



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Centre National
de la Recherche
Scientifique



Soutenance de stage

Master 1 Sciences de l'eau,
Parcours Hydrogéologie
Quantitative et Qualitative (H2E)

Effectué par **POINAS Thibault**
au sein du Laboratoire
Géoscience du CNRS de
Montpellier

Du 15 avril 2019
au 28 juin 2019

Etude des intrusions salines dans les aquifères côtiers clastiques le long du Golfe du Lion



Sous la supervision de Mme Véronique Léonardi, Maître de conférences Responsable du M1 H2E (tutrice principale) et de Monsieur Philippe PEZARD, responsable (maître de stage).

Table des matières

Table des matières	2
Calendrier des tâches	3
Thésaurus	3
Définitions	4
Remerciements	5
Introduction	5
Notions importante	6
Les intrusion saline	6
Les forage et diagraphie	6
Présentation du laboratoire	10
Le projet DEM'EAUX	Erreur ! Signet non défini.
Contexte Général	10
Objectifs du projet	10
Contexte Géologique	Erreur ! Signet non défini.
Contexte hydrogéologique	11
Les intrusion saline	13
Usage et mode de gestion de l'eau	Erreur ! Signet non défini.
Le site de l'Argentona	Erreur ! Signet non défini.
Contexte Général	Erreur ! Signet non défini.
Objectif de l'étude	Erreur ! Signet non défini.
Contexte Géologique	Erreur ! Signet non défini.
Contexte Législatif	Erreur ! Signet non défini.
Usage et mode de gestion de l'eau	Erreur ! Signet non défini.
Mon Travail	Erreur ! Signet non défini.
Moyens et méthodes	15
Radioactivité naturelle, "Gamma Ray"	16
Résistivité par induction	Erreur ! Signet non défini.
Résultats	18
Conclusion	18
Annexe	Erreur ! Signet non défini.
Bibliographie	18

Calendrier des tâches

Mission de stage	Avril			Mai				Juin			
	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24
Etude bibliographique	x	x		x							
Prise en main des logiciels Wellcad et Kaleidagraph		x	x								
Etude et interprétation de mesures en forage			x	x	x	x	x			x	x
Réalisation de diagraphies					x			x			
Mesures pétrophysiques									x	x	
Rapport de stage				x	x	x	x	x			
Présentation orale									x	x	x

Thésaurus

Log	Terme anglais pour désigner un enregistrement diagraphique en forage
CNRS	"Centre National de la Recherche Scientifique"
TMP	Equipe de recherche du CNRS sur les "Transferts en Milieux Poreux"
AEP	Adduction en eau potable
BRGM	"Bureau de Recherches Géologiques et Minières"
TLL	Time Lapse Logging (mesures en forage répétées dans le temps)

Définitions

Diagraphie : terme français désignant aussi bien la technique que le résultat des mesures sous forme de courbes les formations géologiques traversées lors d'un sondage.

Transmissivité : Paramètre régissant les flux d'eau transitant par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu, par unité de gradient hydraulique.

Ouvrage défectueux : On entend par « défectueux », tout forage mettant en contact plusieurs nappes où les nappes avec l'eau de surface.

Aquifère côtier : Le terme aquifère côtier désigne les réservoirs d'eau douce souterraines situés en zone littorale.

Densité : Rapport entre la masse volumique d'un corps ou d'un fluide et celle d'un même volume d'un autre fluide.

Bassin sédimentaire : Un bassin sédimentaire est une relative dépression de la croûte terrestre située sur un continent émergé, un plateau continental.

Niveau piézométrique : La piézométrie est la mesure de profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine. Elle est exprimée soit par rapport au sol en m, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en m NGF.

Tomographie électrique : est une technique d'auscultation du sous-sol fondée sur la mesure des résistivités apparentes du sous-sol. Cette méthode est utilisée pour obtenir une coupe verticale des terrains en apportant une information sur la structure et la lithologie des couches du sous-sol et des anomalies rencontrées.

Lithologie : est la nature des roches formant un objet, un ensemble, ou une couche géologique.

Onshore et offshore : Termes anglais. Onshore désigne l'exploration d'un forage à terre par opposition aux explorations offshore qui désignent l'exploration d'un forage en mer.

Paléogènes, Néogène, Quaternaire ... : Epoque des temps géologiques qui correspondent à un système de classement chronologique utilisé en géologie pour dater les événements survenus durant l'histoire de la Terre. Cette échelle est illustrée ci-dessous :

Remerciements

Avant d'exposer mon travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont permis la réalisation et le bon déroulement de mon stage.

Je souhaite tout particulièrement exprimer ma gratitude à **Mme LEONARDI Véronique et M JOURDE Hervé**, responsable du master H2E, qui m'ont permis d'intégrer ce master, pour lequel j'ai eu à réaliser ce stage. Au même titre, je souhaite remercier **M PEZARD Philippe**, mon maître de stage, pour m'avoir choisi et accompagné dans la réalisation de ce stage et pour la confiance qu'il a placée en moi.

Je remercie également le président de l'Université de Montpellier, **M AUGÉ Philippe**, ainsi que le directeur de la faculté des Sciences **M HOFFMANN Alain** pour avoir donné leur autorisation quant à l'exécution de mon stage.

J'adresse également des remerciements à **M HENRY Gilles** (CNRS), **M BRUN Laurent** (CNRS), **CELERIER Bernard** (CNRS), **Mme GEERAERT** (CNRS), pour avoir toujours été à l'écoute, avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions, et m'avoir aidée dans le déroulement de mon stage.

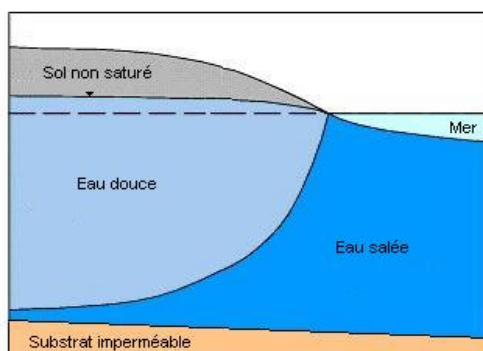
Introduction

J'ai eu l'opportunité d'effectuer un stage de 2 mois et demis au laboratoire intitulé Géosciences Montpellier (UMR 5243 du CNRS) afin d'y étudier la problématique des intrusions salines en zone côtière au sein du projet DEM'EAUX. J'ai intégré au cours de ce stage l'équipe de recherche sur les Transferts en Milieux Poreux (TMP). L'équipe se focalise sur l'étude de la partie supérieure de la croûte terrestre (de 10 m à 10 km de profondeur environ). Les travaux couvrent le champ de l'hydrodynamique souterraine et des interactions fluides-roches en utilisant des approches de modélisation, d'expérimentation de laboratoire et de mesures de terrain, sur des sites expérimentaux dédiés.

