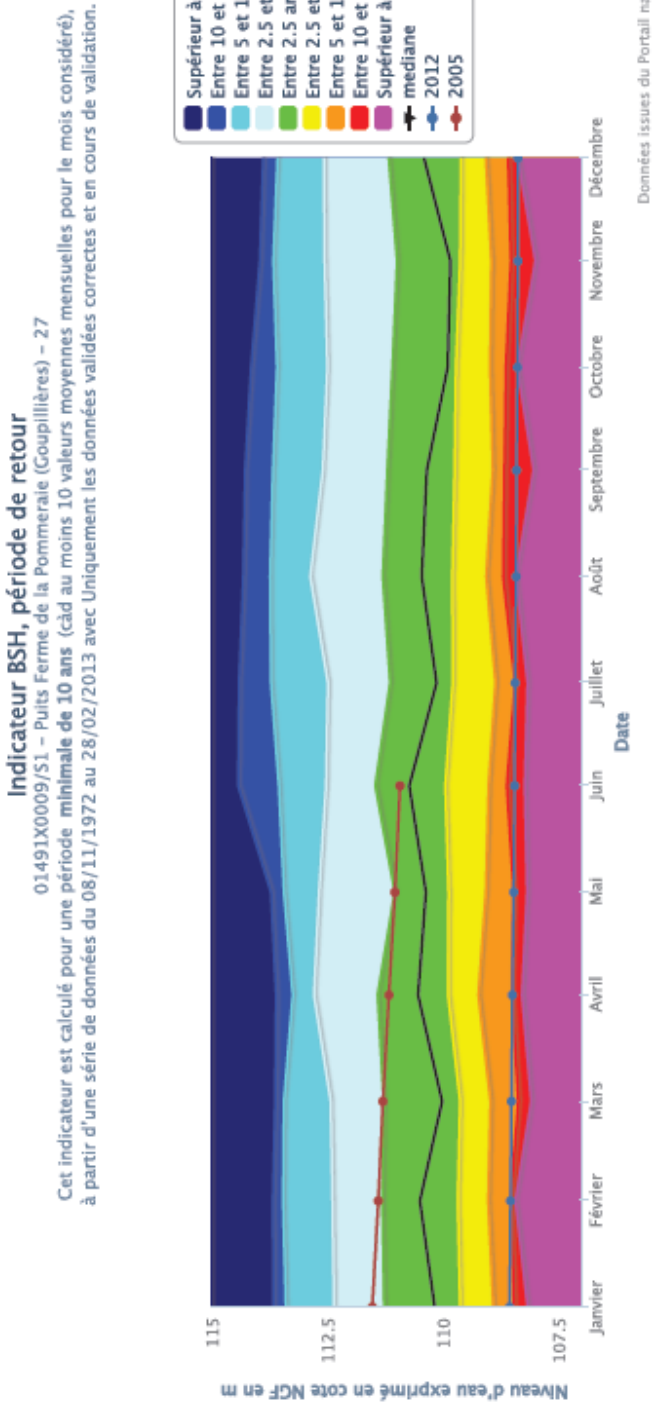


(b)

Annexe I: Cartes de la répartition des épaisseurs d'argiles à silex (a) et des épaisseurs de loess (b) dans le département de l'Eure, Projection: Lambert II étendu (Laignel, 1997)

