

Document public

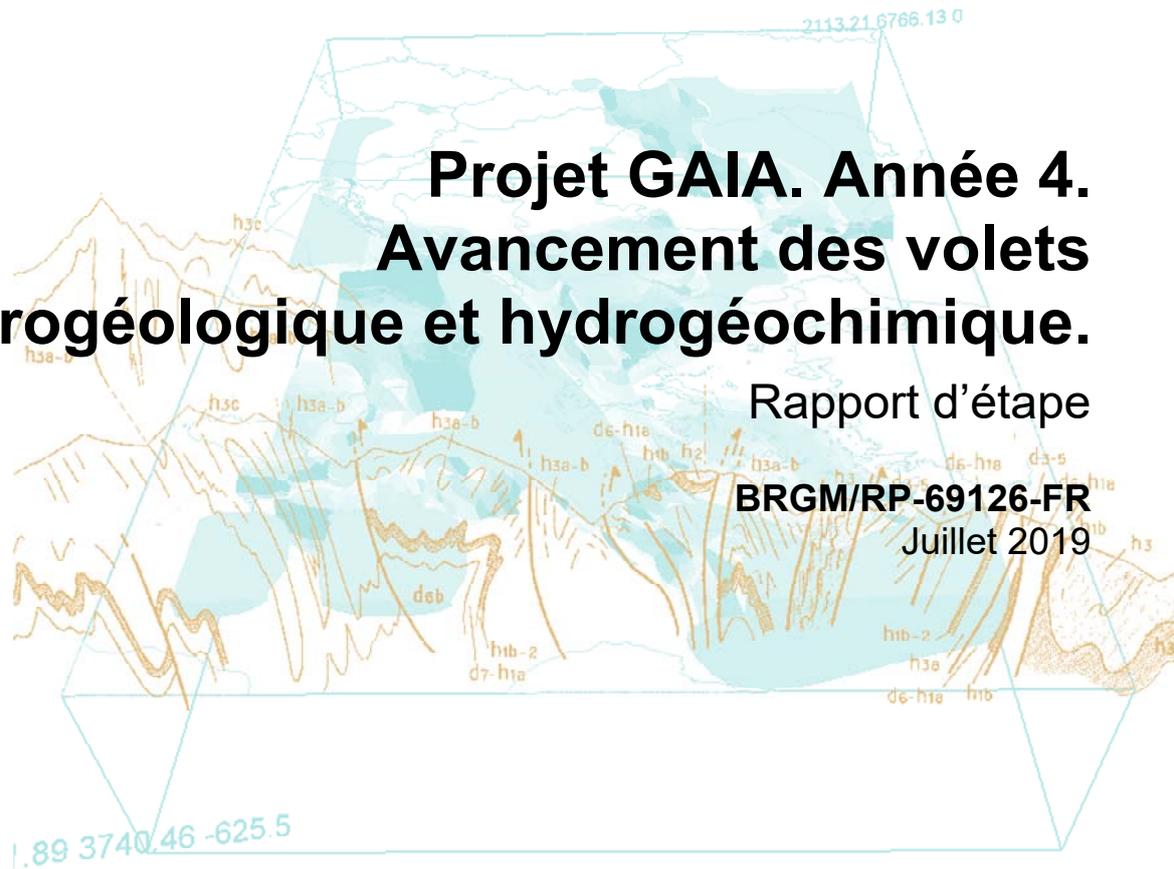


# Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique.

Rapport d'étape

BRGM/RP-69126-FR

Juillet 2019





# Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique.

Rapport d'étape

**BRGM/RP-69126-FR**

Juillet 2019

Étude réalisée dans le cadre du projet  
de Recherche du BRGM PDR13AQI02

**André L., Cabaret O., Douez O., Saplairoles M., Wulleumier A.**

**Vérificateur :**

Nom : Luc ARNAUD

Fonction : Hydrogéologue

Date : 18/07/2019

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Nicolas PEDRON

Directeur du BRGM Nouvelle-  
Aquitaine

Date : 16/09/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

**Mots-clés** : Hydrogéologie, Aquitaine, Occitanie, Sables Infra-Molassiques, Paléocène, Crétacé Supérieur, Perméabilité, Datation, Piézométrie, Température, Minéralisation, Prélèvements.

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

**André L., Cabaret O., Douez O., Saplairoles M., Wulleumier A.** (2019) - Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéo-chimique. Rapport d'étape. BRGM/RP-69126-FR, 121 p., 82 ill., 12 ann.

## Synthèse

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du programme scientifique GAIA, programme financé par Teréga (ex. TIGF), l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et le BRGM, et piloté par le BRGM. Ce programme vise l'amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain, s'inscrivant en cela dans la lignée des travaux de recherche conduits au cours des vingt dernières années sur ces aquifères.

Le présent rapport restitue cinq études hydrogéologiques ou hydrogéochimiques, conduites en 2017 et 2018, dans le cadre du programme scientifique GAIA. Il s'agit :

- de la poursuite de la constitution de la base de données des prélèvements dans les aquifères profonds ;
- de l'acquisition de données en vue de l'établissement de cartes piézométriques des Sables Infra-Molassiques (SIM), au travers de campagnes de mesures et de collectes de données ;
- de l'évaluation de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou dans les Petites Pyrénées ;
- d'une évaluation des effets de la thermique et de la minéralisation sur la piézométrie ;
- d'une étude de l'âge des eaux souterraines dans les aquifères profonds au travers de la mise en œuvre d'outils isotopiques.

Chacune de ces études constitue une brique de connaissance destinée à venir alimenter, à terme, la construction et le calage du modèle hydrodynamique des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain.

Concernant la base des prélèvements, la collecte de données annuelles s'est poursuivie pour les années récentes (jusqu'à 2017), tandis que des prélèvements mensuels ont été collectés afin de permettre une ventilation des volumes prélevés à un pas de temps plus fin.

Dans le but d'établir une cartographie piézométrique de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques, une campagne de mesures et de collectes de données a été conduite entre septembre 2017 et avril 2018. Cette période de temps particulièrement étendue reflète la volonté de rendre compte de la dynamique de propagation de la pression issue des cycles de stockage et de déstockage du gaz à Lussagnet et Izaute (amplitudes et durées des fluctuations), en établissant des cartes piézométriques mensuelles sur l'ensemble de la période. Les données ont été acquises et préparées en vue de l'établissement de ces cartes piézométriques. Elles seront établies dans la suite du programme GAIA.

Les investigations conduites dans les poudingues de Palassou ont permis de proposer une première caractérisation de différents faciès, rencontrés au sein de cette formation. Cette caractérisation a été conduite sous la forme d'essais de perméabilité, réalisés dans des sondages peu profonds. Complétant les données acquises en 2016 sur les argiles à graviers, ce deuxième volet de l'étude de la recharge (indirecte) des SIM permet de mieux cerner les possibilités de recharge de l'aquifère sablo-gréseux, dans une de ses parties les plus amont.

L'effet de la température et de la minéralisation sur la piézométrie est connu des hydrogéologues : différentes lois mathématiques permettent d'en rendre compte. La difficulté porte en réalité sur les hypothèses à prendre en compte dans l'application de ces lois. Ainsi et en particulier, il s'agit de tenter de préciser quelle dynamique de retour à l'équilibre est rencontrée dans un ouvrage qui vient d'être sollicité par un pompage. Si le retour à l'équilibre de la température est assez rapide

et rejoint le gradient géothermique, la bibliographie est peu fournie en ce qui concerne la minéralisation, dont on observe qu'elle peut présenter une stratification marquée au sein de la colonne d'eau. Des investigations conduites sur des forages profonds du sud du Bassin aquitain (Polastron 101 en particulier) mettent bien en avant ce phénomène, dont l'évolution dans le temps demeure néanmoins à préciser.

Les datations au carbone-14, effectuées sur les eaux prélevées dans plusieurs forages profonds en janvier 2017, indiquent que celles-ci sont pour la plupart sensiblement plus anciennes que ce qui avait été décrit jusqu'à présent, avec des temps de résidence compris entre 20 000 et 50 000 ans, pour les plus anciennes. Des eaux singulièrement plus « jeunes » sont rencontrées à Castéra-Verduzan et présentent, relativement aux données antérieures, un rajeunissement probablement dû à un mélange avec des eaux plus récentes que celles rencontrées dans les aquifères profonds. La baisse de la piézométrie au voisinage de la structure anticlinale pourrait être un facteur explicatif de cette situation.

Enfin, les données acquises sur le chlore-36 ne permettent pas d'affiner l'âge des eaux, puisque ces eaux ne sont pas assez « anciennes » pour que l'on ait une décroissance du chlore-36. Cependant, ces mesures permettent d'apporter un nouvel éclairage sur les potentiels échanges entre l'aquifère des Sables et les aquifères adjacents ou les épontes. En effet, ces mesures permettent de montrer des processus de dilution/enrichissement en chlore et chlore-36, qui pourraient être dus à des mélanges avec des eaux présentes dans les horizons proches de l'aquifère sablo-gréseux.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Consolidation de la base des volumes prélevés.....</b>	<b>15</b>
2.1. CONSOLIDATION DE LA BASE DES VOLUMES PRÉLEVÉS ANNUELS .....	15
2.1.1. Les prélèvements agricoles.....	17
2.1.2. Les prélèvements AEP .....	18
2.1.3. Les prélèvements industriels .....	19
2.1.4. Les prélèvement thermaux.....	20
2.2. COMPILATION DES VOLUMES MENSUELS .....	20
2.2.1. Volumes agricoles .....	20
2.2.2. Autres usages (AEP, industriels et thermalisme) .....	23
<b>3. Acquisition de données en vue de l'établissement de cartes piézométriques .....</b>	<b>25</b>
3.1. OBJECTIF .....	25
3.2. SÉLECTION INITIALE DES POINTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DES CARTES PIÉZOMETRIQUES ENTRE SEPTEMBRE 2017 ET AVRIL 2018 .....	25
3.3. COLLECTE DES DONNÉES.....	27
3.4. TRAITEMENT DES DONNÉES.....	27
3.4.1. Changement de dynamique de certains ouvrages .....	27
3.4.2. Ouvrages prélevés ou subissant l'influence de prélèvements.....	29
3.4.3. Ouvrages présentant des lacunes de mesures .....	32
3.4.4. Cas particulier du forage du Masca (09546X0022/F).....	36
3.4.5. Correction de la piézométrie selon la température et/ou la minéralisation de l'eau présente dans les forages .....	37
<b>4. Évaluation de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou .....</b>	<b>39</b>
4.1. CONTEXTE ET OBJECTIF .....	39
4.2. PRÉSENTATION GÉOLOGIQUE SYNTHÉTIQUE DE LA FORMATION DES POUDINGUES DE PALASSOU .....	39
4.3. RECONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES DE TERRAIN .....	45
4.4. SÉLECTION DES SITES ET MISE EN ŒUVRE DES CAMPAGNES DE MESURE .....	49
4.4.1. Sélection des sites pour la réalisation des essais de perméabilité.....	49
4.4.2. Principes des méthodes employées.....	49
4.4.3. Mises en œuvre des campagnes de mesures.....	52
4.5. ANALYSE DES RÉSULTATS.....	54

4.6. DISCUSSION .....	59
4.6.1. Série de Palassou .....	59
4.6.2. Comparaison avec les résultats de perméabilité obtenus pour la formation des argiles à graviers .....	59
<b>5. Effets de la thermique et de la minéralisation sur la piézométrie .....</b>	<b>61</b>
5.1. THERMIQUE ET DENSITÉ DANS LES FORAGES PROFONDS - APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE .....	62
5.1.1. Calcul de la charge hydraulique dans un forage profond .....	62
5.1.2. Approche numérique pour sérier les effets de la température et de minéralisation de l'eau sur une colonne d'eau d'un forage .....	67
5.1.3. Evolution de la température et de la minéralisation sur les forages du sud du Bassin aquitain .....	71
5.1.4. Retour à l'équilibre thermique .....	78
5.1.5. Autres facteurs impactant les niveaux piézométriques .....	79
5.2. PROCESSUS MÉCANIQUES AU SEIN DE LA COLONNE D'EAU .....	79
5.2.1. La convection monotone .....	81
5.2.2. Approche théorique des mécanismes .....	82
5.2.3. Influence de la convection interne sur l'échantillonnage .....	83
5.3. SYNTHÈSE .....	83
<b>6. Datation des eaux souterraines .....</b>	<b>85</b>
6.1. INTRODUCTION .....	85
6.2. DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES ET COMPOSITIONS CHIMIQUES .....	85
6.3. LES ISOTOPES DE LA MOLÉCULE DE L'EAU .....	88
6.4. PRINCIPE DE BASE DE LA DATATION RADIOCARBONE .....	89
6.4.1. Principe de base de la datation radiocarbone .....	89
6.4.2. Données du Bassin aquitain .....	90
6.4.3. Modèles d'âge apparent des eaux .....	97
6.5. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LE CHLORE-36 .....	100
6.5.1. Le cycle hydrologique du chlore-36 .....	100
6.5.2. Facteurs impactant la mesure de chlore-36 .....	102
6.5.3. Limites des datations des eaux par le chlore-36 .....	103
6.5.4. Echantillonnage et analyse .....	104
6.5.5. Résultats des mesures de Chlore-36 pour le Bassin aquitain .....	104
6.5.6. Corrélations avec la nature des horizons captés .....	109
6.6. SYNTHÈSE .....	110
<b>7. Conclusions .....</b>	<b>113</b>

## 8. Bibliographie .....115

### Liste des illustrations

Illustration 1 - Répartition géographique, et par aquifère, des 175 ouvrages de la base des volumes GAIA, exploités, temporairement ou non, au cours de la période 1970-2016 .....	16
Illustration 2 - Nombre de volumes renseignés, par année, pour l'ensemble des ouvrages exploitables et pour la période 1970-2016.....	17
Illustration 3 - Volumes totaux prélevés dans les aquifères cibles du sud du Bassin aquitain (répartition entre volumes réels et volumes estimés) .....	17
Illustration 4 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour un usage agricole - Répartition par type de volume .....	18
Illustration 5 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour l'AEP - Répartition par type de volume	19
Illustration 6 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour un usage industriel - Répartition par type de volume .....	19
Illustration 7 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour un usage thermal - Répartition par type de volume .....	20
Illustration 8 - Tableau de répartition des volumes prélevés mensuellement, lors des campagnes d'irrigation 2016, 2017 et 2018 .....	21
Illustration 9 - Tableau de répartition des volumes prélevés dans les 14 ouvrages, ayant en commun d'avoir fait l'objet de collectes de prélèvements mensuels, à chacune des campagnes d'irrigation .....	21
Illustration 10 - Ventilation mensuelle des prélèvements agricoles des 14 ouvrages communs aux campagnes d'irrigation 2016, 2017 et 2018 et précipitations journalières associées .....	23
Illustration 11 - Tableau synthétique des précipitations (mm) intervenues au cours des périodes d'irrigation 2016 à 2018 .....	23
Illustration 12 - Etat d'avancement de la collecte des volumes mensuels des ouvrages exploités pour l'AEP, l'industrie et le thermalisme .....	24
Illustration 13 - Carte de répartition des 105 points sélectionnés pour la recherche de données piézométriques mensuelles, entre septembre 2017 et avril 2018. Les 14 ouvrages ayant fait l'objet de mesures piézométriques, autour de la structure d'Audignon, sont également représentés. ....	26
Illustration 14 - Chronique piézométrique de Polastron et poursuite de la tendance à la baisse .....	28
Illustration 15 - Ecart obtenu entre la piézométrie enregistrée par le capteur et celle obtenue d'après la tendance observée dans le forage de Polastron (10082X0001) .....	29
Illustration 16 - Chronique piézométrique de Beaucaire : évaluation des tendances à la baisse .....	30
Illustration 17 - Chronique piézométrique de Gondrin et évaluation du niveau statique.....	31
Illustration 18 - Chronique piézométrique de Valdurenque et mesures mensuelles associées.....	32
Illustration 19 - Chronique piézométrique de Burosse-Mendousse et évaluation des niveaux piézométriques au-delà de 108,19 m NGF.....	33
Illustration 20 - Piézométrie de Nogaro 1 & Nogaro 2 : reconstitution des données manquantes .....	34
Illustration 21 - Piézométrie de Castelnau-Magnoac : reconstitution des données manquantes .....	35
Illustration 22 - Tableau des ouvrages présentant au moins une mesure de niveau manquante .....	36