Notions importante

Les intrusions salines

Le phénomène d'intrusions salines correspond à la pénétration d'eau salée dans les aquifères d'eau douce, ce qui peut entraîner sa contamination en sel et la rend inutilisable pour l'alimentation en eaux potables (AEP). L'intrusion d'eau salée se produit naturellement dans une certaine mesure dans la plupart des aquifères côtiers, en raison de la connexion hydraulique entre les eaux souterraines et l'eau de mer. Comme l'eau salée a une teneur en minéraux et en sel dissous plus élevée que l'eau douce, elle est plus dense ($\rho=1000$ g/l pour l'eau douce et $\rho=1025$ g/l pour l'eau de mer, en moyenne). L'eau douce, qui est moins dense que l'eau salée va se placer par gravité au dessus de l'eau salée. Ces mouvement de fluide vont créer une zone de transition où le mélange se fait par dispersion et diffusion que l'on appelle le "biseau salé". La géométrie et les dimension du biseau salé peuvent fortement varier en fonction des propriétés hydrodynamique et géométrie de l'aquifère ainsi que des paramètre géologique de la zone de transport.



Certaines activités humaines, en particulier le pompage des eaux souterraines à partir des puits d'eau douce côtiers, ont accru l'intrusion d'eau salée dans de nombreuses zones côtières. L'extraction de l'eau fait baisser le niveau de l'eau souterraine douce, ce qui réduit la pression de l'eau et permet à l'eau salée de s'écouler plus loin dans les terres. Ce phénomène accentué par des pompages mal maîtrisés engendre de gros problèmes sociétaux sur l'accès à l'eau potable dans de nombreuses régions côtières du monde. Dans le cas de l'aquifère côtier de la Chaouia au Maroc par exemple, une enquête menée par la DRPE a montré sur 1083 puits pris au hasard durant les mois de Juin et Juillet 1995, que 592 puits ont été totalement abandonnés. Parmi ces derniers, 496 (84 %) ont été abandonnés à cause de la forte salinité de l'eau pompée dépassant 3 g/l, seuil tolérable en agriculture (A. ZEROUALI et al., 2001). Cela montre encore une fois l'importance d'avoir une bonne compréhension du fonctionnement hydrodynamique des aquifères côtiers qui sont exploités pour l'AEP.

Forages et diagraphies

La diagraphie, aussi connue sous le nom de logging en anglais, est la pratique qui consiste à enregistrer de façon détaillée (un diagramme de puits ou log) les formations géologiques traversées par un trou de forage. Le diagramme peut être basé soit sur l'inspection visuelle d'échantillons ramenés à la surface (logs géologiques), soit sur des mesures physiques effectuées par des instruments abaissés dans le forage (logs géophysiques).

<https://www.laviemoderne.net/detox/77-sondage-et-carottage>

Généralement, les diagraphies sont réalisées juste après la foration lors de la remontée des instruments, ceci pour pouvoir réaliser les mesure avant l'effondrement éventuel du puits. Les mesures peuvent être également effectuées après la foration si celui ci est équipé d'un cuvelage (ce qui empêche son effondrement sur lui même), ou si il est suffisamment résistant. Un tubage en acier ne permette que la réalisation de mesure de radioactivité. Un tubage PVC quant à lui permet de réaliser des mesure électromagnétique (résistivité/conductivité électrique, susceptibilité magnétique), sonique/acoustic et de radioactivité gamma naturelle également. Lors de mon stage, je suis principalement intervenu sur des puits tubé en PVC, et j'ai traité des données de conductivité électrique.

Conductivité électrique des milieux poreux

Pour la bonne compréhension de ce rapport, il est important de bien comprendre les notions de résistivité et de conductivité électrique. La résistivité électrique et son inverse, la conductivité électrique, est une propriété fondamentale d'un matériau qui quantifie à quel point il résiste ou conduit le flux du courant électrique. Une faible résistivité indique un matériau qui permet facilement la circulation du courant électrique. La résistivité est communément représentée par la lettre grecque ρ (rho). L'unité SI de résistivité électrique est l'ohm mètre ($\Omega \cdot m$).

La conductivité électrique ou conductance spécifique est l'inverse de la résistivité électrique. Elle représente la capacité d'un matériau à conduire le courant électrique. Il est communément signifié par la lettre grecque σ (sigma). L'unité SI de conductivité électrique est Siemens par mètre (S/m), anciennement appeler le mho par mètre ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$). Lors du stage, j'ai principalement travaillé avec des données de conductivité que l'on exprimait en mMho, jargon pétrolier signifiant mS/m ou encore $m\Omega \cdot m^{-1}$.

L'intérêt d'effectuer des mesures de conductivité est que la conductivité d'un électrolyte dépend à la fois et principalement de la température et de la quantité de sels dissous. Donc, plus cette dernière quantité augmente, plus la conductivité augmente. La conductivité est donc un outil très pratique pour l'étude et la surveillance des mouvements d'eau salée dans le sous-sol.

Toutefois, passé le plafond de saturation en sel minéraux, la conductivité décroît à nouveau car les sels non dissous n'étant pas conducteurs s'opposent au passage du courant. Cela n'est pas un problème dans l'étude des intrusions saline car l'eau de mer n'est que très rarement à saturation.

Conductivité électrique des milieux poreux

La conductivité dans les milieux poreux ne dépend pas uniquement de la teneur en sel minéraux dissous. Elle dépend également de la géométrie des pores ainsi que la présence conductivité de surface de cations le long des parois minérales de la roche.

Sunberg (1932)

Sunberg établit en 1932 que la conductivité d'une formation poreuse à saturation C_o et la conductivité C_w du fluide qui remplit les pores sont proportionnels et définit le facteur de formation électrique F comme facteur de proportionnalité. Cela donne l'équation suivante :

$$C_o = \frac{C_w}{F}$$

Archie 1942

Archie constate en 1942 que le facteur F est empiriquement relié à la porosité de la roche et par facteur de cimentation m qui dépend de la forme ou topologie 3D des pores et de la taille des liaisons entre les pores. Le facteur m varie de manière générale entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés. Il est déterminé de manière expérimentale. Cela nous donne :

$$F = \phi^{-m}$$

Waxman-Smits (1968)

Waxman et Smits ont, quant à eux, mis en lumière en 1968 l'implication des argiles d'une formation dans l'amélioration de la circulation du courant électrique en étudiant des formations argile-sable du Golfe du Mexique. En effet, ils ont mis en lumière l'importance des phénomènes de conduction de surface les milieux poreux, et, indirectement, celle de la capacité d'échange cationique des surfaces minérales, notamment dans le cas des minéraux argileux. En effet, les groupements hydroxydes OH^- présents dans la structure minérale des argiles induisent une capacité d'adsorption des cations présent dans l'eau qui vont donc s'adsorber jusqu'à saturation sur les parois des pores et ensuite s'y déplacer (cf. schéma), donnant naissance au phénomène de conduction de surface. Comme les conductivités en parallèle s'ajoutent, l'équation suivante a pu être mise en place :

$$C_o = \frac{C_w}{F} + C_s$$

Avec C_s , la conductivité liée à la capacité d'échange cationique de la surface des minéraux argileux est prise en compte. La communauté scientifique du secteur pétrolier a rapidement reconnu l'utilité de cette approche et elle est rapidement devenue une norme dans l'industrie.