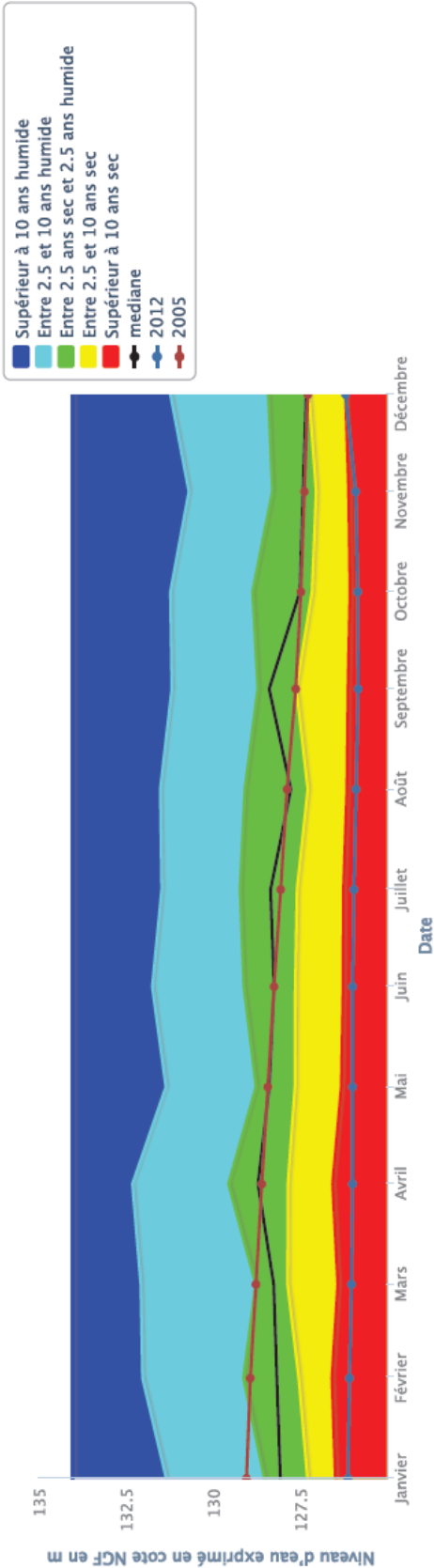


Annexe II: Carte de la piézométrie sur le bassin versant de la Risle (Sage de la Risle, 2007)



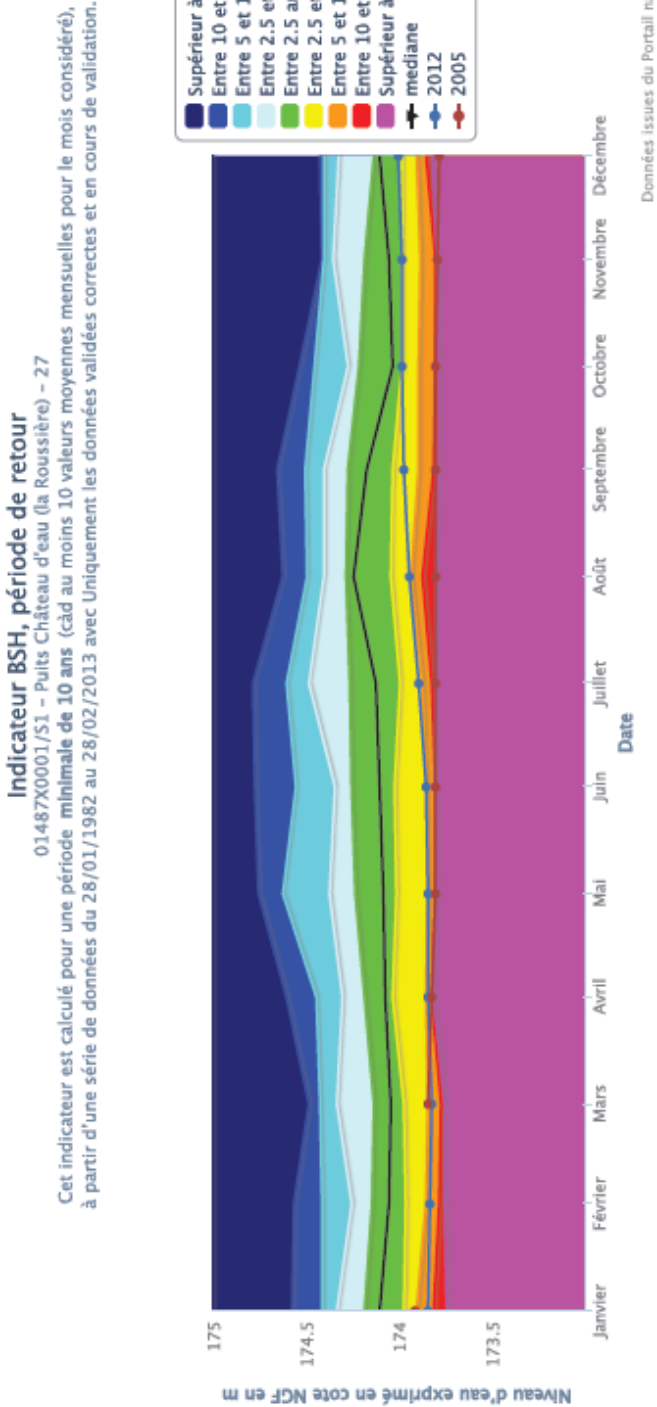
Annexe III: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Goupillières en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)