Illustration 23 - Piézométrie du forage du Masca (source : ADES).....	37
Illustration 24 - Modèle de sédimentation de la série du poudingue de Palassou, d'après B. Crochet (1991).....	40
Illustration 25 - Localisation de la série de Palassou, d'après B. Crochet (1991).....	41
Illustration 26 - Unités tectono-sédimentaires, définies par B. Crochet (1991).....	43
Illustration 27 - Unités tectono-sédimentaires des territoires ariégeois et haut-garonnais .....	46
Illustration 28 - Tableau de répartition des types de points d'observation de terrain, en fonction des unités/membres de la série de Palassou.....	47
Illustration 29 - Localisation des points de reconnaissances hydrogéologiques effectuées sur les différentes unités/membres de la série de Palassou.....	48
Illustration 30 - Carte de localisation des sites investigués pour les campagnes de mesures de perméabilité de la série de Palassou (Ariège - Haute-Garonne).....	50
Illustration 31 - Schéma de principe de l'essai Nasberg-Terletskata .....	52
Illustration 32 - Photographies de mises en œuvres des campagnes de mesures pour la réalisation des essais de perméabilité par la méthode de Nasberg – Terletskata .....	53
Illustration 33 - Résultats des mesures de perméabilité de la série de Palassou (Ariège - Haute-Garonne) obtenus lors des campagnes de mars et avril 2018 .....	54
Illustration 34 - Répartition des valeurs moyennes de perméabilité mesurées lors des campagnes de mars/avril 2018 (éch. logarithmique) en fonction des sites et des unités/membres de la série de Palassou .....	55
Illustration 35 - Répartition des valeurs moyennes de perméabilité des différentes unités/membres de la série de Palassou, en Ariège et Haute-Garonne (campagnes de mesures de mars et avril 2018).....	57
Illustration 36 - Répartition des valeurs moyennes de perméabilité mesurées lors des campagnes de mars et avril 2018 (échelle logarithmique), en fonction du faciès lithologique dominant, dans la tranche de terrain investigué.....	58
Illustration 37 - Représentation schématique de la charge « équivalent eau douce ».....	63
Illustration 38 - Représentation schématique de l'écart entre les équivalents eau douce calculés pour 2 profondeurs différentes d'un même piézomètre .....	64
Illustration 39 - Variation des valeurs de l'équivalent eau douce $h_f$ (en m) calculé d'après l'équation (Eq. 1) pour $h = 0$ en fonction de $p_i$ et $z_i$ . La ligne en pointillé représente l'erreur minimum associée à la mesure piézométrique (0,20 m) (d'après Post et al., 2007). .....	65
Illustration 40 - Représentation schématique de la charge équivalent eau douce ramenée à une profondeur de référence $h_{f,i/ref}$ .....	66
Illustration 41 - Influence de la température de l'eau sur la piézométrie (en m) pour différentes hauteurs de colonne d'eau : température constante de la colonne et température fonction d'un gradient de température imposé .....	69
Illustration 42 - Influence de la température de l'eau et de la minéralisation sur la piézométrie (en m) pour différentes hauteurs de colonne d'eau.....	69
Illustration 43 - Compressibilité isotherme de l'eau pure (Gravier, 1986) .....	70
Illustration 44 - Masse volumique de l'eau pure en fonction de la température (données Kell, 1975).....	70
Illustration 45 : (a) Variation avec la profondeur de la température (en bleu) selon un gradient de $25^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ et une température en surface de $10^{\circ}\text{C}$ , de la densité de l'eau à la température $T$ (en vert) et de la densité de l'eau moyenne entre $Z=0$ et $z=z_i$ . (b) Charge calculée selon que la densité de la colonne d'eau est de $998,2 \text{ kg.m}^{-3}$ ou $1\ 000 \text{ kg.m}^{-3}$ .....	71

Illustration 46 - Gradients géothermiques mesurés dans différents piézomètres profonds du Bassin aquitain (Fabris et Roche, 1978) .....	72
Illustration 47 - Log géologique validé du forage de Polastron 101 (10082X0001) - Données issues de la BSS le 07/03/2018 .....	73
Illustration 48 - Diagraphies physico-chimiques réalisées dans le forage de Polastron 101 (10082X0001) avant et après pompage, entre le 9 et le 16 septembre 2017 .....	74
Illustration 49 - Diagraphies de production au repos et en pompage dans le forage de Saint-André .....	76
Illustration 50 - Diagraphies de conductivité-température dans le forage de Lacquy, après pompage .....	77
Illustration 51 - Modèle semi-conducteur analytique pour quantifier la distribution radiale de l'évolution de la température dans les puits géothermiques, à des profondeurs différentes (Suarez Ariaga et Samaniego, 1999) .....	79
Illustration 52 - Fonctionnement d'une instabilité gravitaire oscillatoire (d'après Reichart, 2015) .....	80
Illustration 53 - Schéma (a) des convections forcées dues au gradient hydraulique et (b) des cellules de convection libres dues au gradient de température dans un puits d'observation d'eau souterraine (Berthold et Börner, 2008) .....	81
Illustration 54 - Développement de digitations à partir de l'ajout d'eau chaude salée au sommet d'une couche homogène d'eau froide peu minéralisée (Turner, 1973) .....	82
Illustration 55 - Carte des forages d'eau échantillonnés, lors de la campagne du 9 au 12 janvier 2017 .....	85
Illustration 56 - Mesures des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées lors de la campagne de janvier 2017 .....	86
Illustration 57 - Compositions chimiques en éléments majeurs des eaux échantillonnées lors de la campagne de janvier 2017 .....	87
Illustration 58 - Compositions chimiques en éléments traces des eaux échantillonnées lors de la campagne de janvier 2017 .....	87
Illustration 59 - Diagramme $\delta D$ vs. $\delta^{18}O$ pour les eaux analysées lors de la campagne de janvier 2017 (symboles rouges) et des eaux du même secteur géographique, mesurées lors de campagnes précédentes (symboles verts). Les symboles oranges correspondent aux valeurs moyennes enregistrées pour les eaux de pluie à Dax, entre 1997 et 2003 (Millot et al., 2010). La droite météorique mondiale (Craig, 1961) est représentée par la droite noire en trait plein, et la droite météorique de Dax est représentée en pointillés. ....	88
Illustration 60 - Dispositif de prélèvement des eaux pour les mesures de carbone 13 et 14 : à gauche selon une méthode traditionnelle (flacons en polyéthylène) et à droite dans des capsules en inox .....	91
Illustration 61 - Mesures de carbone-13 et carbone-14, dans les eaux échantillonnées dans le Bassin aquitain en janvier 2017 .....	91
Illustration 62 - Comparaison des résultats en carbone 13 et 14 entre deux types de prélèvement des eaux : en capsule inox (= prélèvement inox) et en flacons plastiques (= prélèvement traditionnel). A gauche, les activités en carbone-14 et à droite, le $\delta^{13}C$ .....	92
Illustration 63 - Données de composition en carbone-13, des eaux issues d'anciennes études (Anciennes données) et mesurées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (Nouvelles données) .....	93
Illustration 64 - Activité en carbone-14 des eaux issues d'anciennes études (Anciennes données) et mesurées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (Nouvelles données) .....	93
Illustration 65 - Activité en carbone-14 vs $\delta^{13}C$ des eaux prélevées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 .....	94

Illustration 66 - Carte des activités en carbone-14 (exprimées en pCm) des eaux prélevées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (valeurs en rouge). Les valeurs vertes correspondent à des mesures réalisées au cours de précédentes campagnes d'échantillonnage. ....	95
Illustration 67 - Composition en éléments majeurs des eaux de Castéra-Verduzan .....	96
Illustration 68 - Evolution temporelle de la concentration en hydrogencarbonates dans les eaux de Castéra-Verduzan .....	97
Illustration 69 - Estimation de l'âge apparent des eaux de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques selon différents modèles.....	98
Illustration 70 - Evolution paléoclimatique : évolution entre les températures d'infiltration estimées et l'âge apparent corrigé des eaux des Sables Infra-Molassiques.....	99
Illustration 71 - Reconstitutions paléoclimatiques pour les derniers 90 ka, à partir des stalagmites de la grotte de Villars. Comparaison avec les reconstructions de température faites à partir des grains de pollen du lac du Bouchet et le $\delta^{18}O$ du forage NGRIP au Groenland (d'après Genty, 2012). ....	100
Illustration 72 - Représentation schématique du cycle hydrologique du chlore-36 (Les valeurs numériques données ne sont pas représentatives.).....	101
Illustration 73 - Carte, établie à partir de données empiriques, de la répartition spatiale du ratio $^{36}Cl/Cl$ dans les précipitations aux Etats-Unis (Davis et al., 2003) .....	101
Illustration 74 - Carte de la répartition spatiale du ratio $^{36}Cl/Cl$ dans les précipitations européennes (Johnston and McDermott, 2008) .....	102
Illustration 75 - Variation de l'activité en $^{14}C$ et du ratio $^{36}Cl/Cl$ avec la distance pour deux aquifères (Ojo Alamo et Nacimiento) du Bassin de San Juan (USA) (Phillips, 2000; Plummer, 1996 ; Stute et al. 1995).....	104
Illustration 76 - Cl versus Na avec la droite de dissolution de la halite (a) ; Cl versus Ca avec la droite de dissolution du $CaCl_2$ (b) ; $SO_4$ versus Ca avec la droite de dissolution du gypse (c) ; Cl versus Br avec la droite de dilution de l'eau de mer (d) .....	105
Illustration 77 - Mesures de chlore-36 dans les eaux échantillonnées dans le Bassin aquitain en janvier 2017 .....	106
Illustration 78 - Evolution du rapport $^{36}Cl/Cl$ en fonction de la teneur en chlore total dans les eaux (à gauche) et de l'inverse de la concentration (à droite).....	106
Illustration 79 - Carte du rapport $^{36}Cl/Cl$ (exprimé en $10^{-15}$ at/at) des eaux prélevées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (valeurs en rouge) .....	107
Illustration 80 - Evolution de la teneur en $^{36}Cl$ en fonction de la distance aux zones d'affleurement sur les contreforts pyrénéens .....	108
Illustration 81 - Evolution du rapport $^{36}Cl/Cl$ en fonction de $\delta^{13}C$ .....	109
Illustration 82 - Nature des épontes supérieures, inférieures (lorsqu'elles ont été atteintes), descriptif et profondeur de l'aquifère et profondeur de la crépine pour l'ensemble des eaux échantillonnées .....	110

## Liste des annexes

Annexe 1 Correspondance entre les anciens et nouveaux codes BSS des ouvrages de la base des volumes .....	123
Annexe 2 Ouvrages écartés de la base des prélèvements en raison de leur non-influence directe sur les aquifères.....	125

Annexe 3 Répartition par aquifère des ouvrages de la base des volumes GAIA & chroniques des prélèvements associés .....	127
Annexe 4 Récapitulatif du nombre de volumes mensuels disponibles par année des 125 ouvrages à usage non agricole.....	135
Annexe 5 Liste des 119 ouvrages présélectionnés pour l'établissement des cartes piézométriques mensuelles.....	139
Annexe 6 Piézométries reconstituées d'après la tendance initiale et calcul des écarts avec les mesures enregistrées dans les forages de Lacquy et Saint-Cricq .....	141
Annexe 7 Tableau des mesures piézométriques corrigées des effets de température et/ou de densité (selon la minéralisation totale) .....	143
Annexe 8 Tableau des données acquises lors des campagnes de reconnaissances hydrogéologiques de terrain de la formation des poudingues de Palassou .....	147
Annexe 9 Levés géologiques et paramètres de forage des 7 sondages forés pour la mise en œuvre des essais de perméabilité de la formation des poudingues de Palassou.....	155
Annexe 10 Fiches de synthèse de l'ensemble des sites de mesures de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou par la méthode du perméamètre de Guelph .....	163
Annexe 11 Nappes profondes et effets de la température.....	181
Annexe 12 Calcul de la charge d'eau douce équivalente à la charge mesurée à chaud (J.J. Seguin)...	185



# 1. Introduction

Le programme scientifique GAIA a pour vocation d'améliorer la connaissance géologique et hydrogéologique des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain. Programme pluriannuel, il prévoit en particulier la construction et le calage d'un modèle hydrogéologique, permettant de représenter les écoulements dans ces différents aquifères. Dans cette optique, il comporte une phase d'étude relative à des questions spécifiques de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochimie des aquifères éocènes à crétacés de cette zone géographique.

L'objet de ce rapport est de restituer un certain nombre des actions conduites dans ce domaine, de 2017 à 2018. Elles sont au nombre de cinq ; il s'agit :

- de la poursuite de la constitution de la base de données des prélèvements dans les aquifères profonds (cf. chapitre 2) ;
- de l'acquisition de données en vue de l'établissement de cartes piézométriques des Sables Infra-Molassiques, au travers de campagnes de mesures et de collectes de données (cf. chapitre 3) ;
- de l'évaluation de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou dans les Petites Pyrénées (cf. chapitre 4) ;
- d'une évaluation des effets de la thermique et de la minéralisation sur la piézométrie (cf. chapitre 5) ;
- d'une étude de l'âge des eaux souterraines dans les aquifères profonds au travers de la mise en œuvre d'outils isotopiques (cf. chapitre 6).

Il convient de noter que ce rapport ne vise pas à être exhaustif de l'ensemble des actions conduites dans le domaine de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochimie, dans le cadre du programme GAIA en 2017 et 2018 ; certaines d'entre elles ayant fait l'objet d'une documentation séparée. Ainsi, deux autres rapports ont été restitués, durant la même période, relativement au volet hydrogéologique du programme. Il s'agit des documents suivants :

- Manceau JC, Thiéry D., Seguin JJ., Wuilleumier A. (2018) - Projet GAIA - Travaux préliminaires à la modélisation hydrogéologique : prise en compte des effets diphasiques et thermiques. Rapport BRGM/RP-67307-FR ;
- Seguin J.J., avec la collaboration de Wuilleumier A. (2018) - Projet GAIA - Année 3. Exploitation des cycles d'injections et de soutirages de gaz aux sites de Lussagnet et Izaute pour déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des Sables infra-molassiques. Rapport d'étape. BRGM/RP-67369-FR.

Enfin, le présent document fait par ailleurs suite au rapport d'année 3 du programme GAIA, qui rendait compte de l'avancement des actions conduites dans le domaine de l'hydrogéologie en 2016 et début 2017 (Wuilleumier et al., 2017).



## 2. Consolidation de la base des volumes prélevés

Dans ce chapitre, les ouvrages souterrains sont présentés avec leur ancien code BSS, afin d'assurer une continuité des référencements avec les rapports précédents. Afin d'alléger le texte du rapport tout en respectant la nouvelle codification en vigueur, un tableau récapitulatif des ouvrages, en annexe 1, précise les correspondances entre anciens et nouveaux codes BSS.

### 2.1. CONSOLIDATION DE LA BASE DES VOLUMES PRÉLEVÉS ANNUELS

La base des volumes prélevés annuellement dans les aquifères cibles du sud du Bassin aquitain a été finalisée au travers :

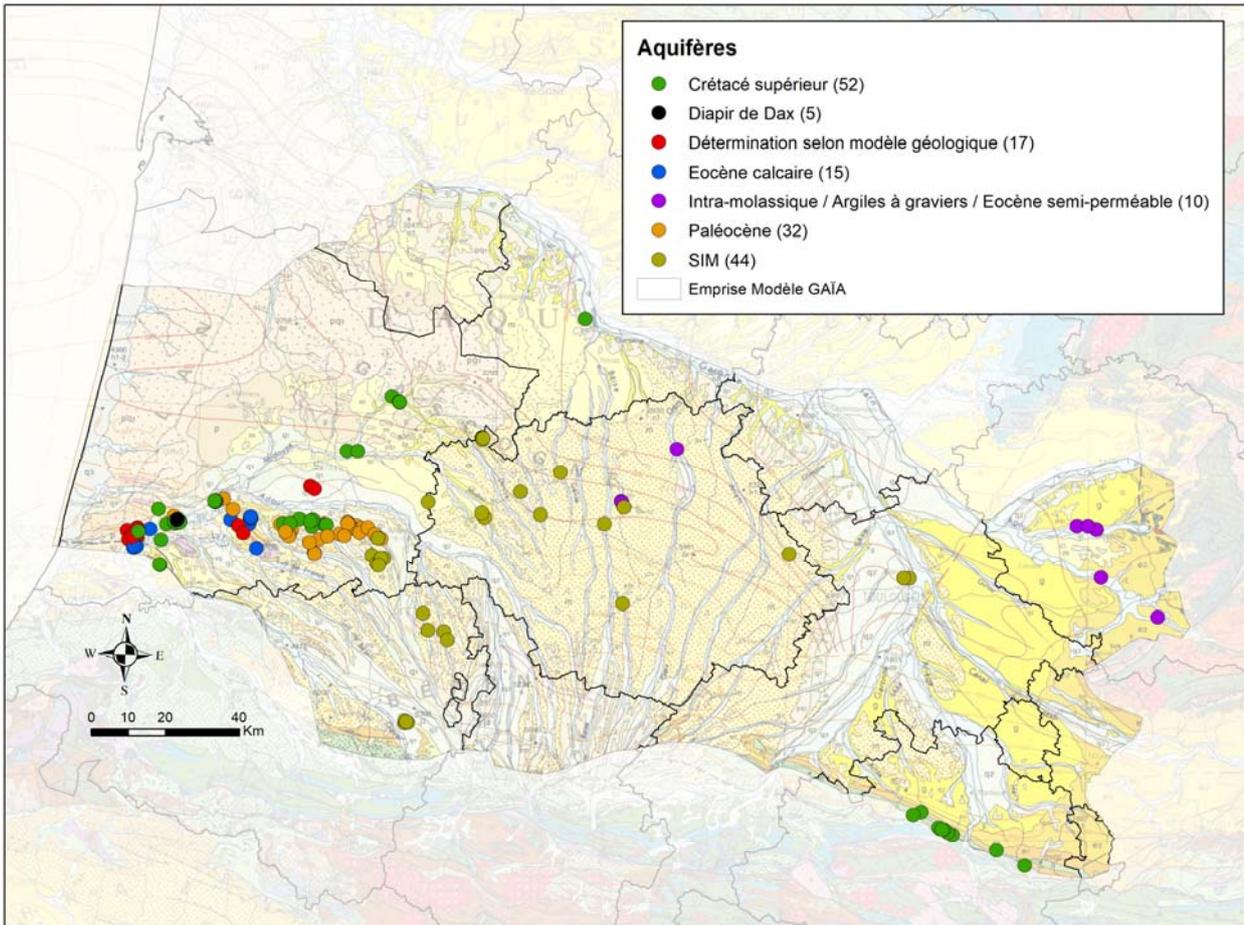
- de la clôture des démarches entreprises auprès des exploitants agricoles, industriels, d'eau potable et autres usagers, afin de valider les chroniques reconstituées et les estimations effectuées ;
- de la mise à jour des données entre 2014 et 2016.

A la suite de cette finalisation, n'ont été conservés dans cette base que les ouvrages qui ont été réellement exploités (temporairement ou en continu), au cours de la période 1970-2016, même si le travail de recherche et de collecte d'informations (Wuilleumier et al., 2015 et 2017) a été entrepris pour des ouvrages qui se sont avérés par la suite non exploités (ouvrages de reconnaissance, ouvrages transformés en piézomètre, ouvrages abandonnés, ...). De la même manière, et conformément à la notion de « volumes prélevés » (Wuilleumier et al., 2017), ne sont gardés que les prélèvements qui modifient les écoulements naturels dans l'aquifère<sup>1</sup>. Les ouvrages ainsi écartés de la base de prélèvements ont été conservés dans une liste à part (Annexe 2).