On sait donc aujourd'hui que la conductivité électrique C_o d'une roche dépend essentiellement :

- de la nature de l'électrolyte, c'est à dire de la résistivité propre de l'eau envahissant les pores et par conséquent, de la quantité, du type et de la concentration de sels dissous,
- de la quantité d'eau contenue dans la roche, donc de la porosité et de la saturation,
- du mode de distribution de l'électrolyte, de la lithologie, de la texture et structure, c'est-à-dire du mode de répartition des pores et de la nature des argiles et des minéraux conducteurs.
- de la température car la conductivité d'un électrolyte dépend aussi de la température. Une augmentation de température diminue la viscosité, la mobilité des ions devient plus grande, par ailleurs, la dissociation augmente, ce qui a pour effet d'augmenter la conductibilité.

Radioactivité naturelle spectrale

Pour la bonne compréhension de ce rapport et des outils utilisés, il est important de bien comprendre la notion de radioactivité naturelle gamma.

La désintégration radioactive est le processus par lequel un noyau atomique instable perd de l'énergie (en termes de masse) en émettant un rayonnement, tel qu'une particule alpha, une particule bêta ou un photon gamma, cela pour revenir à un état stable. Un matériau contenant de tels noyaux instables est considéré comme radioactif.

Dans le sol, divers éléments vont être une source de rayon gamma. C'est le cas de l'uranium, du thorium et du potassium qui sont principalement responsables du rayonnement gamma émis par les roches. En fonction de l'élément émetteur, le rayon émis est légèrement différent en termes d'énergie. L'analyse des proportions de rayon gamma issus du thorium, de l'uranium et du potassium dans le sol est un bon indicateur de certaines lithologies. En particulier des argiles qui émettent habituellement plus de rayons gammas que d'autres roches sédimentaires, comme le grès, le gypse, le sel, le charbon, la dolomite ou le calcaire. Le potassium et le thorium sont des éléments communs dans les argiles.

Cette différence de radioactivité entre les argiles et les grès/roches carbonatées permet à l'outil des rayons gamma de distinguer les argiles. Mais il ne peut pas faire la distinction entre les carbonates et le grès car ils ont généralement tous les deux des diagrammes de rayons gamma faible et donc similaires. Il arrive également qu'à certains endroits, les sédiments sans argiles présentent des niveaux élevés de rayonnement gamma. Par exemple, les grès peuvent contenir des minéraux d'uranium, du feldspath de potassium, ou des fragments lithiques qui donnent à la roche des valeurs gamma plus élevées que la normale. Le charbon et la dolomie peuvent également contenir de l'uranium adsorbé. Les dépôts d'évaporite peuvent contenir des minéraux de potassium tels que la sylvite et la carnallite (*Hampson and al, 2005*).

On ne peut donc pas dire que les diagraphies aux rayons gamma font de bonnes diagraphies lithologiques par elles-mêmes, Elles sont surtout utilisées à terme comparatif ou pour infirmer ou affirmer des hypothèses basées sur d'autres types de diagraphies.

J'ai effectué lors de mon stage des diagraphies de radioactivité naturelle et travaillé avec ces données pour l'interprétation de données de conductivité.

Présentation du laboratoire

L'équipe "Transfert en milieu poreux" (TMP) de Géosciences Montpellier étudie essentiellement la partie supérieure de la croûte terrestre (de 10 à 10 000 m environ) qui est le site privilégié d'interactions nombreuses et complexes entre activités humaines et processus terrestres. Les travaux menés par le centre de recherche couvrent le champ de l'hydrodynamique souterraine et des interactions fluides-roches en utilisant des approches de modélisation, d'expérimentation de laboratoire et de mesures de terrain sur des sites expérimentaux dédiés.

Projet DEM'EAUX

Contexte Général

La plaine du Roussillon est située à l'est du département des Pyrénées-Orientales au sud de la région Occitanie. Sa surface est d'à peu près 900 km². Elle est délimitée uniquement par des barrières naturelles : le massif des Albères au sud, le massif calcaire des Corbières au nord, le massif du Canigou à l'ouest et la mer méditerranée à l'Est. Le climat de cette zone est méditerranéen caractéristique par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, bien qu'il varie de plus en plus chaque année à cause du changement climatique en cours. Toute la partie est de la plaine est fortement exposée au milieu marin. Trois cours d'eau traversent cette zone d'ouest en est: l'Agly, la Têt et le Tech, qui viennent se jeter dans la Méditerranée. Le cordon littoral s'étend approximativement sur 40 km. Sa topographie est globalement plate.

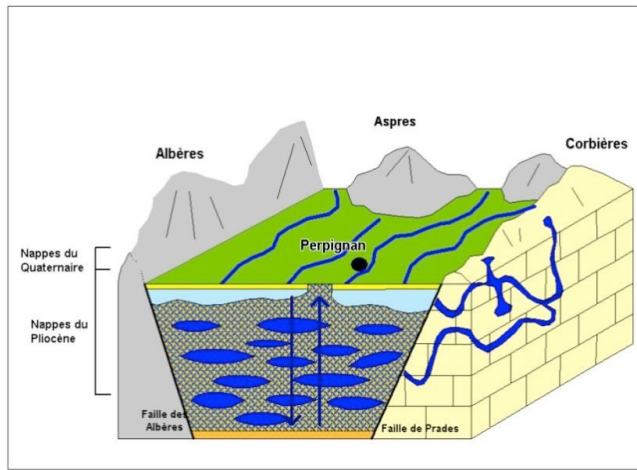
Objectifs du projet

Le projet DEM'EAUX Roussillon fait suite au projet ANR GRAIN DE SEL. Il vise à développer des outils et des méthodes de caractérisation et de gestion des réservoirs côtiers. Pour ce faire il, compte sur la mise en commun des compétences et savoir-faire des établissements publics de recherche et des entreprises de la Région Occitanie. L'objectif de ce projet est de comprendre le comportement de l'aquifère plio-quadernaire du Roussillon, en intégrant l'ensemble des enjeux naturels et anthropiques qui lui sont associés et leur évolution future.

Les sites d'études lors de ma période de stage se localisent sur les communes de Barcarès et Saint- Cyprien-plage. Ce sont deux communes de bord de mer avec une forte influence saisonnière durant la période estivale. Pour se faire une idée, la population des deux stations balnéaires peut être multipliée par 10 lors des mois de juillet et août. Ce contraste annuel qui engendre de grande différence de volume d'eau prélevé représente une zone d'étude idéale pour observer l'impact des activités anthropiques sur le mouvement du biseau salé.