Indicateur BSH, période de retour
01794X0035/S1 – Puits Les Grands Gomberts (Nogent-le-Sec) – 27
Cet indicateur est calculé pour une période minimale de 10 ans (càd au moins 10 valeurs moyennes mensuelles pour le mois considéré),
à partir d'une série de données du 23/04/1985 au 28/02/2013 avec Uniquement les données validées correctes et en cours de validation.

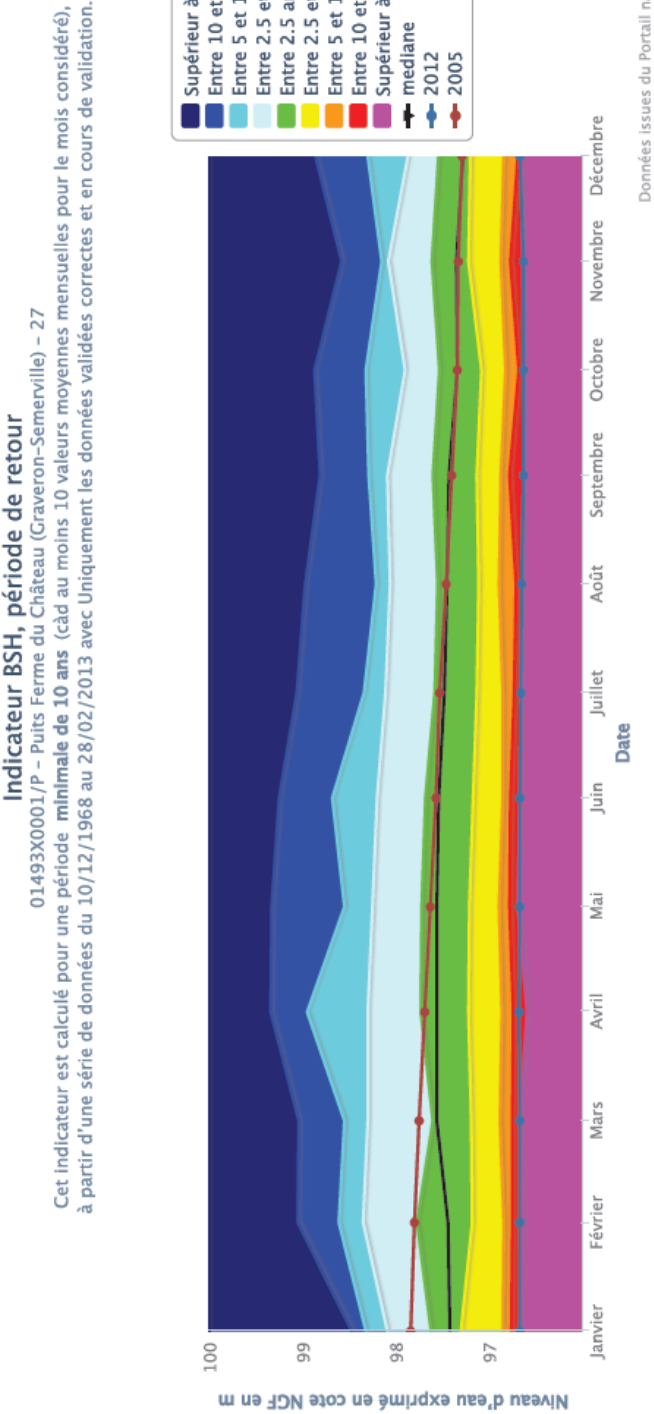


Données issues du Portail national eaux souterraines du SIE, ADES

Annexe IV: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Nogent le Sec en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)