Au terme de cet inventaire, 175 ouvrages relatifs aux aquifères profonds sont référencés, dans l'emprise envisagée pour le futur modèle hydrogéologique GAIA (illustration 1). Ces ouvrages captent principalement le Crétacé supérieur, le Paléocène, les Sables Infra-molassiques (SIM) et les calcaires de l'Éocène, mais quelques-uns sont associés à des niveaux plus superficiels (argiles à graviers du Bassin de Castres, voire intra-molassiques, tel le forage 09545X0019 de Castéra-Verduzan). Par ailleurs, 18 forages n'ont pas encore de code aquifère attribué, faute, dans la plupart des cas, de disposer d'une coupe technique détaillée. La finalisation de l'attribution des aquifères captés sera réalisée à l'issue du croisement avec le modèle géologique en cours d'élaboration.

---

<sup>1</sup> La connaissance des volumes prélevés est cependant conservée dans la mesure où elle renseigne sur les ordres de grandeur des flux de sortie de l'aquifère (Wuilleumier et al., 2017)



*Illustration 1 - Répartition géographique, et par aquifère, des 175 ouvrages de la base des volumes GAIA, exploités, temporairement ou non, au cours de la période 1970-2016*

Pour chacun de ces 175 ouvrages, la chronique des prélèvements a été reconstituée sur la période 1970-2016. Tous ne sont pas exploités sur l'ensemble de cette période, mais ils l'ont été au moins durant une année. À la faveur de la création de nouveaux ouvrages et du rebouchage de certains autres, 166 sont à l'heure actuelle exploitables. Le nombre d'ouvrages exploitables a été plus que quadruplé (multiplié par 4,4), entre 1970 et 1993, puis s'est stabilisé depuis une vingtaine d'années. 62 % des années renseignées ont des volumes dits « réels », c'est-à-dire s'appuyant sur les informations de l'exploitant ou des bases de données de redevance ; les 38 % restant étant obtenus par des estimations (illustration 2).

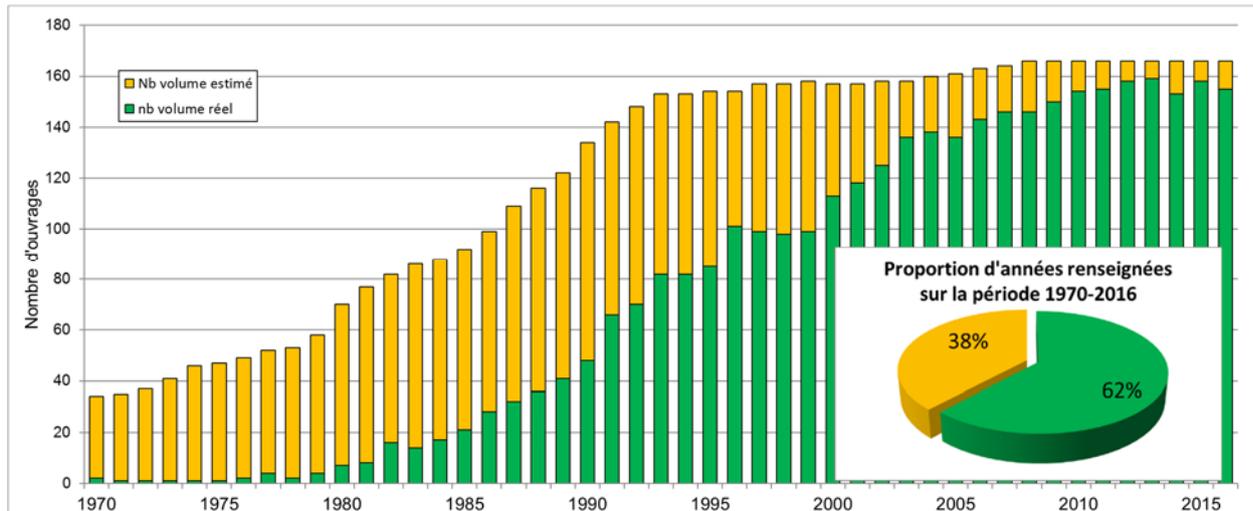


Illustration 2 - Nombre de volumes renseignés, par année, pour l'ensemble des ouvrages exploitables et pour la période 1970-2016

Les prélèvements ont progressivement augmenté depuis le début des années 1970, où ils étaient en cumulé de l'ordre de 8 Mm<sup>3</sup>/an, à nos jours où ils atteignent 26 à 28 Mm<sup>3</sup>/an (illustration 3). Les volumes estimés représentent plus de 50 % des chroniques reconstituées jusqu'en 1990, année pour laquelle les volumes dits réels deviennent prédominants. 67 % du volume total renseigné dans la base correspond à des volumes réels. La répartition des prélèvements par aquifère est disponible en Annexe 3 (A à F).

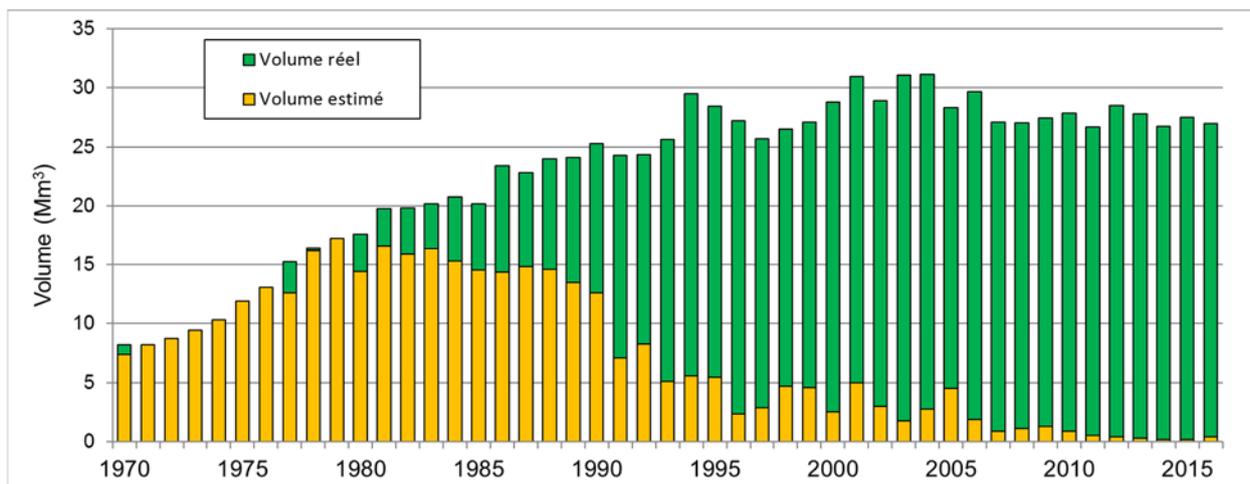


Illustration 3 - Volumes totaux prélevés dans les aquifères cibles du sud du Bassin aquitain (répartition entre volumes réels et volumes estimés)

### 2.1.1. Les prélèvements agricoles

Les 50 ouvrages de prélèvements pour un usage agricole sont tous présents dans le département des Landes. La majorité des forages ayant été réalisée à la fin des années 1980, les volumes augmentent nettement à partir de cette période. Dans le cadre du précédent rapport d'avancement du volet hydrogéologique du projet GAIA (Wuilleumier et al., 2017), les difficultés de récupération des volumes réels dans les bases de données nationales ou auprès des exploitants ont été discutées : ainsi, tous les volumes de la période 1970-1987 sont estimés. Ces estimations ne représentent plus que près de la moitié des volumes, entre 1988 et 2003

(illustration 3) ; tandis que depuis 2010 seulement les trois-quarts des prélèvements effectués sont réellement connus.

Sur la base de ces estimations et pour la période 1970-2016, les prélèvements en eau pour un usage agricole n'a jamais dépassé les 3 Mm<sup>3</sup>/an (illustration 4) et ne correspondent au final qu'à 6 % des prélèvements totaux dans les aquifères cibles du sud du Bassin aquitain. Cette part est très variable dans le temps<sup>2</sup>, mais ne représente que rarement plus de 10 % des volumes prélevés annuellement, tous usages confondus (10,2 % en 1990 et 11 % en 2016).

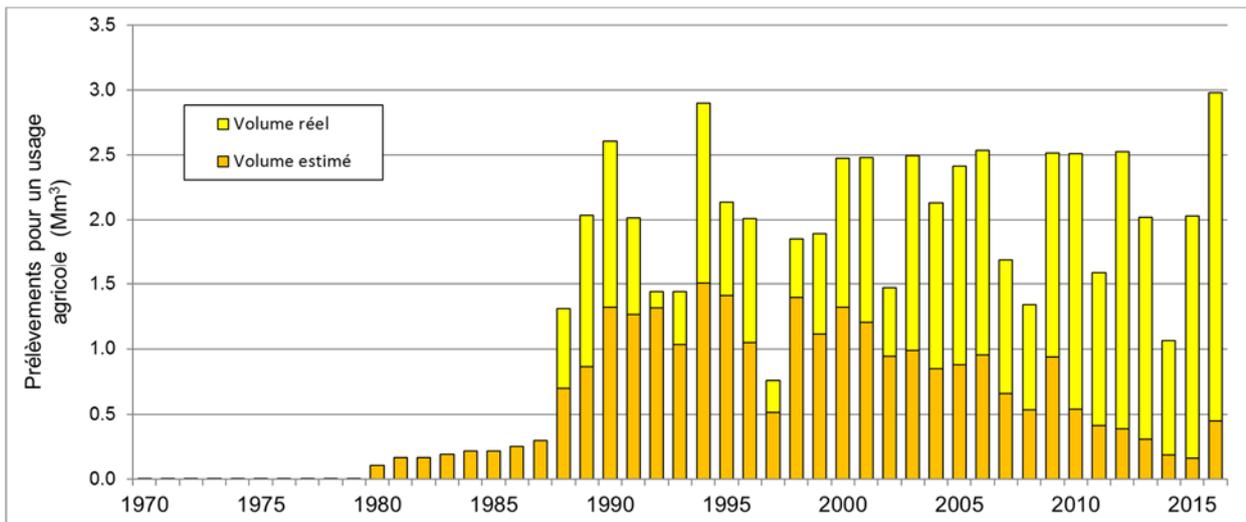


Illustration 4 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour un usage agricole - Répartition par type de volume

### 2.1.2. Les prélèvements AEP

64 ouvrages (52 forages et 12 sources) exploitent les aquifères profonds du sud du Bassin aquitain pour les besoins en eau potable (AEP). Les volumes prélevés pour cet usage représentent 61 % des volumes totaux, tous usages confondus, pour l'ensemble de la période considérée. Ils n'ont eu de cesse d'augmenter depuis les années 1970, pour se stabiliser autour de 19 Mm<sup>3</sup>/an depuis une dizaine d'années (illustration 5), représentant, en 2016, 70 % des prélèvements d'eau inventoriés.

Au cours de la période 1970-2016, 81 % des volumes prélevés pour l'AEP sont des volumes réels. La connaissance des volumes s'est améliorée essentiellement à partir des années 1990 ; les données postérieures à cette date étant disponibles dans les bases de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, voire récupérables directement auprès des exploitants pour les années les plus récentes. Depuis 2007, les volumes référencés sont tous des volumes réels.

<sup>2</sup> Des essais de corrélation de ces variations avec la pluviométrie ont été effectués dans le rapport Wuilleumier et al. de 2017. Ces essais ne s'étaient révélés que partiellement concluants.

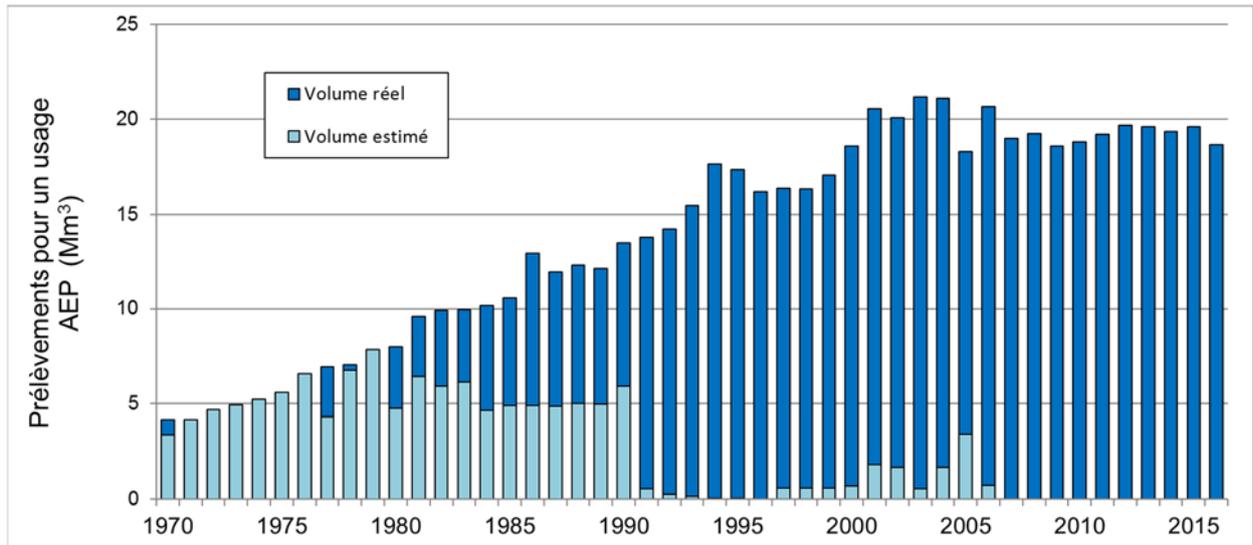


Illustration 5 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour l'AEP - Répartition par type de volume

### 2.1.3. Les prélèvements industriels

18 ouvrages entrent dans la catégorie des prélèvements industriels. Ils sont ou ont été exploités pour la géothermie, l'embouteillage ou encore directement dans le cadre d'un processus de fabrication industrielle. Les volumes cumulés annuels, diminués de moitié depuis le milieu des années 1980, représentent 11 % des prélèvements, pour la période 1970-2016. Ils sont moins importants depuis une dizaine d'années, puisqu'ils ne correspondent plus qu'à 7 % des volumes totaux prélevés (illustration 6).

La connaissance réelle des volumes pour cet usage n'apparaît qu'à partir de 1986 et n'est disponible antérieurement que par la bibliographie. Ce n'est qu'à partir de 1988 que les bases de l'Agence de l'Eau disposent de ces volumes.

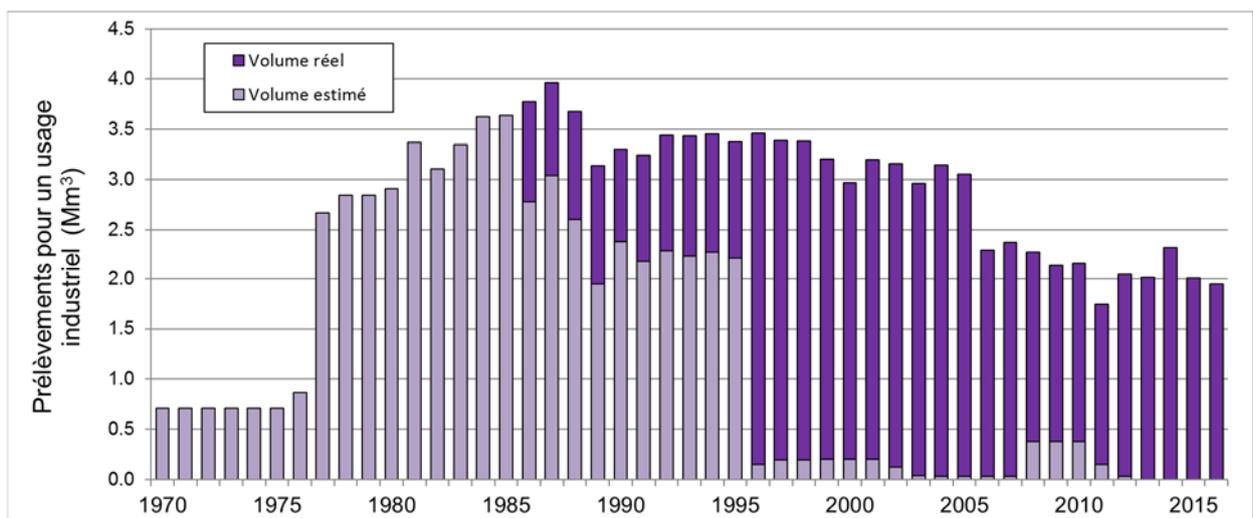


Illustration 6 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour un usage industriel - Répartition par type de volume

### 2.1.4. Les prélèvements thermaux

Les 43 ouvrages exploités pour le thermalisme sont présents dans les Landes et le Gers. Les informations fournies par les exploitants ont permis de reconstituer des chroniques jusqu'en 1993, date à partir de laquelle plus de la moitié des volumes référencés sont réels. Avant cela, les différents échanges avec ces mêmes exploitants, mais aussi les informations figurant dans la bibliographie, ont permis d'estimer les volumes prélevés. À l'instar des volumes prélevés pour l'industrie, les prélèvements pour le thermalisme ont diminué depuis la fin des années 1980 (illustration 7).

Représentant 40 % des volumes prélevés, au début des années 1970, dans les aquifères profonds du sud du Bassin aquitain, les prélèvements pour le thermalisme représentent désormais moins de 15 % des prélèvements d'eau.