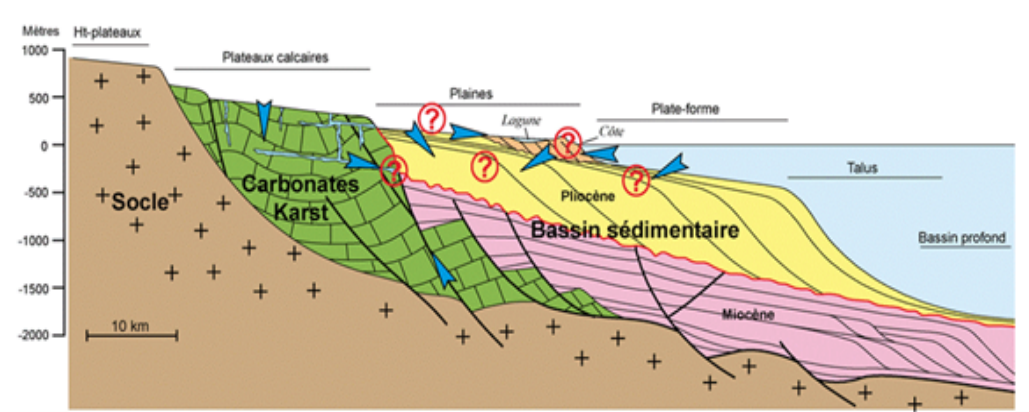
Contexte Géologique

La plaine du Roussillon est un bassin d'effondrement de type « graben » formé lors du remplissage néogène issu des restes de l'érosion de la chaîne Pyrénéenne. L'épaisseur de ce remplissage peut atteindre 1000 m en son centre. Ce bassin d'effondrement se retrouve encerclé par des failles majeures telles que la faille des Albères, la faille Nord Pyrénéenne, et la faille de la Têt (Figure 5).



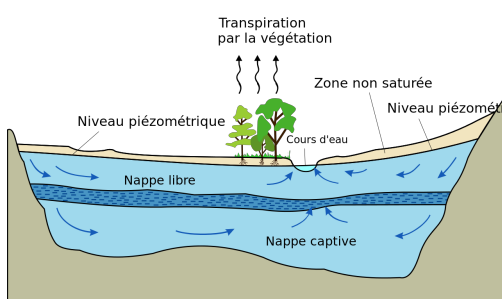
Ainsi, on trouve en base un socle profond composé de granite et de schiste abritant des aquifères, dits de socle métamorphique gneissique et schisteux Précambrien du massif des Aspres et des Albères. Au-dessus se trouvent des sédiments permien-trias. On a ensuite directement des terrains Miocène marins d'une épaisseur de 1000 m environ montrant une lacune au niveau de la présence des terrains Mésozoïque et Paléogène (formation de la chaîne des Pyrénées). On trouve ensuite des niveaux d'argiles plastiques bleuâtres sur 600 m correspondant au Pliocène marin, sauf pour

le toit de la série constitué de dépôts peu profonds de sables sur 70 m qui sont des terrains perméables et productifs. On trouve ensuite le Pliocène continental qui présente des alternances de sables et d'argiles sur 200 m. Il se sont formés lors de la crise Messinienne pendant laquelle la chute brutale du niveau de la mer a impacté les cours d'eau qui ont formé de profonds canyons qui se sont ensuite remplis de sédiments lors de la remontée du niveau de la mer. La dernière série de la plaine du Roussillon est séparée du Pliocène par une couche d'argile très peu perméable et correspond à des alluvions quaternaires d'environ 10 m d'épaisseur rassemblant des galets, des blocs de granite, des calcaires et des schistes déposés par les fleuves circulant le long des failles pyrénéennes. En amont de la plaine, on observe l'émergence du plateau calcaire (Aunay, 2007 et Duvail, 2008).



Contexte hydrogéologique

Dans le bassin du Roussillon, la sédimentation et la géométrie des aquifères côtiers sont directement liés à son histoire géologique et géodynamique. Le bassin sédimentaire est donc composé d'une multitude de couche de lithologies différentes qui, pour certaines d'entre elles, constituent des terrains potentiellement aquifères. Les terrains Miocène marins relativement marneux (donc argileux, très peu perméables) sont considérés comme imperméables.



- Formation perméable
- Formation peu perméable
- Formation imperméable
- Circulation de l'eau souterraine

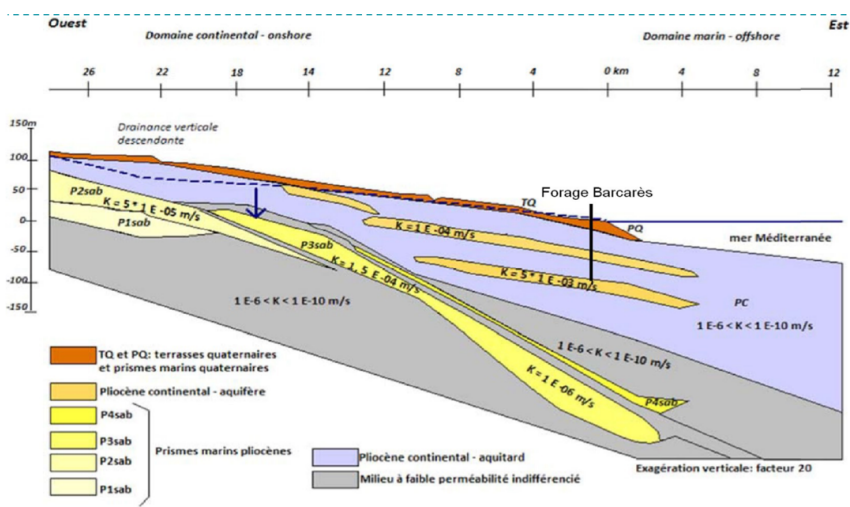
L'aquifère le plus profond exploité correspond au toit du pliocène marin (dans du sable). Il y a ensuite l'aquifère du pliocène continental. C'est le plus exploité des trois, et il se trouve au dessus du Pliocène marin. Ces deux aquifères sont des nappes captives. Une nappe captive est une nappe qui se trouve piégée par une couche très peu perméable, en général argileuse et située au-dessus de l'aquifère. Ce type de nappe possède des temps de recharge très long de par leur isolement. Cependant elle est mieux protégée vis-à-vis des pollutions venant de la surface. Elle représente donc une ressource en eau intéressante, mais chère à exploiter car profonde et plus facilement épuisable.