Annexe V : Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de la Roussière en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)

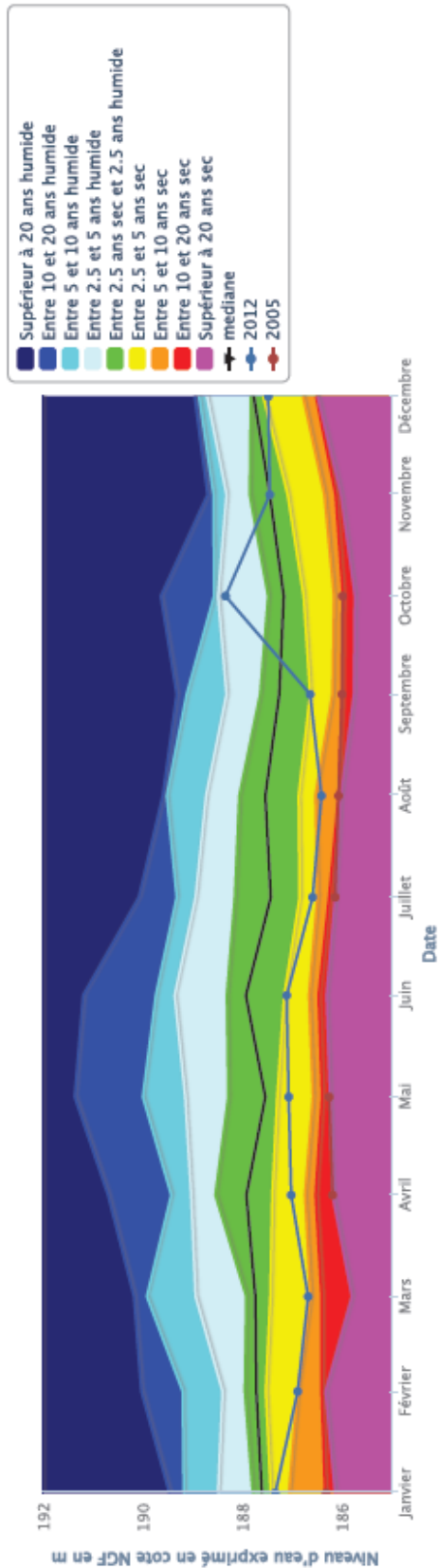


Annexe VI: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Graveron-Semerville en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)

Indicateur BSH, période de retour

0179SX0011/S1 – Puits Les Siauxles (Bois-Arnault) – 27

Cet indicateur est calculé pour une période minimale de 10 ans (càd au moins 10 valeurs moyennes mensuelles pour le mois considéré), à partir d'une série de données du 09/11/1972 au 28/02/2013 avec Uniquement les données validées correctes et en cours de validation.



Annexe VII: Etat des réserves en eaux souterraines mesuré au niveau du piézomètre de Bois Arnault en 2005 et 2012 (Indicateur BSH, site ADES)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
1.00	Sol (terre végétale)		Terre végétale.	Quaternaire	127.00
	Argiles à silex		Argile à silex. Alluvions et Formations résiduelles à silex ?	Cénozoïque	
11.00					117.00
12.10	Craie marneuse à Inoceramus labiatus		Craie altérée.	Turonien	115.90
15.00			Craie indurée.		113.00
16.50			Cavité.		111.50
17.50					110.50
	Craie marneuse sans silex à Inoceramus labiatus (Craie blanche)		Craie tendre.	Turonien inférieur	
31.00			Craie indurée.		97.00
37.00					91.00
	Craie glauconieuse		Craie grise indurée.	Cénomanién	
60.00					60.00

Annexe VIII: Log géologique du forage d'Ajou (point 01495X0029/S1), (ficheinfoterre.brgm.fr)

Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
0 à 4 mètre	Mélange Galet, Sable, Argile à Silex	Imprécis
4 à 8 mètres	Craie, Argileux	Turonien