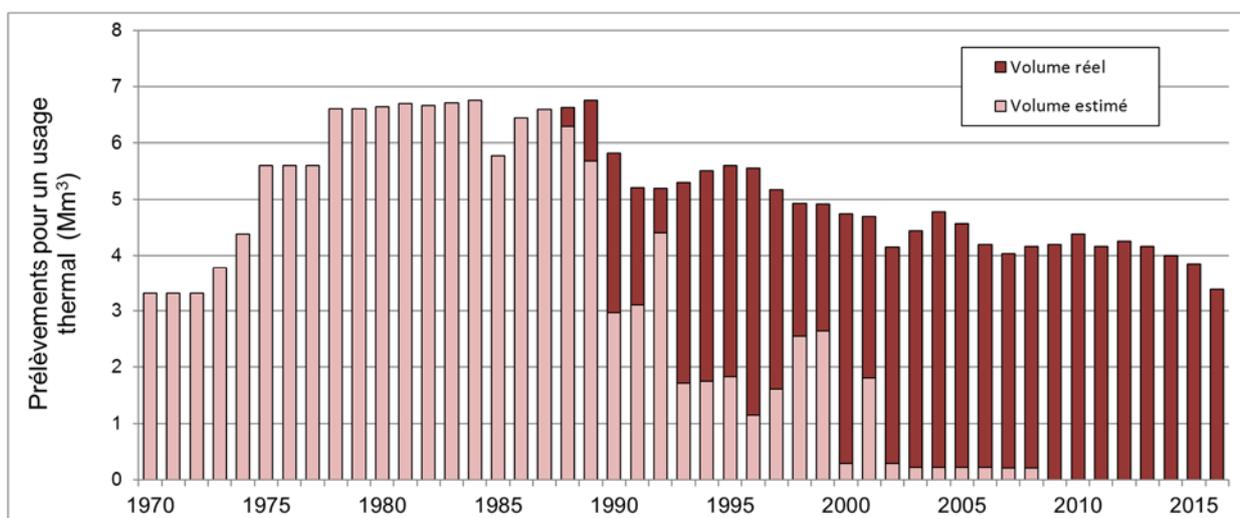


Illustration 7 - Chronique 1970-2016 des volumes prélevés pour un usage thermal - Répartition par type de volume

## 2.2. COMPILATION DES VOLUMES MENSUELS

Dans l'optique de modéliser les écoulements souterrains dans le sud du Bassin aquitain, il est nécessaire de préciser la connaissance des prélèvements à un pas de temps plus fin que le pas de temps annuel, à savoir mensuel, voire infra-mensuel dans certaines zones. Ceci permet de rendre compte des dynamiques d'écoulements des nappes au cours du temps. Ce besoin de connaissance est cependant contraint par la disponibilité de telles données.

En effet, les bases de données nationales ne référencent pas ce type d'informations. Il est donc nécessaire de solliciter directement les exploitants afin de récupérer les suivis qu'ils effectuent. La démarche de collecte d'informations est différente selon l'usage de l'eau ; elle est décrite ci-après.

### 2.2.1. Volumes agricoles

Les prélèvements pour un usage agricole se concentrent généralement en été et les débits prélevés sont rarement enregistrés en continu. Il avait été décidé, en 2016, de solliciter une partie des exploitants agricoles pour leur demander chaque mois de relever leur(s) compteur(s)

(Wuilleumier et al., 2017). Ce travail s'est poursuivi tout d'abord en 2017 sur la base des sollicitations de 2016, puis la méthodologie a été adaptée en 2018.

**Pour la campagne d'irrigation 2017**, 16 exploitants ont accepté d'effectuer des relevés mensuels sur leurs compteurs. 3 de ceux ayant répondu pour l'exercice précédent n'ont pas réalisé ce relevé (ils représentaient 17 % des volumes collectés en 2016).

**Pour la campagne d'irrigation 2018**, le niveau de connaissance des ouvrages (localisation, exploitant, présence ou non de compteur) permettait d'envisager une collecte rapide des volumes prélevés mensuellement au travers de campagnes de relevés des compteurs réalisés directement sur site. Les volumes prélevés ont ainsi pu être collectés mensuellement et rapidement pour 32 ouvrages (les 18 ouvrages agricoles restant ne disposaient pas de compteur ou n'étaient pas accessibles).

Le tableau suivant (illustration 8) fait le bilan des ventilations mensuelles obtenues, tous volumes collectés confondus.

	2016		2017		2018	
	(25 ouvrages)		(21 ouvrages)		(32 ouvrages)	
juin (m <sup>3</sup> )	68 809	3%	330 797	45%	96 979	6%
juillet (m <sup>3</sup> )	1 252 881	49%	13 865	2%	629 805	37%
août (m <sup>3</sup> )	1 147 940	45%	385 394	53%	854 349	50%
septembre (m <sup>3</sup> )	102 661	4%	-	0%	128 127	7%
Total (m <sup>3</sup> )	2 572 291		730 056		1 709 259	

*Illustration 8 - Tableau de répartition des volumes prélevés mensuellement, lors des campagnes d'irrigation 2016, 2017 et 2018*

14 ouvrages ont fait l'objet de collecte de prélèvements mensuels, au cours des 3 campagnes d'irrigation (illustration 9). Ces 14 ouvrages représentent à chaque fois plus des deux tiers des volumes collectés.

	2016		2017		2018	
	juin (m <sup>3</sup> )	68 809	3%	307 974	45%	13 418
juillet (m <sup>3</sup> )	991 086	49%	12 415	2%	400 863	36%
août (m <sup>3</sup> )	884 681	43%	368 124	53%	646 816	58%
septembre (m <sup>3</sup> )	90 265	4%	-	0%	59 766	5%
Total (m <sup>3</sup> )	2 034 841		688 513		1 120 863	

*Illustration 9 - Tableau de répartition des volumes prélevés dans les 14 ouvrages, ayant en commun d'avoir fait l'objet de collectes de prélèvements mensuels, à chacune des campagnes d'irrigation*

Les volumes prélevés mensuels contrastent beaucoup d'une période d'irrigation à l'autre, en relation étroite avec les précipitations (illustration 10 & illustration 11).

En 2016, 94 % des prélèvements agricoles s'étaient concentrés en juillet et août, quand dans le même temps seuls 22 mm d'eau sont tombés. Les mois de juin (72 mm) et de septembre (64 mm) avaient quant à eux été beaucoup plus pluvieux, expliquant les faibles prélèvements pour l'irrigation.

En 2017, la pluviométrie pour la période d'irrigation (1<sup>er</sup> juin - 15 septembre) est supérieure de 55 % à celle de 2016, expliquant principalement les écarts constatés sur les prélèvements totaux de la période entre les deux années. L'année 2017 montre que les prélèvements se concentrent en juin et en août. Pourtant, juin a été tout aussi pluvieux que le mois de juillet (80,8 mm contre 80 mm), mais, dans le détail, les précipitations ont été concentrées sur deux périodes : 24,4 mm sont tombés du 1<sup>er</sup> au 5 juin, puis 117,6 mm entre le 27 juin et le 11 juillet (soit plus de 50 % des précipitations intervenues au cours de la période d'irrigation 2017). En conséquence, trois semaines se sont écoulées en juin sans pluie. Le mois de juillet a nécessité beaucoup moins de prélèvements pour l'irrigation qu'en 2016. Les pluies de fin août et début septembre (46 mm à partir du 26 août) ont entraîné l'arrêt des prélèvements.

En 2018, les prélèvements se sont opérés à 94 % en juillet et août, ce qui contraste beaucoup avec la période d'irrigation 2017 ; alors que la répartition des précipitations mensuelles est comparable entre ces deux années ( $\frac{1}{3}$  des précipitations en juin et  $\frac{1}{3}$  en juillet). En 2018, les prélèvements en juillet et août (1,048 Mm<sup>3</sup>) sont près de 3 fois plus importants que ceux de 2017 (0,38 Mm<sup>3</sup>) ; alors que, sur la même période, il y a eu 25 % de pluies supplémentaires. Ainsi, la meilleure répartition de la pluie au cours du temps, voire à certains moments clés (périodes liées aux stades de croissance des céréales par exemple), semble être le facteur conditionnant la quantité d'eau prélevée au cours du temps. Les besoins plus importants en eau en juillet 2018 s'expliquent ainsi par le fait que 79,6 mm d'eau sont tombés entre le 1<sup>er</sup> et le 5 juillet (82 % des précipitations de juillet), notamment au cours de la nuit du 30 juin au 1<sup>er</sup> juillet (61 mm). Les prélèvements ne se seraient alors opérés qu'après ces épisodes intenses pour pallier les faibles quantités d'eau précipitées par la suite et les fortes températures maximales observées (37 °C).

On observe ainsi une relation importante entre les précipitations et les prélèvements pour l'irrigation, ce qui diffère dans une certaine mesure des conclusions issues des tentatives de reconstitution des chroniques de prélèvements agricoles annuels effectuées dans le rapport d'avancement précédent (Wuilleumier et al., 2017). Dans ce rapport, il s'agissait d'évaluer le lien entre les prélèvements effectués par les agriculteurs et les conditions météorologiques, notamment la Pluie et l'ETP, par le biais de l'indicateur du stress hydrique. Au regard des constats effectués précédemment sur la base des campagnes d'irrigation 2016 à 2018, on s'aperçoit que les tentatives de corrélation lors du précédent exercice (Wuilleumier et al., 2017) ont notamment souffert d'une prise en compte des différentes variables (volumes, pluies, ETP et stress hydrique) intégrée pour l'ensemble de la période d'irrigation, alors qu'une analyse dans le détail, à une résolution mensuelle et même infra-mensuelle, pourrait permettre d'obtenir des résultats plus encourageants. La ventilation mensuelle des prélèvements agricoles connus annuellement sera abordée en préalable à la modélisation hydrogéologique des aquifères profonds.

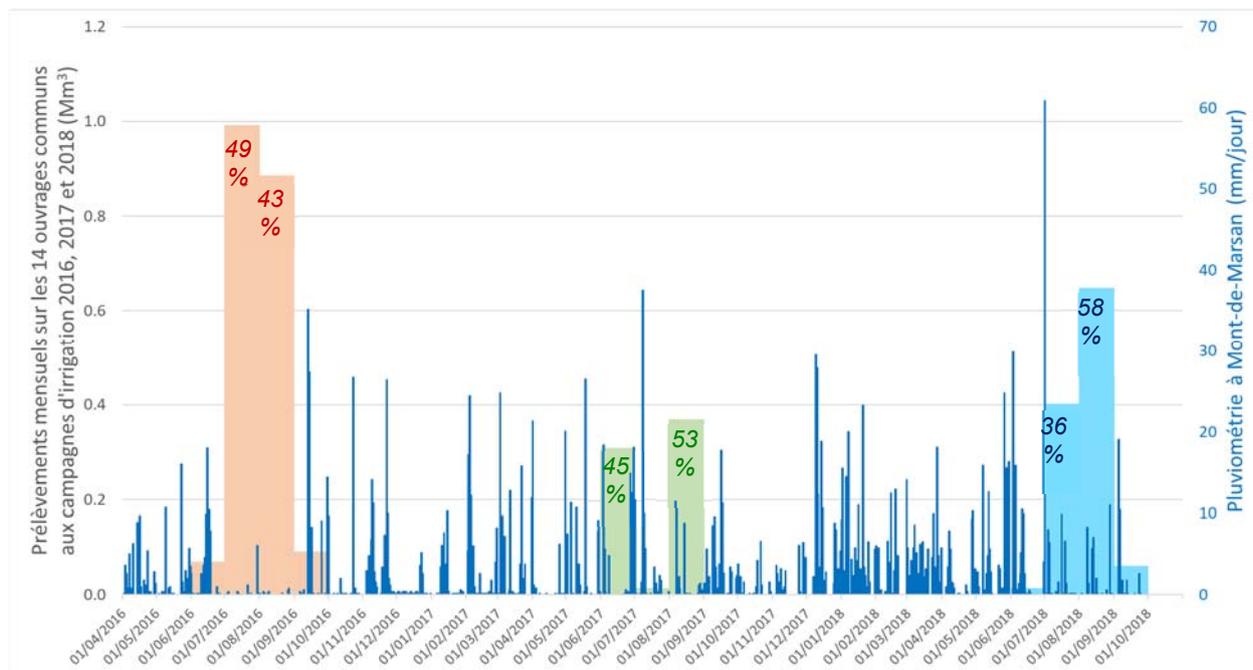


Illustration 10 - Ventilation mensuelle des prélèvements agricoles des 14 ouvrages communs aux campagnes d'irrigation 2016, 2017 et 2018 et précipitations journalières associées

	2016		2017		2018	
juin - 15 septembre	147.8		230.5		266.4	
juin	71.9	46%	80.8	35%	99.3	37%
juillet	10.9	7%	80	35%	96.7	36%
août	11	7%	27.2	12%	37	14%
mi-septembre	64	41%	42.5	18%	36.7	14%

Illustration 11 - Tableau synthétique des précipitations (mm) intervenues au cours des périodes d'irrigation 2016 à 2018

## 2.2.2. Autres usages (AEP, industriels et thermalisme)

La compilation des volumes mensuels s'appuie sur les données enregistrées directement par les exploitants ou sur des informations directement fournies par ceux-ci et permettant de déduire les volumes exploités. Un complément a pu être réalisé sur certains ouvrages AEP à partir de la base de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne qui indique, pour la période 1991-1996, les volumes trimestriels.

28 exploitants ont été sollicités pour transmettre ces volumes mensuels. Tous ne procèdent pas à l'enregistrement de ces données depuis la mise en exploitation de leur(s) ouvrage(s) et généralement seules les données les plus récentes peuvent être collectées. À l'issue de cette enquête, qui a porté sur 150 ouvrages au total, 39 % des mois pour lesquels la donnée était à récupérer (i.e. l'ouvrage existe et n'est pas rebouché) sont désormais renseignés dans la base. L'information portée est soit un volume prélevé mensuel réel (36%), soit le fait que le volume réel n'est pas disponible (3%). Dans ce dernier cas, le volume prélevé mensuel n'est pas connu, en

raison de l'absence de dispositif d'enregistrement mensuel, d'une panne de débitmètre, etc... La solution reviendra à utiliser le volume réel ou estimé annuel et à le répartir en proportion sur les mois manquants. La répartition par forage est fournie en annexe 4.

Usage	% données collectées	% données non disponibles
<b>AEP</b>	33%	3%
<b>Thermalisme</b>	41%	1%
<b>Industrie</b>	32%	10 %
<b>Total</b>	36 %	3 %

*Illustration 12 - Etat d'avancement de la collecte des volumes mensuels des ouvrages exploités pour l'AEP, l'industrie et le thermalisme*

## **3. Acquisition de données en vue de l'établissement de cartes piézométriques**

### **3.1. OBJECTIF**

Les écoulements au sein de la nappe des Sables Infra-Molassiques (SIM) ont été étudiés, par le passé, au travers notamment de plusieurs cartes piézométriques, élaborées annuellement au cours des décennies 1980 et 1990 (par exemple : Roche, 1981 ; Bel et Sourisseau, 1988 ; Bel, 1993 ; Benhammouda et al., 1999). Par la suite, l'apport des connaissances géochimiques a permis de contraindre davantage le schéma d'écoulement au sein des SIM.

Si ces cartes piézométriques permettent d'observer des orientations d'écoulement différentes entre le nord et le sud de la formation éocène, d'identifier des zones de recharge préférentielle au travers d'infiltrations directes ou d'échanges avec les aquifères encadrants, d'évaluer enfin les zones d'exutoires potentielles, aucune ne rend compte de la dynamique de propagation de la pression issue des cycles de stockage et de déstockage du gaz à Lussagnet et Izaute. Afin de rendre compte de ces évolutions temporelles de pression au sein de l'aquifère (amplitudes et durées des fluctuations), il a été proposé d'établir des cartes piézométriques mensuelles de septembre 2017 à avril 2018. La période retenue correspond à la mise en charge des sites de stockage dont le pic est généralement observé au début de l'automne.

### **3.2. SÉLECTION INITIALE DES POINTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DES CARTES PIÉZOMETRIQUES ENTRE SEPTEMBRE 2017 ET AVRIL 2018**

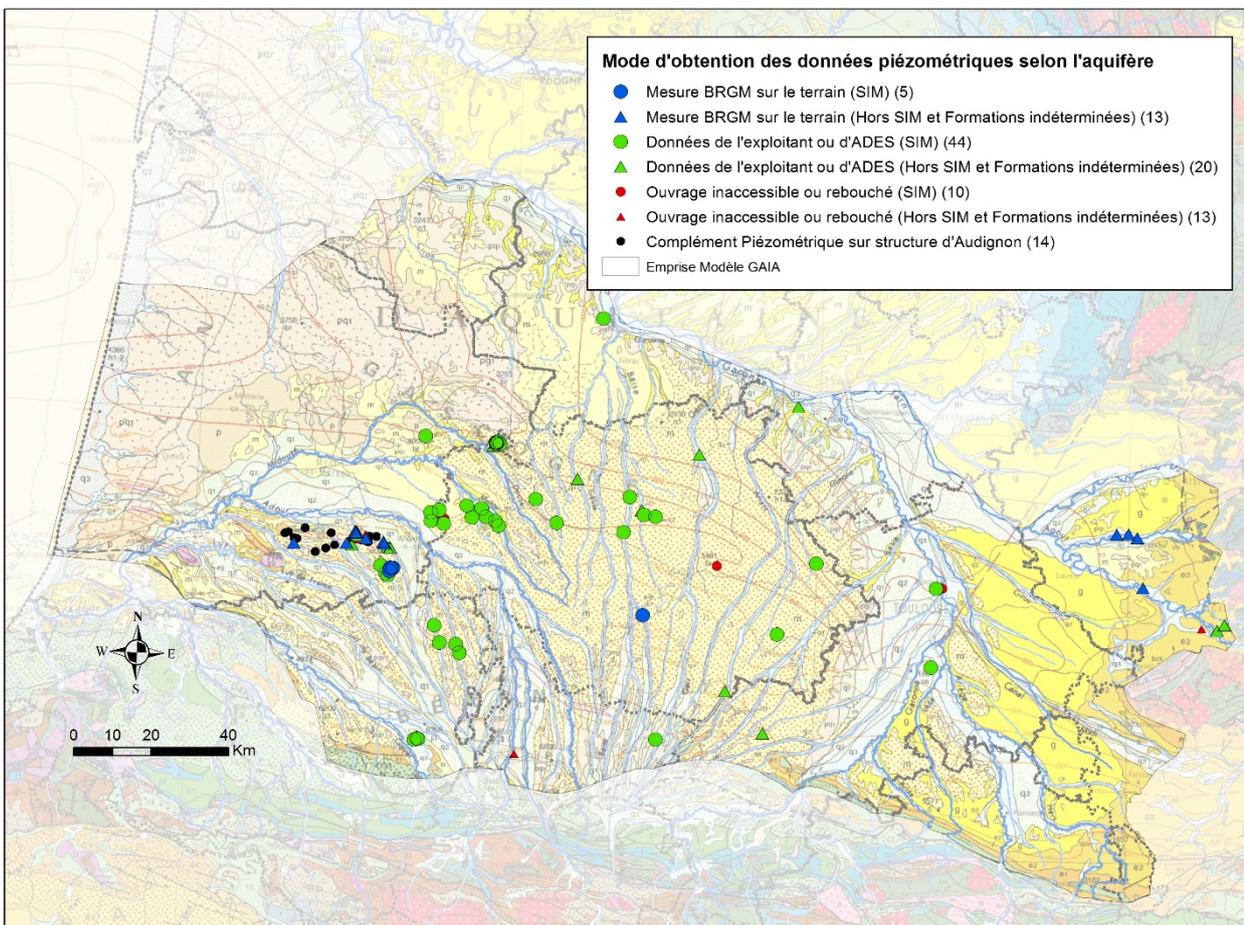
L'ensemble des ouvrages de la base GAIA a fait l'objet d'un croisement avec les logs géologiques revisités dans le cadre du projet GAIA, afin d'identifier les formations traversées. Les ouvrages conservés pour la réalisation des cartes piézométriques sont ceux captant au moins partiellement les Sables Infra-Molassiques (typiquement les Sables de Lussagnet, Sables de Baliros et/ou les Grès à Nummulites). L'existence d'incertitudes quant aux formations traversées, ainsi que le rôle de formations relais (du type Argiles à graviers / Formations molassiques) dans la mise en charge des SIM, ont conduit à élargir le champ de recherche à des ouvrages pouvant *in fine* être utiles à l'établissement des cartes piézométriques.