Le troisième se trouve en surface. Il s'agit de l'aquifère alluvial du Quaternaire. Une nappe alluviale est un certain type de nappe libre, caractérisée par le fait qu'elle circule dans les alluvions d'une rivière. De manière générale, une nappe alluviale établit une communication permanente avec sa rivière associée, ce jusqu'à la rencontre d'une barrière géologique imperméable qui définit les limites de la nappe alluviale. Ces aquifères sont beaucoup utilisés pour l'agriculture et moins pour l'AEP car ils sont le plus sensibles aux contaminations de part sa relation directe avec la surface. Ils sont également les premiers impactés par l'intrusion saline et les pompages saisonniers. Dans la partie amont du bassin, les nappes alluviales participent également à la recharge des aquifères captifs du Pliocène. Il a été découvert que l'aquifère du Pliocène de la plaine du Roussillon est subdivisé en deux nappes.

La première est une des plus productives. Elle se développe entre 40 et 60 m de profondeur. Les aquifères de cette nappe sont généralement captifs. Elle possède un niveau piézométrique proche du sol et des transmissivités comprises entre 1.10^{-2} et $3.10^{-2} m^2/s$.

La seconde correspond aux sédiments du Pliocène continental et à ceux du Pliocène marin sableux. Les études hydrogéologiques laissent penser que la nappe n'est pas en contact direct avec la mer, même si certains secteurs présentent de forte conductivité, due à la présence de chlorures. Il a été montré que la cause de cette minéralisation anormale était d'origine anthropique, à cause d'un forage altéré mettant en relation la nappe avec les aquifères du Quaternaire sus-jacents.

Nous sommes donc en présence d'une eau d'assez bonne qualité dans les nappes du Pliocène contrairement à la nappe du Quaternaire qui est en relation directe avec la surface et qui contient donc de la saumure provenant des étangs. C'est pour cette raison que c'est l'aquifère du Pliocène continental qui est le plus exploité pour l'AEP, offrant le meilleur rapport qualité/coût de production.



Cette coupe met en évidence la protection de l'aquifère du Pliocène contre l'infiltration saline par la couche d'argile qui la sépare de la mer. Des études telles que Aunay (2007), Duvail, (2008), Alcalá et Custodio (2008), Gattaccca et al. (2009), et Khaska et al. (2013) ont mis en évidence cette protection mais également ses limites. En effet, cette protection peut être rompue suite à une fuite

dans un forage traversant la nappe du Quaternaire ou par effet de succion, dans le cas d'une surexploitation de la nappe. En effet, l'argile est considérée comme imperméable, mais sa

transmissivité n'est pas nulle et une dépression dans la nappe pourrait entraîner l'infiltration du biseau salée. Il s'agit donc d'un aquifère relativement bien protégé mais qui est sensible à la contamination saline suite aux activités de pompage.

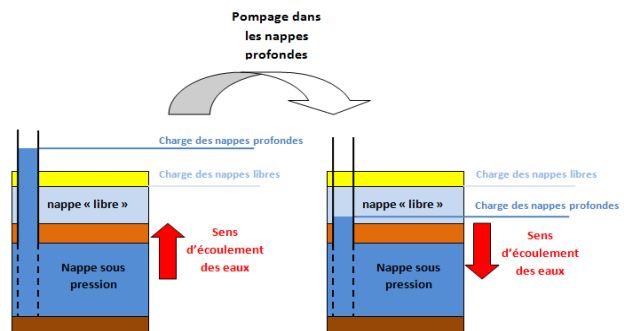
Lors de mon stage, j'ai effectué des mesures de conductivité lors d'un essai par pompage dans un puit voisin. Des diagraphies ont été réalisées avant pendant et après le pompage, pour voir l'influence direct d'un pompage sur la montée du biseau salée. Ces résultats ne sont pas présentés dans ce rapport car cette mission a été réalisée juste avant la date de rendu de ce document.

De manière générale, dans la partie aval du bassin, les charges hydrauliques sont plus fortes pour les aquifères profonds que pour les aquifères superficiels. La drainance est soit « descendante », soit « ascendante », selon la charge hydraulique des nappes. Sur la partie aval de la plaine, à l'état naturel, les nappes captives du Pliocène ont une charge supérieure aux nappes du Quaternaire, engendrant ainsi une drainance ascendante (voir schéma). Ceci évite donc l'apport d'eaux potentiellement polluées ou salées dans les nappes profondes.

Cependant, les forts prélèvements dans les nappes Pliocène peuvent diminuer fortement cette charge et donc inverser le sens de drainance et ainsi favoriser la contamination des nappes profondes. La figure ci-contre illustre le principe de ce phénomène d'inversion.

Les intrusions salines

Le biseau salé dans la plaine du Roussillon est fonction du pendage et de la transmissivité des couches d'argile du Pliocène continental isolant les aquifères profonds de la mer. Actuellement, la plupart des aquifères profonds et captifs sont relativement bien préservés des intrusions salées grâce à la faible perméabilité des couches qui les isole et de la charge hydraulique de ces aquifères faisant pression sur l'aquitard. Cependant, les pompages excessifs lors de l'affluence estivale restent un risque notoire (Aunay, 2007).

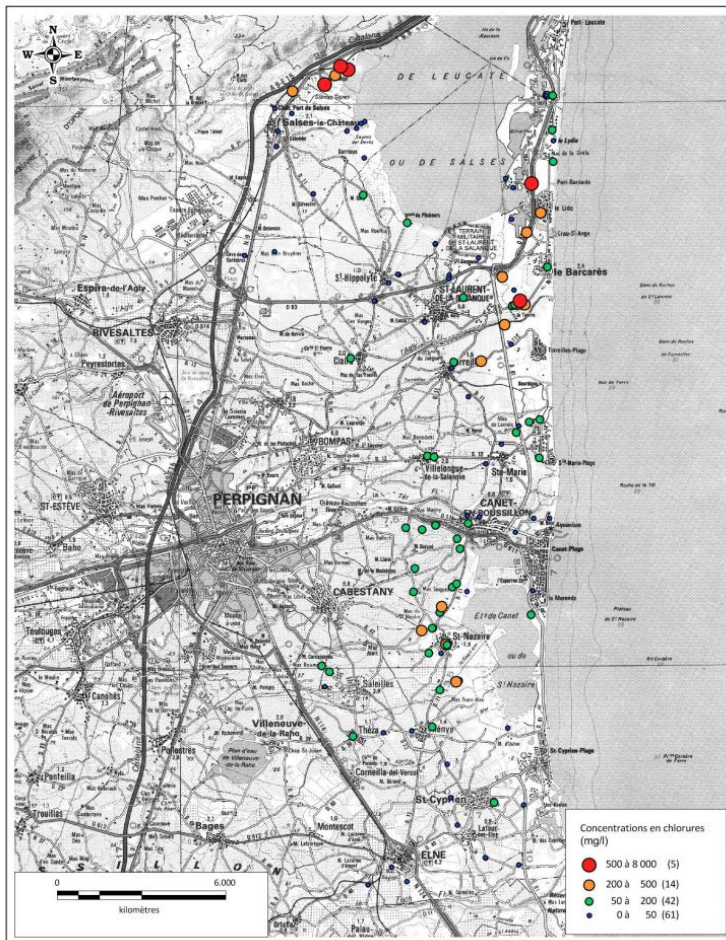


Le BRGM suit activement la qualité des eaux souterraines dans le bassin du Roussillon depuis les années 80. Le syndicat Mixte pour la protection et la gestion des nappes de la plaine du Roussillon effectue également un suivi depuis 2008. Ces surveillances font l'objet de rapports publics relatifs à la surveillance des aquifères du Quaternaire et du Pliocène¹. Le rapport de 2013 issu de l'interprétation des données de la campagne de mesures effectuées sur la nappe Pliocène durant l'été 2012 nous montre l'état de la nappe par rapport à sa concentration en chlorures de la plaine, comme illustré sur la figure ci-dessous :