Annexe IX: Log géologique au niveau de la Houssaye (point 01495X0001/111111), (ficheinfoterre.brgm.fr)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
0.80	Sol (terre végétale)		Terre végétale riche en matière organique.	Holocène	89.20
1.60	Fy		Grave de silex.	Würm	88.40
4.40					85.60
	Craie marneuse à <i>Inoceramus labiatus</i>		Craie grise tendre, collante, à silex noirs.	Turonien	
15.60					75.60

Annexe X: Log géologique pour le site de Grosley-sur-Risle (point 01491X0045/F),
(ficheinfoterre.brgm.fr)

Prospections géophysiques sur le court moyen de la Risle

Le bassin versant de la Risle, situé dans le département de l'Eure, est connu pour son caractère karstique. Des phénomènes de diminution de débit, voire d'assèchement total, sont recensés depuis le XIXème siècle. Ces phénomènes sont la conséquence de l'action simultanée de la nature karstique du sous-sol haut-normand et de la position perchée de la rivière sur le tronçon entre Rugles et Beaumont le Roger. Le 28 juillet 2012, une perte de taille importante s'est ouverte dans le lit de la Risle au niveau de la commune de la Houssaye, provoquant un assec de 12 kilomètres. Des campagnes de prospections hydrogéologiques ont déjà été menées sur ce bassin versant. Elles ont montré des fortes interactions surface/souterrain via l'existence d'un réseau karstique. L'utilisation de prospections géophysiques envisagée ici permet de déterminer la structure interne du système, via l'étude des propriétés physiques du sous-sol. Les techniques employées dans cette étude sont la Tomographie de Résistivité Electrique (ERT) et l'électromagnétisme basses fréquences (EM-34). Cinq sites stratégiques ont été sélectionnés pour la prospection : la zone de décrochement de la nappe au niveau de la commune d'Ambenay, le forage à Ajou, la perte de la Houssay, les pertes du Val Gallerand et la zone de résurgence au niveau de la pisciculture de Grosley-sur-Risle. Seuls les sites d'Ajou, de la Houssaye et de Grosley-sur-Risle sont présentés dans ce rapport qui ne couvre que la moitié du stage. Les résultats montrent que la géologie du secteur perché de la Risle est relativement homogène. L'altération de la craie est plus ou moins forte, notamment au niveau du site d'Ajou et de la rive gauche, sites ayant déjà subi des événements karstiques. L'étude de l'ensemble des sites va se poursuivre durant juillet et août afin d'appréhender d'avantage la structure du sous-sol de ce secteur. L'utilisation de nouvelles techniques de géophysique telle que le potentiel spontané sera envisagée notamment pour étudier les écoulements souterrains.

Mots clés : Risle, Géophysique, Hydrogéologie, Karst, Tomographie de Résistivité Electrique, Electromagnétisme

Geophysic prospecting on the medium watercourse

In Eure county, Risle watershed is known for its karstic nature. Phenomena of rate of flow decrease are inventoried since the XIXth century. These phenomena are the consequences of the simultaneous actions of the karstic nature of Haute-Normandie basement and river perched position on the section between Rugles and Beaumont le Roger. The July 28, 2012, an important sinkhole opened in the Risle riverbed, at La Houssaye. It caused a drying on 12 kilometers. Earlier, hydrogeologic prospecting was achieved on Risle watershed. It shown important surface/underground interactions through karstic network. The use to geophysic prospecting, considered here, allows to determine system inside structure through basement physical property study. Technics use during this study are Electric Resistivity Tomography (ERT) and Electromagnetism low frequencies. For the prospecting, five sites were selected: aquifer setback area at Ambenay (Rugles), Ajou drilling, sinkholes of La Houssaye and Val Gallerand and aquifer resurgence at Grosley-sur-Risle. Only sites of Ajou, La Houssaye and Grosley-sur-Risle are presented in this report. Based on the results, sector perched geology is relatively homogeneous. Chalk alteration is more or less strong, particularly at Ajou and left bank of Risle river at La Houssaye. These two sites are known to present karstic events. This study will continue during this summer. The use of new technics of geophysic as the spontaneous potential will allow to study underground flows.

Keywords: Risle, Geophysic, Hydrogeology, Karst, Electric Resistivity Tomography, Electromagnetism