Ainsi, 105 ouvrages ont dans un premier temps été sélectionnés afin d'évaluer les possibilités d'obtention de niveaux piézométriques mensuels sur la période allant de septembre 2017 à avril 2018. Pour chacun de ces ouvrages, les informations suivantes ont été recherchées, soit directement sur le terrain, soit en prenant contact auprès du propriétaire ou du gestionnaire :

- état de l'ouvrage : rebouché / exploité / accessible, possibilité de faire une mesure piézométrique ou non ;
- mode de suivi actuel, le cas échéant ;
- accord de l'exploitant pour récupérer les suivis déjà mis en œuvre ou pour aller faire une mesure directement ;
- les mesures piézométriques transmises par l'exploitant en cote absolue, le cas échéant la possibilité de niveler le point.

Ce premier travail a conduit à identifier (illustration 13 et annexe 5) :

- 23 ouvrages pour lesquels une mesure piézométrique n'est pas possible (ouvrage rebouché, non accessible, ...). Le forage de Lussagnet n°9 (09526X0011/LUG9) par exemple est en alternance en eau et en gaz. Ainsi, l'exploitant ne réalise plus de mesures piézométriques sur cet ouvrage en raison du risque gaz (communication par courriel de TEREKA, 04/2018) ;
- 64 ouvrages faisant l'objet de suivis réguliers et dont les données ont été soit transmises directement par l'exploitant, soit sont accessibles via le portail ADES ;
- 18 ouvrages ne faisant pas l'objet de suivis et pour lesquels un passage mensuel sur le terrain a permis d'avoir accès à l'information ;
- 14 ouvrages présents sur la structure anticlinale d'Audignon qui ont fait l'objet de mesures piézométriques en complément des 105 points de mesure identifiés pour la campagne spécifique au projet GAIA (la campagne de terrain ayant été ainsi mutualisée avec le projet « Audignon »).



*Illustration 13 - Carte de répartition des 105 points sélectionnés pour la recherche de données piézométriques mensuelles, entre septembre 2017 et avril 2018. Les 14 ouvrages ayant fait l'objet de mesures piézométriques, autour de la structure d'Audignon, sont également représentés.*

En conséquence, ce sont 96 points (82 spécifiques à GAIA et 14 spécifiques au projet « Audignon ») qui ont fait l'objet d'une acquisition ou d'une collecte de données dans le cadre de la campagne piézométrique mise en œuvre.

### 3.3. COLLECTE DES DONNÉES

La collecte des niveaux piézométriques mensuels sur les 96 ouvrages s'est organisée en fonction du mode de suivi des ouvrages, dont on peut identifier trois types différents.

Le premier consiste à collecter les mesures depuis le portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines ([www.adeseaufrance.fr](http://www.adeseaufrance.fr)), dans lequel figurent 18 des ouvrages cibles au travers de réseaux de suivis quantitatifs nationaux.

Le deuxième mode a nécessité la réalisation de campagnes piézométriques de terrain dans 3 secteurs :

1. le secteur d'Audignon, situé dans les Landes, qui regroupe 27 ouvrages et s'étendant de Saint-Aubin, à l'ouest, jusqu'à Eugénie-les-Bains à l'est et Geaune au sud. Il concerne essentiellement des forages agricoles et quelques forages AEP,
2. l'ancien forage géothermique de Lamazère (10071X0012/F), dans le Gers, anciennement utilisé pour le chauffage de serres,
3. les 3 forages industriels de Graulhet et le forage AEP de Guitalens-L'Albarède, à l'est dans le Tarn.

Il est à noter qu'à l'exception du troisième secteur, tous les points ont fait l'objet d'un nivellement des niveaux repère, afin d'obtenir des mesures piézométriques précises en cote absolue. En complément, 8 ouvrages du Syndicat Mixte du Nord Est de Pau, dans les Pyrénées-Atlantiques, ont été également nivelés afin de repositionner les valeurs transmises par l'exploitant.

Le troisième mode de collecte est la récupération des mesures directement auprès des exploitants. 46 ouvrages ont ainsi pu bénéficier des appuis de leur propriétaire et/ou gestionnaire pour récupérer les mesures piézométriques, celles-ci correspondant soit à des extractions des suivis déjà réalisés soit à des mesures ponctuelles réalisées à la demande par l'exploitant. 9 exploitants ou gestionnaires ont ainsi été sollicités et ont accepté de transmettre leurs données.

### 3.4. TRAITEMENT DES DONNÉES

Les chroniques de données, une fois collectées, ne sont pas toutes exploitables en l'état. Des corrections et hypothèses sont parfois nécessaires afin de palier des effets de pompage, de température ou de minéralisation, de manques éventuels de données pour raisons diverses (dénoyage ou panne de capteur, impossibilité de mesure au moment voulu, ...) ou encore de lever des doutes quant à la qualité de la donnée.

Différentes hypothèses et modifications ont ainsi été apportées aux données collectées. Elles sont présentées ci-dessous.

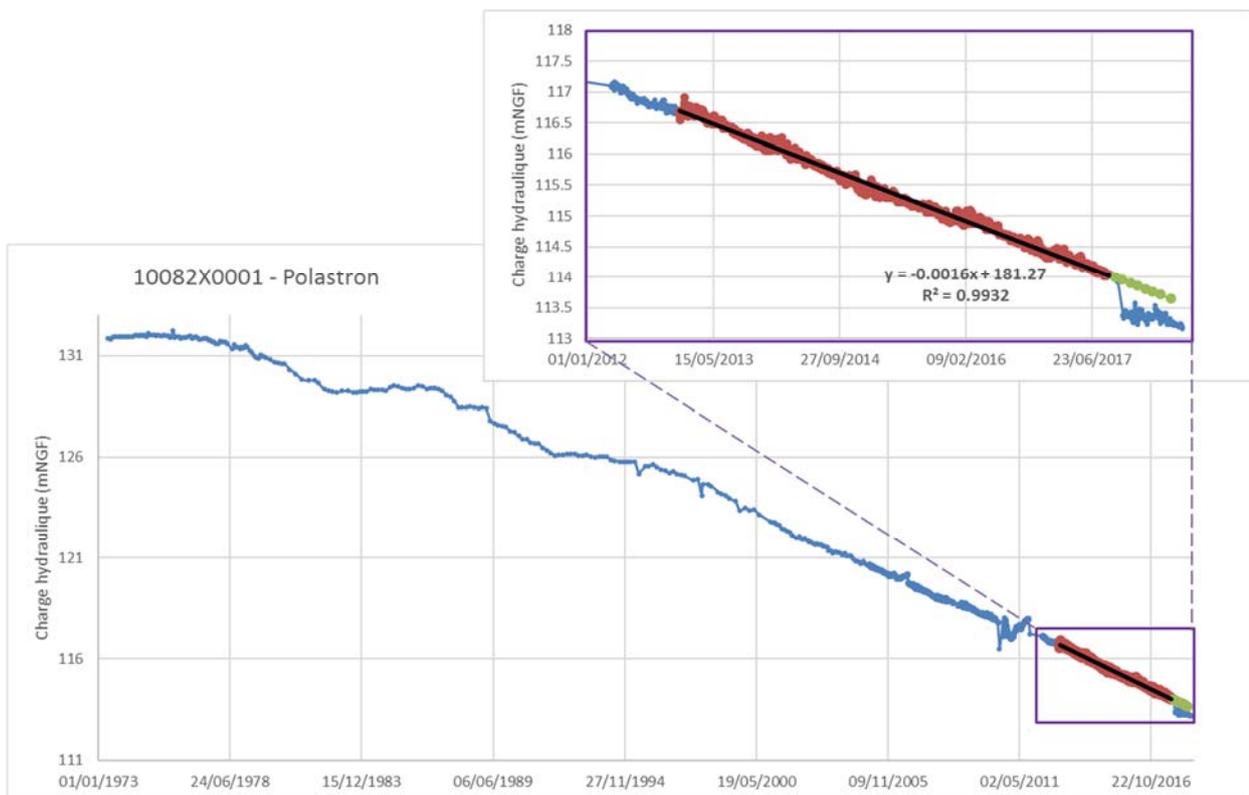
#### 3.4.1. Changement de dynamique de certains ouvrages

Les forages de Lacquy (09266X0004/LC101) et Polastron (10082X0001/F) ont fait l'objet d'investigations en octobre 2017 (Gal et al., rapport à paraître), incluant notamment la réalisation d'un pompage de courte durée à faible débit. L'évolution piézométrique de ces ouvrages, jusqu'ici à la baisse, s'est retrouvée modifiée, présentant généralement une période de stabilisation transitoire du niveau piézométrique. À Polastron, les niveaux observés sont ainsi inférieurs à ceux attendus sur la base d'un prolongement de la tendance à la baisse observée jusqu'alors, tandis qu'ils sont supérieurs aux niveaux attendus au piézomètre de Lacquy. Le forage de Saint-Cricq (09824X0002/F) quant à lui présente également une variation de la dynamique de son niveau

piézométrique malgré l'absence d'intervention sur ce forage. Les niveaux stabilisés sont supérieurs à ceux attendus.

Les causes de cette modification de la dynamique sont discutées dans le rapport Gal et al. À Polastron, c'est l'augmentation de la densité de la colonne d'eau présente dans le forage qui est susceptible d'expliquer l'écart piézométrique observé. En tout état de cause, il a été considéré que les observations effectuées correspondaient à un état transitoire de la piézométrie et décidé en conséquence de ne pas les utiliser pour la cartographie piézométrique, mais de leur préférer des niveaux piézométriques élaborés sur la base d'une projection de cette tendance à la baisse.

À Polastron (illustration 14), une tendance a donc été définie sur une portion récente de la chronique piézométrique, antérieure aux travaux effectués sur l'ouvrage. La poursuite de cette pente permet d'obtenir les piézométries correspondantes chaque mois entre septembre 2017 et avril 2018. Les écarts entre la piézométrie calculée et celle enregistrée à l'ouvrage sont compris entre 63 cm et 39 cm (illustration 15). Les piézométries reconstituées et les écarts obtenus sur les forages de Lacquy et Saint-Cricq sont présentés en Annexe 6. Les écarts maximums obtenus sur ces deux derniers ouvrages sont respectivement de 32 et 21 cm.



*Illustration 14 - Chronique piézométrique de Polastron et poursuite de la tendance à la baisse  
Chronique disponible dans ADES (en bleu) - Section retenue pour calcul de la tendance (en rouge) et  
courbe de tendance correspondante (en noir) - Piézométrie obtenue sur la base de la poursuite de la  
tendance entre septembre 2017 et mai 2018 (en vert)*

DATES	PIEZOMETRIE MESUREE (M NGF)	PIEZOMETRIE ESTIMEE D'APRES TENDANCE (M NGF)	ECART (M)
31/08/2017	114.04	Pas de changement de dynamique	
21/09/2017	Non mesurée pour cause intervention	114.01	-
19/10/2017		113.96	-
22/11/2017	113.43	113.91	-0.48
22/12/2017	113.23	113.86	-0.63
22/01/2018	113.31	113.81	-0.50
19/02/2018	113.34	113.76	-0.42
22/03/2018	113.27	113.72	-0.45
03/05/2018	113.26	113.65	-0.39

Illustration 15 - Ecart obtenu entre la piézométrie enregistrée par le capteur et celle obtenue d'après la tendance observée dans le forage de Polastron (10082X0001)

### 3.4.2. Ouvrages prélevés ou subissant l'influence de prélèvements

#### 09287X0023 - Moulin de Repassac à Lectoure

Cet ouvrage est exploité en continu pour le thermalisme à un débit de 20 m<sup>3</sup>/h. N'étant jamais arrêté, aucune mesure statique du niveau piézométrique n'a pu être collectée pour cet ouvrage. La société REM, en charge du suivi de l'exploitation de la station pour le compte de ValVital, a transmis, chaque mois, une mesure du niveau dynamique. Celui-ci est passé de -12 m NGF, fin septembre, à -12,17 m NGF, début mai. Afin d'évaluer le niveau statique, nous nous sommes appuyés sur les indications fournies par la société REM : « *la seule information fiable dont on dispose est le niveau statique en 1998, avant réhabilitation du puits. Il était de +17mNGF. Nous ne pourrions pas avoir d'autre valeur, mais il est fort probable que la baisse de pression de l'aquifère [...] s'applique* » (communication personnelle, septembre 2017).

Afin de préciser le rythme de baisse qui est à retenir, le forage de Beaucaire (09541X0021/F), situé le plus proche géographiquement, a été utilisé. Sa chronique piézométrique permet de vérifier qu'entre 02/2001 et 12/2005, la baisse de pression observée est de 87,6 cm/an. Toutefois, cette baisse n'est pas linéaire par la suite et est même divisée par deux depuis une dizaine d'années. La baisse calculée est ainsi de 44 cm/an depuis 2008 (cf. illustration 16). Cette tendance se retrouve dans d'autres ouvrages : 58 cm/an à Polastron (10082X0001/F), 55 cm/an à Castelnau-Magnoac (10326X0009/F), 37 cm/an à Saint-Cricq (09824X0002/F) ou encore 29 cm/an à Lacquy (09266X0004/LC101). Par ailleurs, pour l'exploitant nous transmettant tous les mois le niveau dynamique mesuré, il a été observé une baisse de 27 cm, entre fin septembre et début mai, correspondant à un rythme de 44 cm/an.

La baisse de la piézométrie mensuelle depuis septembre 2017 a été évaluée sur la base d'une baisse de 87,6 cm/an, entre la dernière mesure statique du forage de Lectoure (+17 m NGF, en 1998) et 2005, puis d'une baisse de 44 cm/an par la suite.



Illustration 16 - Chronique piézométrique de Beaucaire : évaluation des tendances à la baisse

### 09545X0019 - Forage CV1 de Castéra-Verduzan

Ce forage est exploité en continu depuis plusieurs mois à hauteur de 4 m<sup>3</sup>/h et n'est jamais arrêté. La société REM, en charge du suivi de l'ouvrage pour le compte des thermes de Castéra-Verduzan, a transmis, chaque mois, le niveau dynamique et indiqué à quelle hauteur s'établissait la cote du niveau statique, celle-ci étant estimée généralement à une dizaine de centimètres au-dessus du niveau d'eau en exploitation (communication personnelle, septembre 2017).

### 09533X0016 - Forage de Gondrin

Le forage de Gondrin est exploité pour les besoins d'alimentation en eau potable par le Syndicat Armagnac Ténarèze. Les suivis de niveaux et débits collectés depuis 2015 font état de prélèvements continus sur cette période. Hydroassistance, en charge du suivi de ce forage, confirme que « les arrêts de pompage de longue durée sont très rares. De fait, les niveaux hauts mesurés avant reprise du pompage sont généralement un niveau en cours de remontée et non pas un niveau statique stabilisé. » (communication personnelle, octobre 2017). Il apparaît donc difficile d'évaluer un niveau statique chaque mois depuis septembre 2017. La chronique des niveaux mesurés depuis 2015 (illustration 17), dont le suivi est effectué à un pas horaire, fait apparaître une longue période de 38 jours (09/05/2017 au 16/06/2017) durant laquelle aucun prélèvement n'a été réalisé. Les mesures de cette période montrent un niveau quasi stabilisé autour de 11,08 m NGF. Devant l'impossibilité d'identifier une éventuelle tendance à la baisse sur la base des niveaux dynamiques mesurés, il est décidé retenir ce niveau de 11,08 m NGF pour la période de réalisation de la campagne.