¹ <http://www.nappesroussillon.fr/-Rapports-de-surveillance-de-l-.html>

Cette surveillance est réalisée à partir de mesures de la conductivité et des teneurs en chlorures de l'eau des formations Pliocène à fréquence annuelle dans environ 130 forages situés à moins de 5 km des étangs littoraux et de la mer, entre l'étang de Salses-Leucate et l'embouchure du Tech. Le projet DEM'EAUX permettra de l'étendre jusqu'à Saint Cyprien plage.

Illustration 6 – Répartition géographique des concentrations en chlorures dans les eaux du Pliocène aux mois d'août et septembre 2012



De manière générale, les eaux souterraines du Pliocène de la plaine du Roussillon possèdent des teneurs en chlorure inférieures à 100 mg/l. Cependant, on observe que les concentrations en chlorures mesurées au sud et au nord de la commune du Barcarès ainsi qu'à l'est de l'étang de Leucate sont certaines fois supérieures à 500 mg/l. On observe que la zone entourant l'étang est fortement contaminée par les chlorures, où plusieurs points présentent des concentrations très élevées, avec parfois des augmentations brutales et continues sur plusieurs années (Mauran, 2018).

Cela peut s'expliquer ces mesures par l'intrusion des eaux saumâtres de l'étang dans des point de faiblesse de la zone argileuse, là comme sur le reste du bassin, où seules les eaux de pluie

participent à la recharge. Cela peut être dû aussi à une infiltration de l'eau de l'étang ou de la nappe du Quaternaire par les dits forages de surveillance. Ceci démontre localement la fragilité de la ressource. Le secteur de Barcarès est en surveillance importante dû à sa forte affluence touristique en été qui nécessite une importante ressource en eaux.

Lors du stage, j'ai effectué des surveillances dans des forages sur la zone de Barcarès et de Saint Cyprien. Cela à permis de comparer deux zones proches de la mer mais exposées à des risques d'intrusions bien différents.

Ces mesures répétées montrent qu'il n'y à pas de contamination généralisée des nappes du Pliocène par les chlorures, mais plutôt des contaminations localisées. Les résultats de 2018 conduisent à peu de chose près vers la même conclusion, mais les résultats de 2012 sont présentés ici car ils couvrent une zone d'étude plus large et mettent en évidence des points très contaminés tout autour de l'étang. Le fait que la contamination ne soit pas généralisée est sûrement dû à la multitude de nappes composant ces aquifères, toutes séparées par d'épaisses couches d'argiles. Il y à donc des points de contamination qui heureusement ont du mal à se répartir dans les aquifères.

Mon travail

Lors de mon stage, j'ai eu l'opportunité de travailler sur l'étude de la circulation des fluides au sein d'un aquifère côtier en réalisant des diagraphies et en traitant ces données grâce à des méthodes expérimentales. J'ai eu accès et ai pu étudier des données préexistantes, et je suis allé sur le terrain prélever de nouvelles données, soit pour les comparer aux diagraphies préalables réalisées, soit pour réaliser des diagraphies sur de nouveaux forages. Les résultats obtenus permettront ensuite d'éprouver et/ou améliorer le modèle conceptuel construit ainsi que les méthodes d'interprétation utilisées.

J'ai également eu l'opportunité de réaliser des diagraphies de conductivité lors d'un essai par pompage sur un forage voisin, mais les résultats ne seront pas exposés dans ce rapport car ses mesures ont été effectuées juste avant la date de rendu de ce mémoire.

Acquisition de données, moyens et méthodes

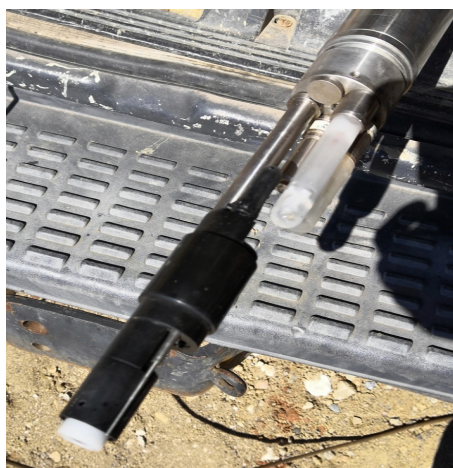
Les 2 sites où je suis allé faire l'acquisition de données de terrain sont Barcarès et Saint Cyprien. J'y ai réalisé des diagraphies de radioactivité naturelle et de conductivité électrique. J'ai pu faire un comparatif historique des diagraphies réalisées à *Barcarès* car des données datant de 2014 et 2018 m'ont été transmises. Le site de Saint Cyprien est plus récent, développé dans le cadre de DEM'EAUX. J'ai réalisé des diagraphies dans de nouveaux puits qui ne possédait pas, en conséquence, de données préalables. Ces missions de terrain m'ont permis de comprendre le fonctionnement des différents outils. Leur principe de fonctionnement est résumé ci-dessous.

Comme expliqué précédemment, les diagraphies sont réalisées grâce à un outil de mesure qui est progressivement descendu ou remonté dans un puit de forage à l'aide d'un treuil équipé d'un câble muni de lignes électriques. La sonde effectue des mesures pendant son transit et celles-ci sont transmises à une centrale d'acquisition via le câble du treuil. Divers outils peuvent être connectés via le pied de câble standard (*CF IMG*).

Si jamais l'outil devait se coincer dans le puit, le câble est conçu pour céder au niveau de la tête dès 600 kg de charge. Cela permet dans ce cas de perdre uniquement l'outil et de ne pas condamner le puit avec le câble. Les données récoltées par la centrale d'acquisition sont associées à leurs profondeurs respectives, transmises et enregistrées sur un PC.