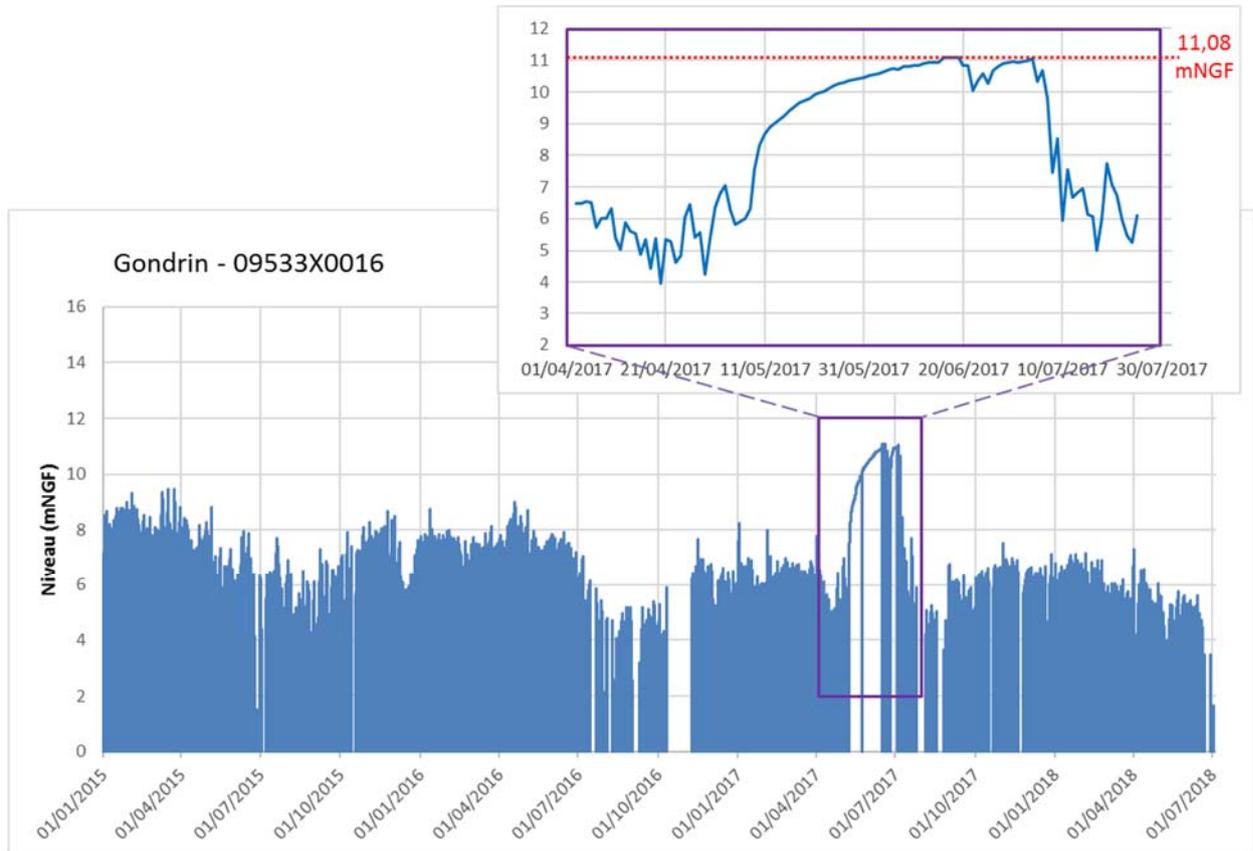


Illustration 17 - Chronique piézométrique de Gondrin et évaluation du niveau statique

### **09838A0421 - Puits du Ritouret à Blagnac**

Le puits du Ritouret alimente en continu le réseau de chaleur de la ZAC du Ritouret, ainsi que la piscine des Ramiers<sup>3</sup>. En raison d'un changement de délégataire intervenu au 1<sup>er</sup> octobre 2017, il n'a pas été possible d'avoir accès au forage pour réaliser une mesure. Toutefois, la société Véolia, nouveau délégataire, a transmis leurs mesures réalisées entre fin novembre 2017 et février 2018. Les mesures mensuelles réalisées à cette période sont représentatives du niveau statique, ceci ayant été rendu possible suite à un problème sur la pompe d'exhaure ayant nécessité l'arrêt du forage durant 3 mois, au cours desquels le niveau mesuré est resté stable. Ce niveau est utilisé pour l'ensemble de la période septembre 2017 / avril 2018, pour l'établissement des cartes piézométriques mensuelles.

### **09866X0074 - Forage de Valdurenque**

Ce forage AEP fait partie du réseau national de suivi quantitatif des eaux souterraines dont les mesures sont disponibles sur le portail ADES. La chronique piézométrique (illustration 18) fait état entre le 20 novembre et le 11 décembre 2017 de prélèvements engendrant un rabattement qui ne se résorbe que fin février 2018. Les piézométries de novembre 2017 à février 2018 sont estimées par interpolation linéaire.

<sup>3</sup> L'historique de l'utilisation des deux forages profonds de Blagnac est détaillé dans Wuilleumier et al. (2017).

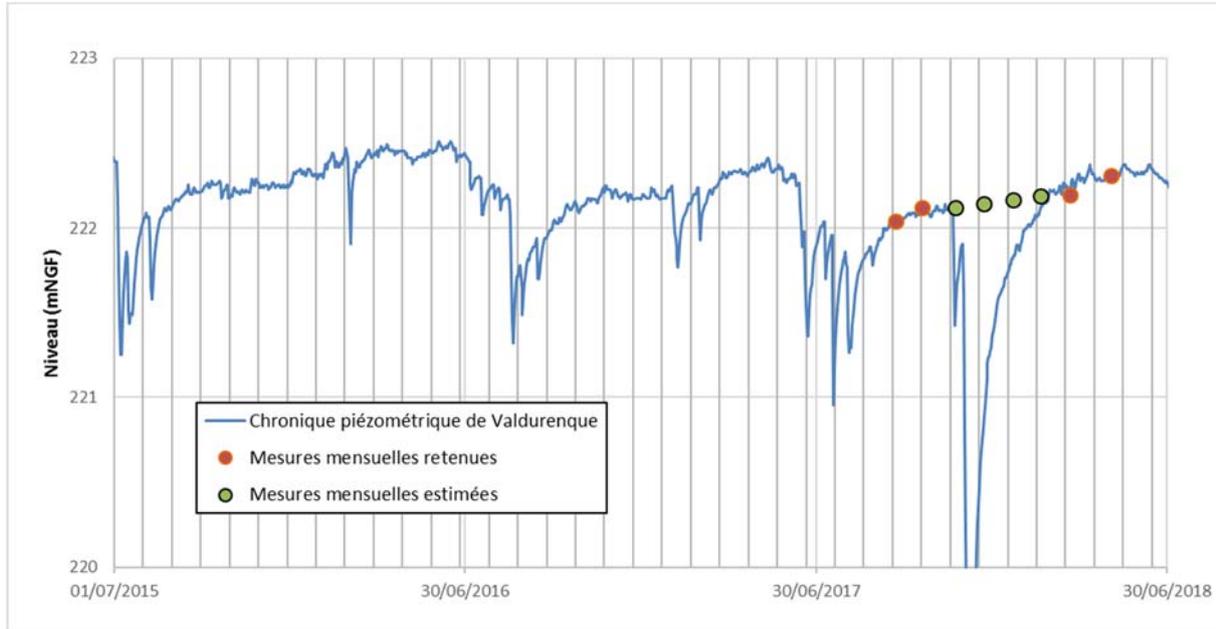


Illustration 18 - Chronique piézométrique de Valdurenque et mesures mensuelles associées

### 3.4.3. Ouvrages présentant des lacunes de mesures

#### ***Pour un problème d'accès à l'ouvrage***

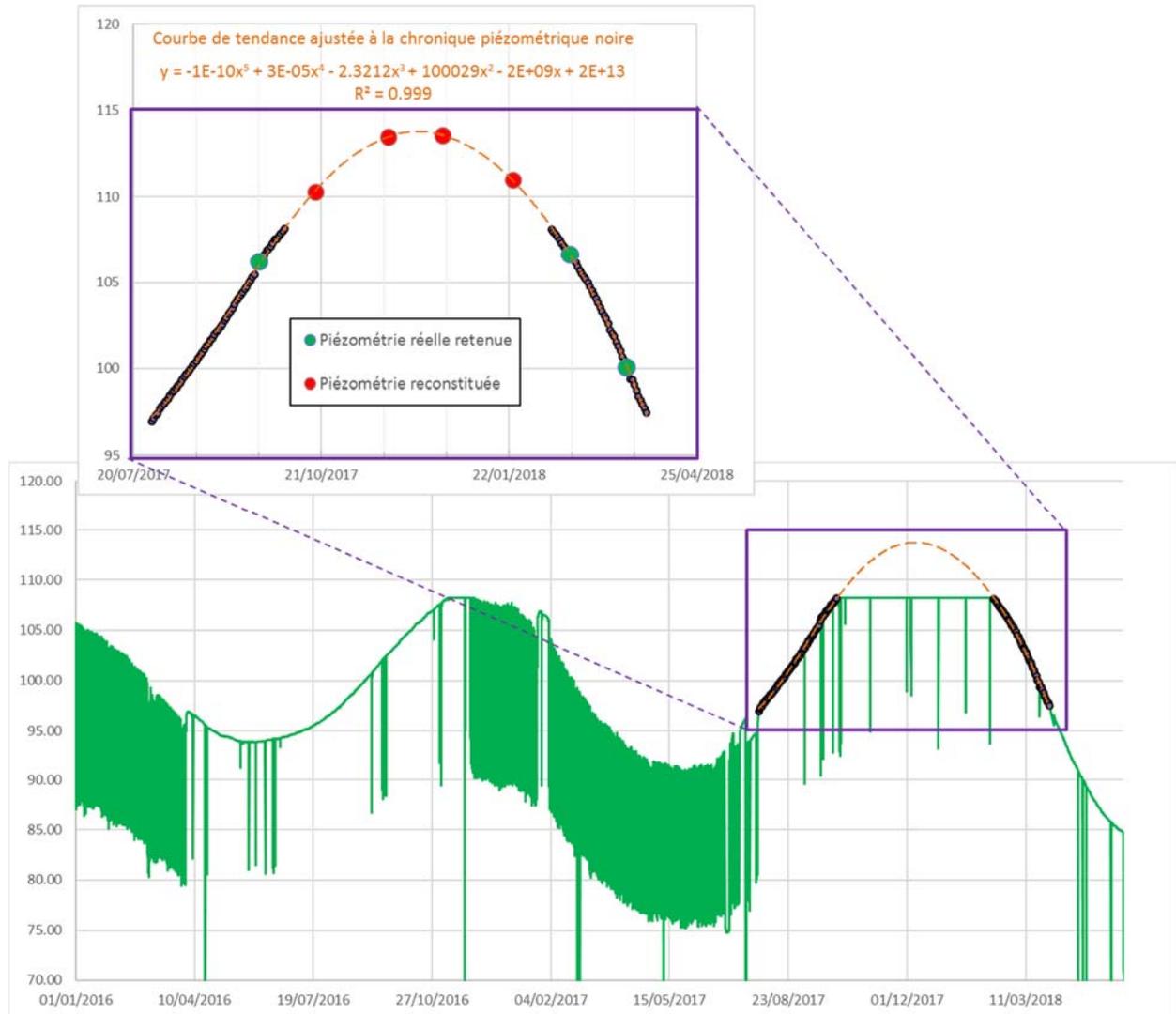
Le forage de l'usine KP1 à Graulhet dans le Tarn (09586X0008/F) n'a pas pu être visité en avril / mai 2018. La piézométrie mesurée durant le premier trimestre 2018 ayant été constante, un niveau équivalent est retenu pour celle d'avril.

Le forage d'eau potable de Guitalens-L'Albarède (09857X0104/F) dans le Tarn n'a pu être visité en avril / mai 2018. Le niveau piézométrique, relativement stable (battement de 30 cm constaté sur les mesures mensuelles de septembre 2017 à mars 2018) a été moyenné sur la période mesurée et reproduite pour avril / mai 2018.

#### ***Pour un problème lié au capteur***

Le forage de Burosse-Mendousse, dénommé également Le Prince ou Garlin (10052X0006/F1), dispose de données continues, enregistrées par la SAUR, pour le compte du Syndicat Mixte du Nord-Est de Pau, pour la période retenue pour l'établissement des cartes piézométriques mensuelles (septembre 2017 - mai 2018). Toutefois, un palier est observé dans les enregistrements, lorsque le niveau piézométrique dépasse 108,19 m NGF (illustration 19). Afin d'estimer le niveau piézométrique mensuellement, une courbe polynomiale de degré 5 a été appliquée sur la courbe noire, très peu influencée par les prélèvements et correspondant à la montée puis à la baisse du niveau piézométrique. L'application de cette courbe de tendance permet de reconstituer les variations de charges et amplitudes entre le 04/10/2017 et le 11/02/2018 et obtenir ainsi les piézométries des mois manquants. La i) très bonne adéquation des données élaborées avec les données mesurées avant et après la période à reconstituer, ii) la répétition d'une année à l'autre d'une dynamique de « hautes eaux » représentable par une fonction polynomiale et iii) l'absence d'identification de motifs susceptibles d'induire un changement d'hydrodynamique dans la gamme de cotes altimétriques concernées permettent d'accorder une confiance relative à cette reconstitution. Les charges hydrauliques obtenues,

malgré une amplitude pouvant apparaître élevée, restent en-deçà de celles du forage de Lalongue (10052X0037/F) situé en amont hydraulique et respectent ainsi le gradient local.



*Illustration 19 - Chronique piézométrique de Burosse-Mendousse et évaluation des niveaux piézométriques au-delà de 108,19 m NGF*

Le forage de Nogaro 2 (09528X0026/F) est suivi en piézométrie depuis plusieurs années par ANTEAGROUP pour le compte de TEREKA, dans le cadre de la surveillance du niveau piézométrique liée aux stockages de gaz de Lussagnet et Izaute, au même titre que le forage de Nogaro 1, dont l'exploitation est arrêtée depuis juin 1996. La chronique piézométrique (illustration 20) du forage de Nogaro 2 sur la période de septembre 2017 à avril 2018 fait état d'un dénoyage du capteur à partir du 1<sup>er</sup> février 2018 puis d'une panne de celui-ci. Un nouveau capteur ayant été mis en place fin avril 2018, il manque 2 données mensuelles (février et mars) pour élaborer les cartes piézométriques. L'estimation des niveaux piézométriques pour ces deux mois s'est appuyée sur la piézométrie de Nogaro 1 qui est systématiquement inférieure à celle de Nogaro 2 quand celui-ci n'est pas prélevé. Les écarts constatés sont variables mais sont de l'ordre de 8 m à cette période-ci de l'année. Ils sont ainsi reproduits en février et mars 2018 pour estimer la piézométrie de Nogaro 2.

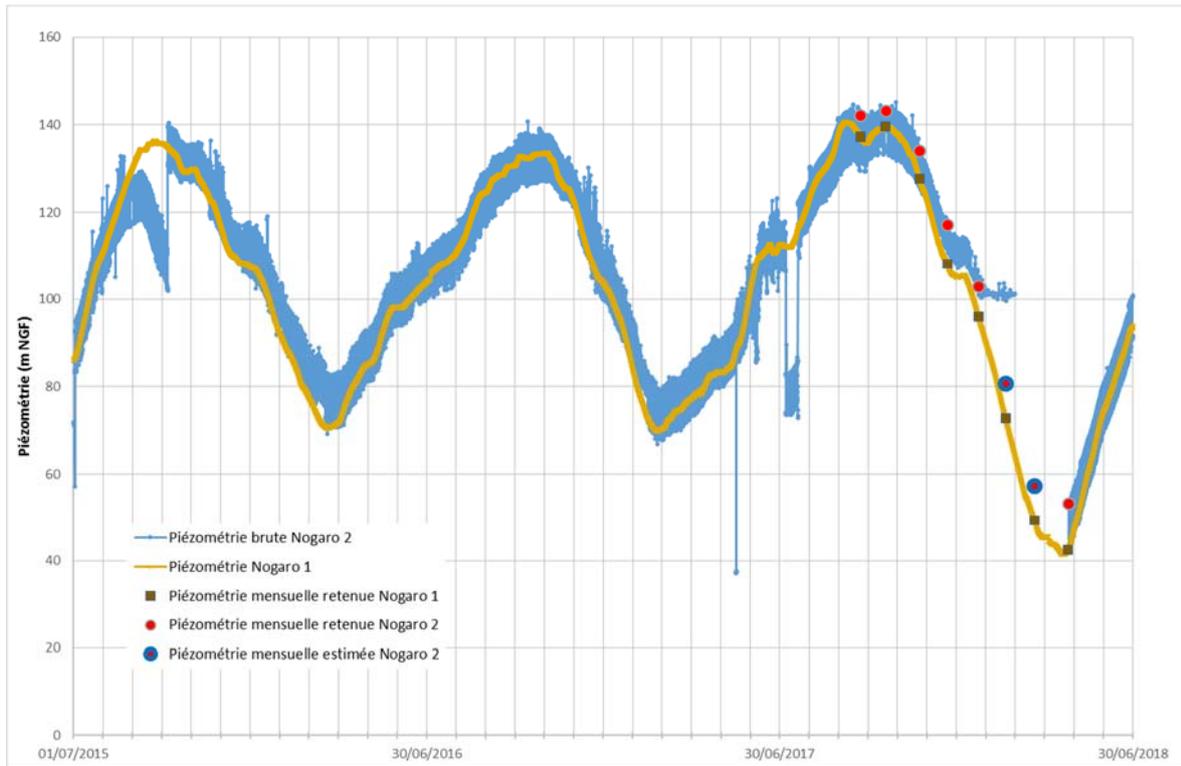


Illustration 20 - Piézométrie de Nogaro 1 & Nogaro 2 : reconstitution des données manquantes

### **Pour une indisponibilité ponctuelle des mesures**

Le forage de Castelnau-Magnoac (10326X0009/F) dispose de mesures ponctuelles réalisées deux fois par an et récupérables sur le portail d'ADES (illustration 21). Concernant la période retenue pour l'établissement des cartes piézométriques mensuelles, seules deux mesures sont disponibles (en octobre 2017 et en avril 2018). Les niveaux piézométriques estimés pour chaque mois de septembre 2017 à avril/mai 2018 s'appuient sur la baisse constatée d'après la chronique de l'ouvrage depuis le début des mesures en 1973 et plus particulièrement sur la pente déterminée entre avril 2013 et avril 2018.

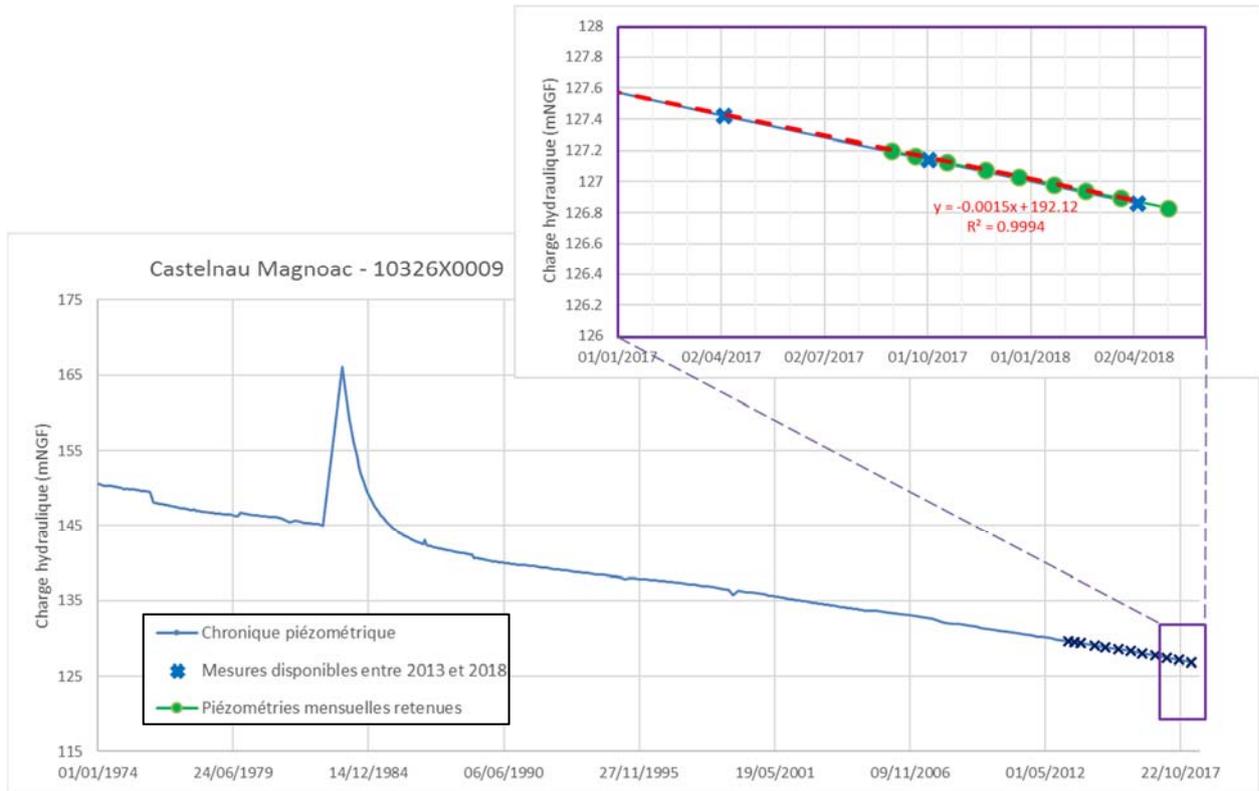


Illustration 21 - Piézométrie de Castelnau-Magnoac : reconstitution des données manquantes

### Autres causes

Certains ouvrages n'ont pu faire l'objet de mesures piézométriques à diverses périodes et pour de multiples raisons. Des précautions particulières seront donc à considérer lors de l'établissement des cartes piézométriques mensuelles afin d'obtenir une piézométrie au droit de ces ouvrages qui soit cohérente avec les dynamiques observées et les historiques connus de ces points. Les ouvrages et les lacunes observées sont synthétisés ci-après (illustration 22).

INDICE_BSS	Désignation	Lacune	Remarque
09527X0021	IZAUTE 101 à LAUJUZAN	Avril 2018	Les données enregistrées quotidiennement sont récupérables en différé en raison de la remontée de la capsule de mesure tous les 6 mois. La dernière remontée date de mars 2018.
09788X0069	GEAUNE 5 à GEAUNE	Septembre 2017 à février 2018	Le forage a été artésien sur cette période et le manomètre est inutilisable. La cote de l'artésianisme (99.192 mNGF) sera utilisée pour contraindre les cartes piézométriques sur cette période.
09788X0011	DUBASQUE / GEAUNE 3 à PÉCORADE	Avril 2018	L'ouvrage n'a pu être arrêté.
09268X0048	STATION THERMALE DE BARBOTAN NOUVEAU GRAND GEYSER "G2" à CAZAUBON	Décembre 2017	L'ouvrage a été rechemisé en décembre
09268X0050	STATION THERMALE DE BARBOTAN - F3 à CAZAUBON	Décembre 2017 à avril 2018	L'ouvrage a été rebouché en décembre
09788X0015	BATS URGON - MOULIN DES PERES à GEAUNE	Avril 2018	Le capteur a été dénoyé. Le niveau piézométrique est descendu en dessous de 90 mNGF, cote qui sera utilisée pour contraindre les cartes piézométriques.
09268X0049	BARBOTAN LES BAINS F.2 à CAZAUBON	Avril 2018	Mesure non réalisée par l'exploitant
09587X0002	FORAGE ETABLISSEMENT WEISHARDT (3) à GRAULHET	Toute la période	Ce forage est utilisé pour l'alimentation industrielle des établissements Weishardt (en complément du forage 09587X0003/F). Il est impossible d'arrêter totalement la production et toujours au moins un forage tourne. La proximité des deux ouvrages induit un impact de l'un sur l'autre et les mesures effectuées ne correspondent pas à une mesure stabilisée.
09784X0024	ETABLISSEMENT THERMAL (EF1) à EUGÉNIE-LES-BAINS	Janvier 2018	Problème technique de la Chaîne Thermale du Soleil
09784X0025	ETABLISSEMENT THERMAL (EF2) à EUGÉNIE-LES-BAINS	Janvier 2018	Problème technique de la Chaîne Thermale du Soleil
09784X0018	CHRISTINE-MARIE à EUGÉNIE-LES-BAINS	Décembre 2017 à février 2018	Sonde de niveau de la Chaîne Thermale du Soleil Hors service
10053X0002	LESPIELLE 1 à LESPIELLE	Toute la période	Aucune donnée disponible
09268X0062	THERMES BARBOTAN - LOTUS 1 à CAZAUBON	Toute la période	Selon la demande, les forages Lotus 1 et Lotus 2 sont prélevés et il est difficile de pouvoir les arrêter. Les forages, proches l'un de l'autre, s'impactent également.
09268X0063	THERMES BARBOTAN - LOTUS 2 à CAZAUBON		

Illustration 22 - Tableau des ouvrages présentant au moins une mesure de niveau manquante

### 3.4.4. Cas particulier du forage du Masca (09546X0022/F)

Ce forage fait partie du réseau national de suivi quantitatif des eaux souterraines et, à ce titre, dispose de mesures quotidiennes récupérables depuis le portail d'ADES (illustration 23). Si la chronique disponible ne souffre d'aucune lacune de données sur la période de mesure, un effondrement est survenu le 12 janvier 2018 à proximité, dans le secteur de la Fontaine Chaude, à Lavadens. Cet effondrement, qui s'est produit dans des calcaires crétacés karstifiés, a entraîné une perte totale du ruisseau de la Coulègne (de l'ordre de 200 l/s) (Calligée, 2018). Cette perte est venue alimenter l'aquifère du Crétacé supérieur et est susceptible de participer indirectement à l'alimentation de l'aquifère éocène.

L'étude conduite par Calligée en mars 2018 fait état d'une augmentation de la cote piézométrique du forage du Masca qui semble plus rapide depuis la date de la constatation de la perte, sans préciser si cette augmentation est en relation avec la perte de la Coulègne ou simplement due à la recharge pluviométrique, la pente restant semblable à celles observées lors des recharges des années précédentes (Calligée, 2018). Une attention particulière sera apportée à ce secteur lors de l'établissement des cartes piézométriques.

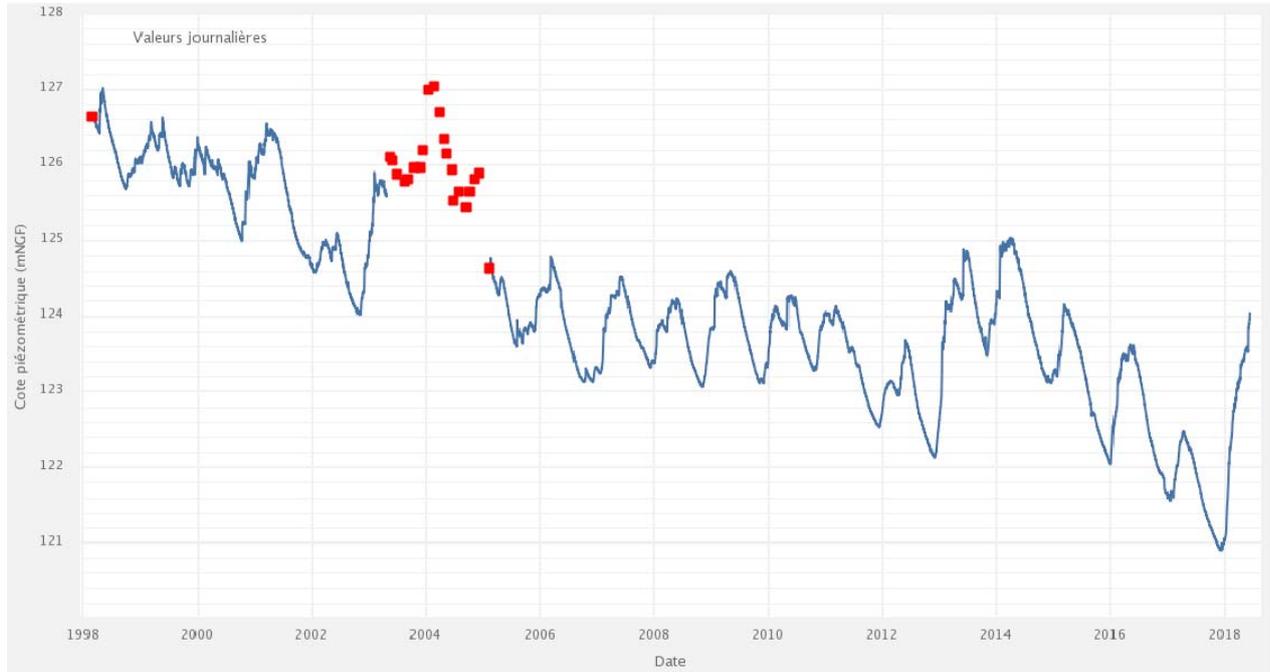


Illustration 23 - Piézométrie du forage du Masca (source : ADES)

### 3.4.5. Correction de la piézométrie selon la température et/ou la minéralisation de l'eau présente dans les forages

Un terme correctif a été apporté sur les mesures piézométriques pouvant être impactées par les effets thermiques et/ou densitaires intervenant dans la colonne d'eau. Ces corrections s'appuient sur la formule proposée par Rowe et Chou (1970) pour le calcul de la charge d'eau douce équivalente tel que présenté au chapitre 5 du présent rapport. Des tests numériques mettent en particulier en avant le fait qu'une température inférieure à 25°C ou une conductivité inférieure à 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ont peu d'impact sur la cote altimétrique (cf. partie 5.1.2).

#### **Détermination des valeurs de température à prendre en compte**

Pour appliquer un correctif à la mesure, il est nécessaire d'évaluer la température de l'eau au sein de l'aquifère. Celle-ci peut être obtenue, en l'absence de pompage, au travers d'une diagraphie thermique. En cas de pompage, une mesure de la température de l'eau d'exhaure permet d'approcher (minorer) la température de l'aquifère.

L'évaluation de la température de l'eau s'est effectuée à partir d'une recherche bibliographique et dans la banque de données ADES. Dans le cas où plusieurs mesures de température sont disponibles, la valeur maximale a été retenue. En cas d'absence totale de données de température, celle-ci a été estimée sur la base de celles des forages alentours et d'un gradient de température appliqué sur l'ensemble de la colonne d'eau (3°C par 100 m). Pour mémoire, l'hypothèse d'une évolution linéaire de la température au sein d'un forage a été discutée dans Willeumier et al. (2015).

La formule de correction liée à la température s'appuie sur la connaissance de la température en tout point de la colonne d'eau : en particulier, la température en tête de colonne est-elle à l'équilibre avec celle de l'air et des terrains avoisinants ou bien est-elle voisine de celle de l'eau présente au sein de l'aquifère ? Ceci dépend notamment de l'utilisation ou non de l'ouvrage avant

la mesure en statique : un retour à l'équilibre avec l'établissement d'un gradient de température au sein de la colonne de forage n'est pas rapide. Sur la base des discussions apportées dans le présent rapport (cf. chapitre 5), il est considéré pour les calculs de correction suivants qu'un arrêt de pompage d'un mois est suffisant pour rétablir le gradient thermique naturel. Dans ce dernier cas, la colonne d'eau a une température en surface fixée à la température inter-annuelle moyenne de l'air (prise par hypothèse à 14°C) et une température de fond égale à celle rencontrée au sein de l'aquifère. La connaissance des modalités d'utilisation des ouvrages a en règle générale permis de se prononcer sur l'établissement éventuel d'un gradient thermique au sein du forage. L'incertitude n'a réellement porté que sur 6 forages pour lesquels la durée d'arrêt de prélèvement avant la mesure est incertaine. Les tests effectués montrent que les variations de piézométrie obtenues entre la prise en compte ou l'absence de prise en compte d'un gradient est de l'ordre de 1 à 1,5 m.

### ***Détermination des valeurs de minéralisation totale à prendre en compte***

Les données relatives à la minéralisation des eaux sont peu nombreuses dans la littérature pour les ouvrages qui nous concernent. En dehors de ceux faisant partie des réseaux de suivis « qualité » départementaux à nationaux, ou de ceux disposant de diagraphies, il reste ainsi difficile d'obtenir des informations sur la minéralisation de l'eau. Pour y pallier, les données de conductivités voire de résistivités ont été collectées dans la littérature. Il est ensuite nécessaire, à partir de ces données, de convertir les conductivités à 20°C (les conductivités étant maintenant rapportées à 25°C, une correction de température est également apportée) en minéralisation globale des eaux en mg/l (voir relations dans Richard et Nguyen, 1961 et Rodier et al., 2016). Les résultats ont pu, dans certains cas, être confrontés aux données sur les résidus secs obtenus après séchage disponibles dans la littérature afin de s'assurer de la cohérence des ordres de grandeur de la minéralisation obtenue.

Les ouvrages ayant fait l'objet d'une correction de température et/ou de densité sont répertoriés dans le tableau en annexe 7, avec les valeurs de température et/ou de salinité considérées.

## 4. Évaluation de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou

### 4.1. CONTEXTE ET OBJECTIF

A l'instar des travaux menés pour évaluer la perméabilité à l'affleurement de la formation des argiles à graviers (Saplaïroles et al., 2017), il s'est avéré intéressant d'étudier le rôle joué par la formation des poudingues de Palassou dans la recharge des aquifères profonds.

La formation des poudingues de Palassou, d'origine continentale, correspond à des dépôts de piedmont syntectoniques, caractérisés par une importante variabilité de faciès, comprenant des sédiments argilo-marneux, des bancs calcaires et des complexes conglomératiques intercalés au sein des argiles. Issue du démantèlement des reliefs pyrénéens en cours de formation, son épaisseur totale est estimée à plus de 2 000 mètres.

Bien que de nombreuses sources soient présentes, principalement positionnées dans les vallons, à la base des horizons perméables conglomératiques, placés au contact des niveaux marneux de faibles perméabilités, très peu d'ouvrages (puits, ou forages) captent cet aquifère. Directement liée au peu de données existantes, une des problématiques concerne la délimitation géographique de cet aquifère en raison de son hétérogénéité de faciès (en liaison avec le mode de dépôts de cette formation), associée à une absence de continuité des niveaux.

La méconnaissance générale de cet aquifère, et en particulier les incertitudes liées à ses potentielles relations hydrauliques avec l'aquifère des Sables Infra-Molassiques, conduit à s'interroger sur le potentiel d'infiltration des eaux au sein des différentes formations caractérisant la série de Palassou, présentes sur le piémont pyrénéen. En effet, sous réserve d'une perméabilité suffisante et de relations hydrauliques avérées, l'importance de la zone concernée (plus de 300 km<sup>2</sup> uniquement dans les territoires ariégeois et haut-garonnais) est susceptible de générer des volumes de recharge significatifs.

Ces incertitudes ont donc conduit à réaliser une campagne de mesures de perméabilité de cette formation afin de caractériser les gammes de valeur en présence en fonction des différents faciès existants sur le piémont pyrénéen de l'Ariège et de la Haute-Garonne.

### 4.2. PRÉSENTATION GÉOLOGIQUE SYNTHÉTIQUE DE LA FORMATION DES POUDINGUES DE PALASSOU

Les principales caractéristiques géologiques de la formation des poudingues de Palassou, introduites dans le présent chapitre, sont issues des travaux de thèse de B. Crochet (1991), complétées par des informations mentionnées dans les différentes cartes géologiques à 1/50 000 concernées par cette formation dans les territoires ariégeois et haut-garonnais.

La formation des poudingues de Palassou, d'origine continentale, correspond à des roches sédimentaires détritiques, mises en place au cours de l'Eocène (de l'Yprésien (55,8 Ma) au Priabonien (33,9 Ma)). Ces dépôts de piémont syntectoniques, se caractérisant par une importante variabilité de faciès (illustration 24), peuvent toutefois être regroupés en trois grandes catégories de dépôts :

- ✓ sédiments argileux et argilo-marneux formant des dépressions dans le paysage,
- ✓ bancs de calcaires, intercalés dans les marnes, formant des reliefs en saillie,

- ✓ sédiments détritiques très divers allant de grès micacés les plus fins à des conglomérats très grossiers. Ces matériaux s'intercalent à tous niveaux de la série qui acquiert ainsi une certaine résistance à l'érosion et forment alors des reliefs vigoureux.