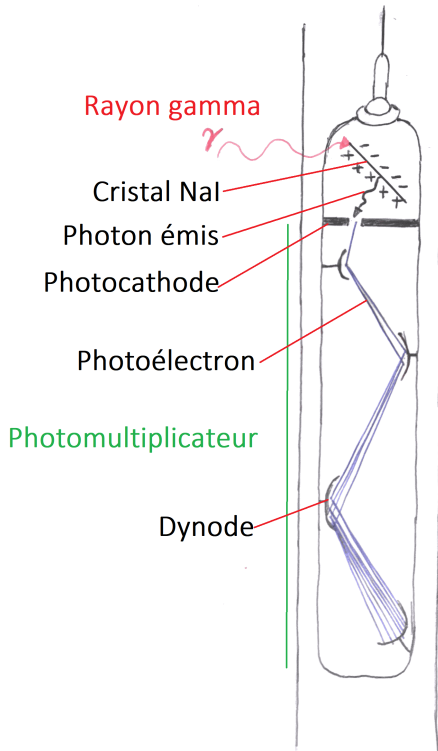
Lors des missions sur le terrain, j'ai utilisé 3 types d'outils : un pour la conductivité électrique par induction, un outil de mesure spectrale du rayonnement gamma et une sonde multi-paramètres permettant de caractériser le fluide en forage (ρ , T, Cw, Eh, pH).

Sonde multi-paramètres



Radioactivité naturelle spectrale (“Gamma Ray”)

La diagraphie de rayon gamma spectrale enregistre à la fois le rayonnement total et permet de distinguer les différents éléments radioactifs : Uranium (U), Potassium (K) et Thorium (Th). Ceci par opposition au log gamma ray classique qui mesure uniquement le rayonnement total. Le log spectral va permettre d'identifier la source d'anomalies dues à la présence de couches relativement plus radioactives. L'avantage de ce type de diagraphie est qu'il fonctionne à travers les parois en acier, ciment ou PVC des forages tubés. Bien que le béton et l'acier absorbent une partie du rayonnement gamma, une quantité suffisante est détectée à travers pour permettre des déterminations qualitatives. Un tube PVC affecte lui très peu le rayonnement gamma.



Le principe général de la méthode est celui de l'émission d'une impulsion électrique lors de la traversée d'un cristal photo sensible par un photon. Dans le cas de la sonde Antarès, le rayon gamma incident produit un photon qui entre en contact avec un cristal germanate de Bismuth (BGO). Le photon est capté par une photocathode qui produit une impulsion électrique d'amplitude proportionnelle à l'énergie du rayon gamma incident après amplification à l'aide d'un photomultiplicateur.

En accumulant un histogramme de ces signaux au cours du temps, on peut déterminer leur source. En effet l'énergie d'un rayon gamma dépend de sa source. Chacun des éléments radioactifs naturels standard (K, U et Th) émet un spectre de rayons gamma d'énergie bien identifiable lorsqu'il se désintègre. Le potassium ne libère qu'un seul type de rayons gamma, puis se désintègre à d'autres éléments également radioactifs, et qui émettent donc d'autres rayons gamma, et ainsi de suite. Cela permet grâce à un outil de gamma ray spectral de détecter les couches argileuses et d'obtenir des spectres qui sont caractéristiques des différents minéraux d'argileux.

Conductivité électrique par induction (et susceptibilité magnétique)

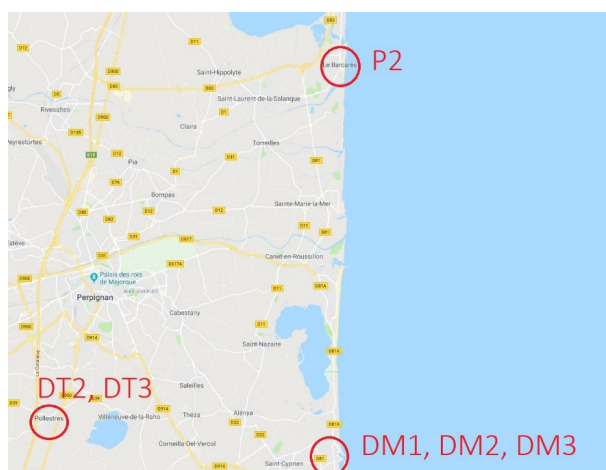
La méthode de mesure de conductivité électrique par induction est un procédé qui permet de mesurer la conductivité d'un milieu poreux dans les puits ouvert ou à travers un tubage PVC. Son principe se base sur l'utilisation de l'induction électromagnétique. Il s'agit de la création d'un de champ magnétique primaire issu de la circulation d'un courant à 10 kHz dans un solénoïde émetteur au sein de l'outil. Ce champ magnétique primaire induits des courants électriques dans le milieu poreux, de façon concentrique par rapport à l'axe du forage. Ces courants induits dans les différentes couches sont source d'un champ magnétique secondaire qui lui-même induit un courant électrique selon les lois de Maxwell dans un solénoïde récepteur situé dans l'outil. Par couplage direct entre solénoïdes émetteur et récepteur, une détection des argiles par mesure de la susceptibilité magnétique du milieu est également obtenue lors de ces mesures.

Résultats

Bien que le projet s'étende sur divers forages répartis sur la plaine du Roussillon, j'ai travaillé durant mon stage sur deux zones d'études :

- celle de Barcarès, où un seul forage reste exploitable, le P2 de 80 m de profondeur. Ce forage a été réalisé lors du projet Grain d'sel et permet d'avoir accès à des archives de données datant de 2014, permettant ainsi de réaliser un comparatif sur quelques années. Ce site se trouve dans la zone à surveiller où l'on retrouve parfois des taux de chlorures localement très élevés.
- celle de Saint Cyprien sur mer où j'ai effectué des mesures dans les forages Dem'mer 1 (ou DM1), Dem'mer 2 (DM2) et Dem'mer 3 (DM3).

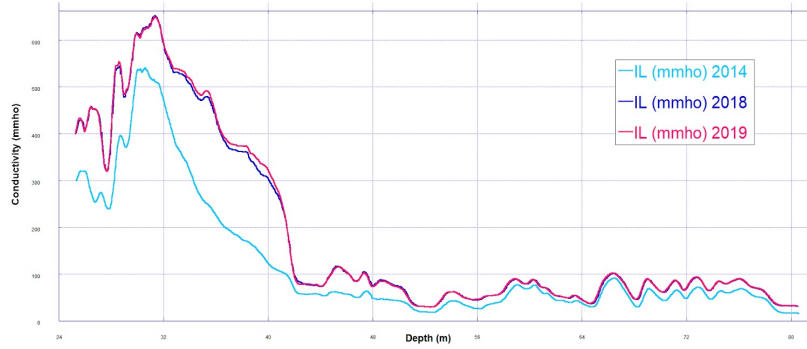
Ces forages venant juste d'être réalisés, ont permis l'enregistrement de mesures répétées sur de très courtes durées. Les différents puits se trouvant relativement proches ont permis d'effectuer un comparatif inter puit. Ces données seront archivées et permettront dans plusieurs années de réaliser un comparatif sur plusieurs années. Cette zone se trouve d'après le syndicat mixte pour la protection et la gestion des nappes sur un site moins impacté par les intrusions salines dans le Pliocène qu'au Barcarès.



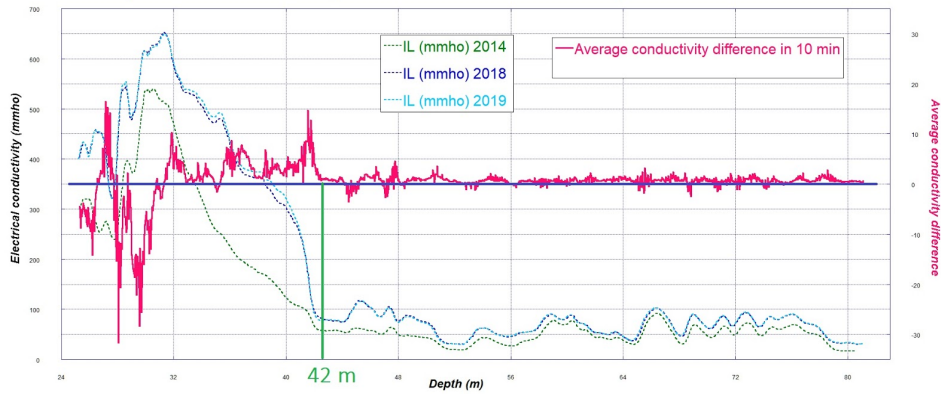
Etant donné que les mesures sur DT2, DT3 et DM2 ont été reportées à cause de problèmes techniques et ont été effectuées juste avant la date de rendu de ce rapport, je n'exposerai dans ce rapport que les résultats obtenus pour le P2 de Barcarès et DM3 de Saint Cyprien. DM1 quant à lui étant uniquement dans le Quaternaire, n'a d'intéressant que les données issues de la multisonde que je n'ai pas récupérées à temps pour ce rapport. Les données de radioactivité ne sont également pas présentées car sont bien plus longues à traiter que les données de conductivité.

Ci-joint sont donc présentés des graphiques d'interprétation des données de conductivité par induction issus de P2 et DM3.

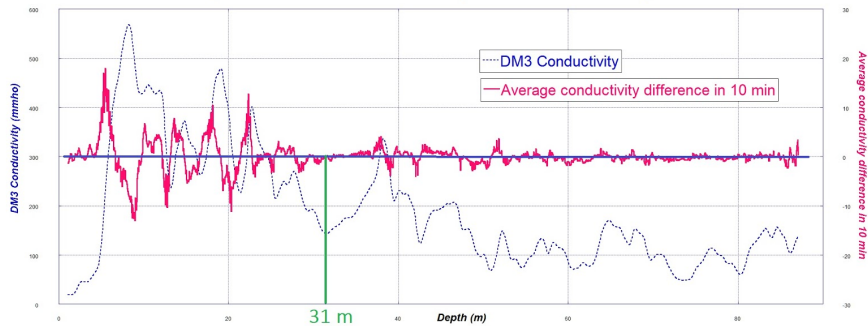
Evolution of P2 conductivity between 2014 and 2019



Conductivity difference in 10 min compared to the evolution of conductivity between 2014 and 2019 of the P2 well



Conductivity difference in 10 min with respect to the conductivity of the DM3 well



La valeur de conductivité de ces graphiques ne peut à ce stade donner d'information sur le taux de sels minéraux dans l'eau des différents aquifères car, comme le montre l'équation de Waxman et Smits, cette valeur pourrait être sous-estimée à cause de la porosité et de sa géométrie ou surestimée à cause de la conductivité liée aux argiles. Les données du conductivimètre de la multisonde dans un puit donneraient quant à elles des informations sur la proportion de sels minéraux de l'aquifère dans lequel se trouve la crépine.

Le graphique G1 montre l'évolution de la conductivité dans le puit P2 depuis 2014 jusqu'aux dernières mesures effectuées en 2019. On voit que les courbes 2018 et 2019 sont presque semblables avec une légère évolution entre 30 et 40 m de profondeur qui peut laisser penser à une évolution de la salinisation sachant que cette variation peut-être également due à une variation légère de la porosité par une érosion des pores. Cela suppose donc qu'il y ait des écoulements à ce niveau. On peut également supposer que l'aquifère situé jusqu'à 44 m de profondeur au niveau de P2 avec une forte diminution de conductivité et un plateau pouvant correspondre à la couche d'argile séparant le Quaternaire de l'aquifère du Pliocène Continentale. Il est intéressant d'observer l'évolution de la conductivité entre 2014 et 2018 dans cette zone supposée correspondre au Quaternaire. On observe une assez forte évolution pendant ces 4 ans, bien plus forte proportionnellement qu'entre 2018 et 2019. La plus forte augmentation se trouve entre 30 et 40 m de profondeur comme sur les derniers résultats. Cela montre clairement une zone

d'écoulement qui va être plus sensible aux intrusions salines. La nappe du Pliocène continental semble globalement bien protégée à ce niveau malgré une légère augmentation générale sur 5 ans. Cette légère augmentation généralisée pourrait s'expliquer par les pompages qui se font majoritairement dans cette aquifère. Si les taux de recharge de la nappe sont trop longs, le gradient hydraulique entre la nappe et la mer diminue. La loi de Darcy nous informe donc que le débit d'eau salée à travers les couches argileuses augmente et très lentement (dû aux très faibles perméabilités) salinise l'aquifère.

Le graphique G2 présente les données de Time Laps Logging (TLL) sur P2 en dix minutes. Il s'agit de la différence de conductivité entre deux mesures espacées de dix minutes, et qui ne peuvent donc venir que d'une très légère modification des propriétés de l'eau poreuse (salinité et/ou température) sur cette durée, mettant en évidence un écoulement. Cela permet donc de caractériser les zones où il y a potentiellement des écoulements comme exposé précédemment. La bande bleue horizontale représente le zéro. Plus la courbe rouge s'éloigne de cette ligne, plus la variation de conductivité entre les temps t_1 et t_2 est forte. Ces résultats corroborent l'hypothèse que le fond de l'aquifère du Quaternaire se trouve vers les 42 m de profondeur. En effet, les fortes variations avant cette profondeur peuvent correspondre à de potentiels écoulements ce qui est classique d'une nappe du Quaternaire, lieu de beaucoup d'échanges. Zone où semble se trouver l'aquifère du Pliocène ne montre pas de variation de conductivité conséquentes. Les faibles variations ont plus de chance d'être dues au bruit de fond de la sonde. Il pourrait être intéressant d'aller placer la sonde au niveau des variations les plus fortes et d'observer l'évolution à ces points précis dans le temps pour tenter d'identifier des zones d'écoulement majeur qui seraient potentiellement plus sensibles aux intrusions de sel.