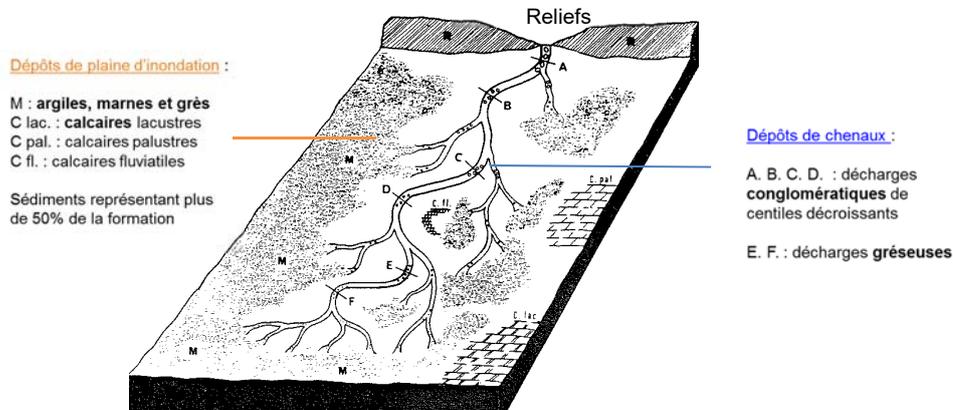


Illustration 24 - Modèle de sédimentation de la série du poudingue de Palassou, d'après B. Crochet (1991)

Les différents matériaux composant la formation de Palassou sont issus du démantèlement des reliefs pyrénéens en cours de formation. Ils ont ainsi été charriés par les cours d'eau et piégés dans des aires synclinales en bordure immédiate de la chaîne. Cette formation détritique présente la particularité d'être syntectonique et d'avoir ainsi enregistré toute la chronologie des déformations qui ont affecté la chaîne pyrénéenne.

Les dépôts de la formation de Palassou sont présents à l'affleurement dans tout le bassin d'avant pays nord-pyrénéen mais avec une continuité plus ou moins grande selon leur position orientale ou occidentale (illustration 25). En considérant comme position centrale le secteur de Sabarat-Pailhès (Ariège), la série de Palassou forme en affleurement une bande de largeur relativement constante de l'ordre de 2 km se poursuivant ainsi sur une dizaine de km en direction de l'est. Un changement intervient dans la région de Loubens (Ariège) avec une augmentation croissante de la largeur d'affleurement jusqu'à former un large éventail étalé sur plus de 15 km au méridien de Mirepoix en relation avec la remontée anticlinale induite par le horst de Trézières. Inversement, à l'ouest du secteur Sabarat-Pailhès, la série continue d'affleurer mais de façon intermittente, de plus en plus largement masquée par les formations molassiques post-éocènes et les dépôts plio-quadernaires présents en particulier au niveau du plateau de Lannemezan.

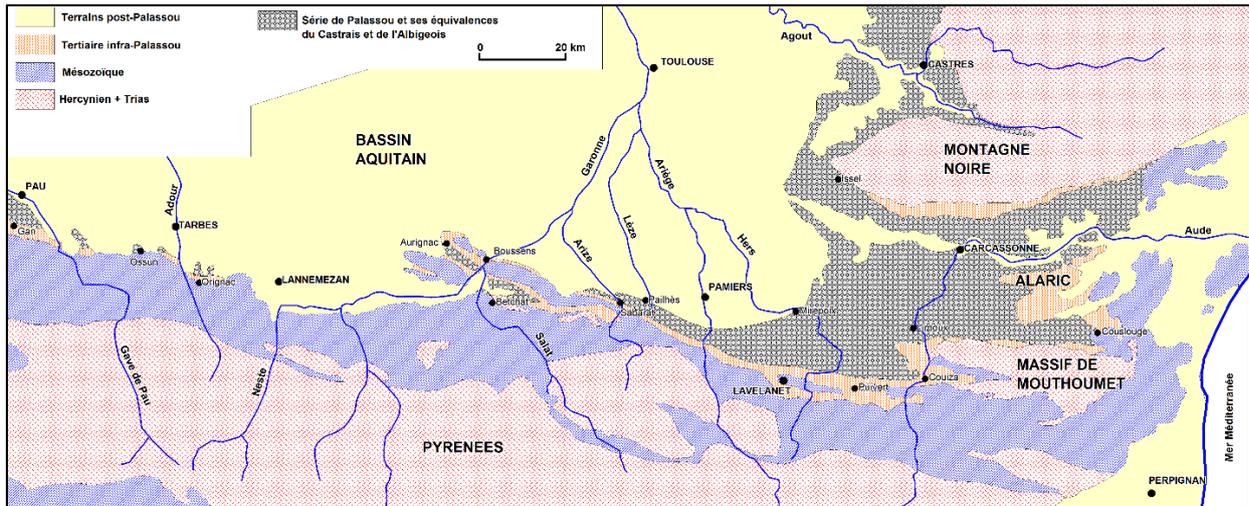


Illustration 25 - Localisation de la série de Palassou, d'après B. Crochet (1991)

La description des caractères structuraux, texturaux et lithologiques des différents terrains de la série de Palassou, dans le territoire ariégeois, a conduit B. Crochet, en 1991, à distinguer six formations successives au sein de cet ensemble, dont l'épaisseur totale est estimée de l'ordre de 2 000 m lorsqu'il est complet.

Pour chacune d'entre elles, leurs conditions de dépôts dans un contexte de bassin en continuelle déformation a induit une géométrie spécifique. Par ailleurs, avec la mise en évidence de deux discontinuités fondamentales plus ou moins nettement discordantes, ces six formations, déformées par des mouvements syntectoniques, ont été regroupées en trois unités tectono-sédimentaires (illustration 26). Chacune de ces unités montre un caractère granocroissant, marquée par une proportion de plus en plus forte des conglomérats dans la partie supérieure qui s'accompagne fréquemment d'une augmentation de la taille des clastes. Ces séquences traduisent des phases d'avancée et de recul des dépôts de piémont en lien avec la déformation du bassin et la dénudation de la chaîne pyrénéenne en cours de formation. La description de chacune de ces unités sur le territoire ariégeois (entre Sabarat et le horst de Tréziers) fournie par B. Crochet peut être synthétisée de la façon suivante :

- ✓ **Première unité** (Palassou inférieur - Ilerdien sup. - Lutétien sup.) succédant sans discontinuité apparente aux dernières assises marines de l'Ilerdien. Cette première unité correspond aux deux premières formations de la série, à savoir les couches supranummulitiques et les poudingues des serres inférieures.

Les **couches supranummulitiques** correspondent à des matériaux marno-gréseux au sein desquelles se manifestent des décharges conglomératiques de plus en plus fréquentes mais sans jamais former de complexes importants. La puissance de cette formation varie de 150 à 250 m et elle apparaît dans le paysage sous la forme de série de dépressions établies au pied des reliefs de la formation suivante. Les conglomérats de cette formation au centile modéré (10 à 15 cm) sont constitués en majorité de galets de roches du Mésozoïque de la zone nord-pyrénéenne (ZNP). Le terme statistique de centile est employé ici pour caractériser la granulométrie du conglomérat, à savoir la centième fraction la plus grossière de ce sédiment.

Le **Poudingue des serres inférieures** se caractérise par la prédominance des grès et des conglomérats (atteignant pour ces derniers jusqu'à 40% de la formation), souvent à fort centile (jusqu'à 60 ou 80 cm) traduisant une prédominance très nette des dépôts conglomératiques sur les faciès plus fins. La puissance de cette formation armant les reliefs des différentes cuestas de la zone varie de 250 à 400 m. Ces conglomérats sont

constitués d'une petite proportion de galets varisques et d'une forte dominance de matériel mésozoïque (dont majoritairement des calcaires de la ZNP).

Certaines décharges conglomératiques présentant un ciment fortement carbonaté avec en majorité des galets de calcaires se caractérisent localement par l'apparition de modelé karstique (gouffres, excavations...). Ces dépôts sont contemporains de la déformation de l'avant pays et de la mise en place des chevauchements frontaux de la chaîne pyrénéenne, ce qui se traduit par d'importantes discordances progressives à l'intérieur de cette formation, observables également localement dans la formation sous-jacente.

La première unité se termine par un faisceau calcaire repère (Calcaires de La Bastide-de-Bousignac) témoin d'une diminution de l'apport dans cette zone, encore mal comprise.

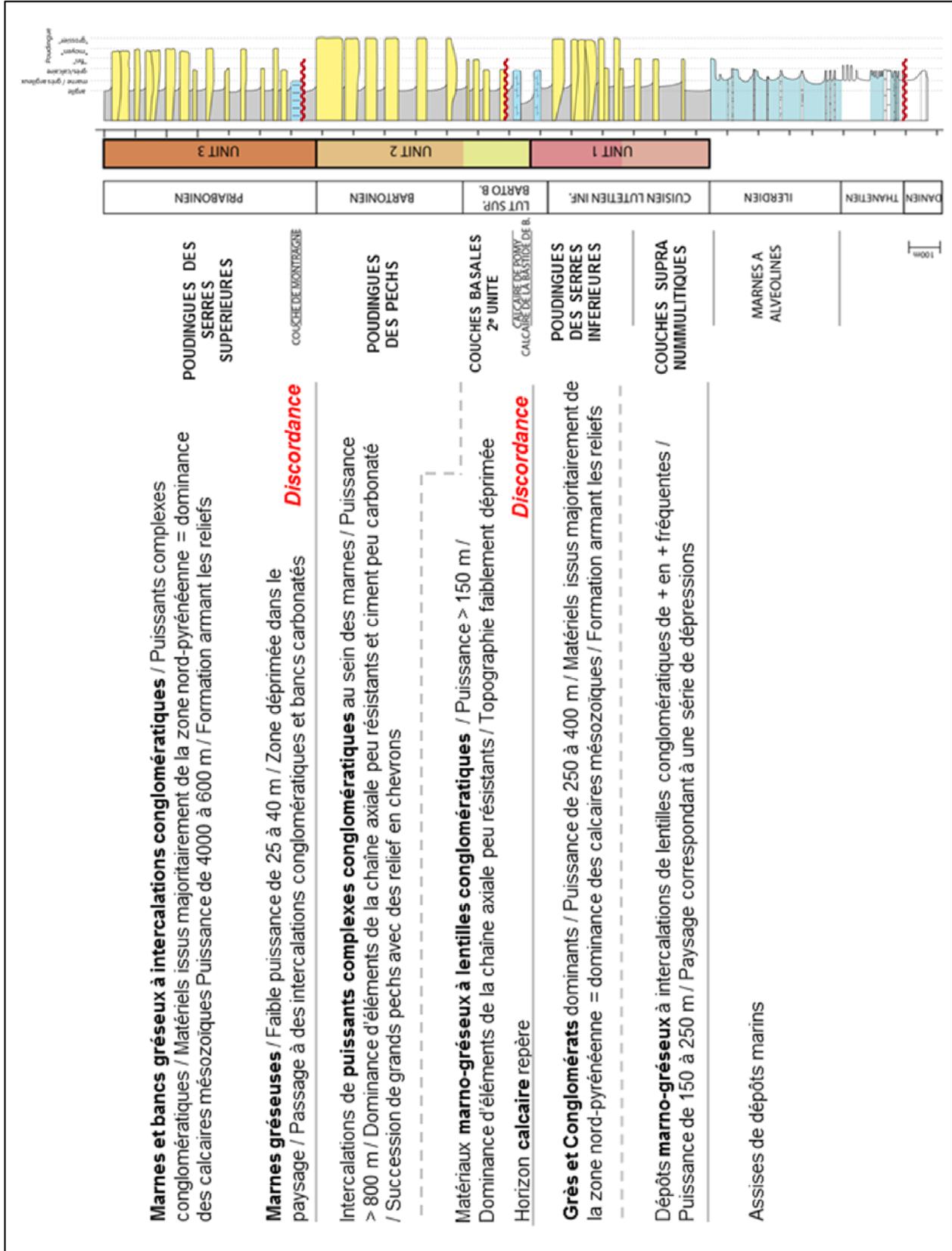


Illustration 26 - Unités tectono-sédimentaires, définies par B. Crochet (1991)

- ✓ **Deuxième unité** (Palassou moyen - Lutétien sup. - Bartonien sup.) démarrant par les formations des couches basales plus ou moins nettement discordantes sur les assises sous-jacentes. Cette deuxième unité correspond aux deux formations du milieu de la série, à savoir les couches basales et le poudingue des Pechs (illustration 26).

Les **couches basales de la deuxième unité**, dont la puissance dépasse 150 m entre la vallée du Touyre et celle de l'Ariège, correspondent dans la topographie à une zone légèrement déprimée. Elles sont représentées par des assises à marnes dominantes devenant progressivement de plus en plus gréseuses avec des lentilles conglomératiques progressivement plus nombreuses mais ne formant jamais de complexes rocheux importants et continus. La lithologie des conglomérats se singularise par la présence d'éléments varisques de plus en plus nombreux (calcaires griottes du Dévonien, granites altérés, gneiss...). Au sein de cette formation, les lentilles carbonatées constituant l'horizon repère des Calcaires de Pomy se sont développées à plusieurs niveaux.

Le **poudingue des Pechs** succède aux couches basales avec une accentuation des différentes caractéristiques : arrivée massive de matériel varisque, disparition des bancs carbonatés, granulométrie croissante. Cette formation est constituée de puissants complexes conglomératiques correspondant à des dépôts de cônes alluviaux plus ou moins intercalés dans des argiles. La taille des éléments y est considérable, le centile dépassant parfois le mètre. Toutefois, en raison de son origine varisque, une fraction importante du matériel conglomératique est peu résistante et s'altère facilement. Associé à un ciment peu carbonaté, il en résulte dans la topographie des reliefs en chevrons massifs mais peu accentués. La puissance de cette formation est particulièrement élevée, dépassant 800 m entre les vallées du Douctouyre et de l'Ariège.

- ✓ **Troisième unité** (Palassou supérieur - Priabonien). Cette troisième unité correspond aux deux formations sommitales de la série, à savoir les couches basales de la troisième unité et le poudingue des serres supérieures.

**Les couches basales de la troisième unité**, de faible puissance comprise entre 25 et 40 m, sont caractérisées par une nette discordance sur les assises détritiques des poudingues des Pechs. Cette formation détermine dans le paysage une zone plus déprimée et est constituée de marnes gréseuses en plaquettes (couche de Montragné) avec des intercalations conglomératiques, voire de petits bancs carbonatés.

**Le poudingue des serres supérieures** correspond à la formation sommitale de la série de Palassou. Elle constitue de vigoureux chevrons avec de nombreux affleurements présents dans la vallée du Douctouyre (Ariège). Elle est majoritairement représentée par des dépôts conglomératiques mais contenant également des marnes et des bancs gréseux. La puissance de la formation va en croissant d'est en ouest, estimée entre 400 et plus de 600 m. La base de la formation comprend des lentilles conglomératiques peu puissantes au centile modéré, s'agréant en complexes conglomératiques de plus en plus importants et à fort centile (> 30 cm) en s'élevant dans la formation. Les conglomérats sont majoritairement constitués de galets calcaires d'origine mésozoïque (matériel varisque faiblement représenté) associés à un enrichissement du ciment en carbonate. De véritables modelés karstiques peuvent être observés sur ces ensembles rocheux (falaises en surplomb, abris sous roches, grottes, paysages ruiniformes).

La carte de l'illustration 27 représente la répartition de l'ensemble de ces unités/membres de la série entre la limite des territoires audois et ariégeois (cartes de Mirepoix (1058) et de Lavelanet (1076)) et le synclinal de Bouzin (cartes de Saint-Gaudens (1055) et Le Fousseret (1033)). Les contours correspondants ont été établis sous SIG d'après les travaux cartographiques de B. Crochet et à partir des vecteurs des formations des différentes cartes géologiques à 1/50 000

de la zone. La sélection des formations concernées et la création des caissons correspondant aux différents unités/membres de la série a nécessité l'élaboration par carte de tableaux de correspondance. Pour certaines des cartes géologiques, à savoir celles de Mirepoix (1058), de Pamiers (1057) et du Mas-d'Azil (1056), une correction du tracé cartographique a été nécessaire pour retranscrire les délimitations de la série indiquées par B. Crochet.

Le toit de la série de Palassou est délimité par des molasses post-tectoniques datées du Rupélien basal par l'Accident de Vira, accident directionnel subvertical correspondant au réajustement isostatique au cours duquel se sont déposées les molasses.

En direction du secteur occidental entre Sabarat et Aurignac, la série de Palassou affleure de manière moins continue, masquée pour la plus grande partie par des dépôts quaternaires et molassiques post-éocènes. Malgré la discontinuité des affleurements, il est encore possible d'identifier la géométrie de la série et la distinction des unités entre Sabarat et Montbrun. Par la suite, entre les plateaux de Lasserre-Lahitère et la Garonne, les affleurements sont réduits à deux sites, l'un le long des berges du Volp en amont du Plan et l'autre sur la rive droite de la Garonne en aval de Mauran. Plus à l'ouest, seuls le synclinal de Bouzin en rive gauche de la Garonne et celui de Cassagne-Fabas en rive droite possèdent des affleurements de la série. A noter par ailleurs que sur ce secteur occidental la distinction des différentes unités/membres de la série n'a pas toujours été possible et est représentée cartographiquement de manière indifférenciée.

### **4.3. RECONNAISSANCES HYDROGÉOLOGIQUES DE TERRAIN**

Afin de pallier le peu de données bibliographiques à disposition permettant de caractériser le fonctionnement hydrogéologique des formations de la série de Palassou, des reconnaissances hydrogéologiques de terrain ont été menées à l'automne 2017 et en hiver 2018, dans les territoires de l'Ariège et de la Haute-Garonne.

En effet, seuls 18 points d'eau captant ces terrains sont recensés en Ariège dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et aucun ouvrage n'est indiqué dans le secteur haut-garonnais. A l'exception de 2 puits de faibles profondeurs (< 10m), il s'agit exclusivement de sources captées pour un usage d'eau potable. Toutefois, seulement 3 avis d'hydrogéologues agréés pour la protection sanitaire de ces captages AEP ont pu être collectés et ainsi fournir des informations synthétiques sur la ressource concernée.

Les principaux objectifs des reconnaissances de terrain sont les suivants :

- ✓ En l'absence de sources ou de points d'eau, diagnostiquer les formations géologiques selon leur capacité à constituer un aquifère (affleurement fracturé ou altéré, nature du ciment et des éléments constituant les conglomérats...). Ces diagnostics s'appuient également sur l'observation des paysages dans lesquels les affleurements s'inscrivent (présence de reliefs ou de zones de dépressions, d'accidents majeurs, etc.).

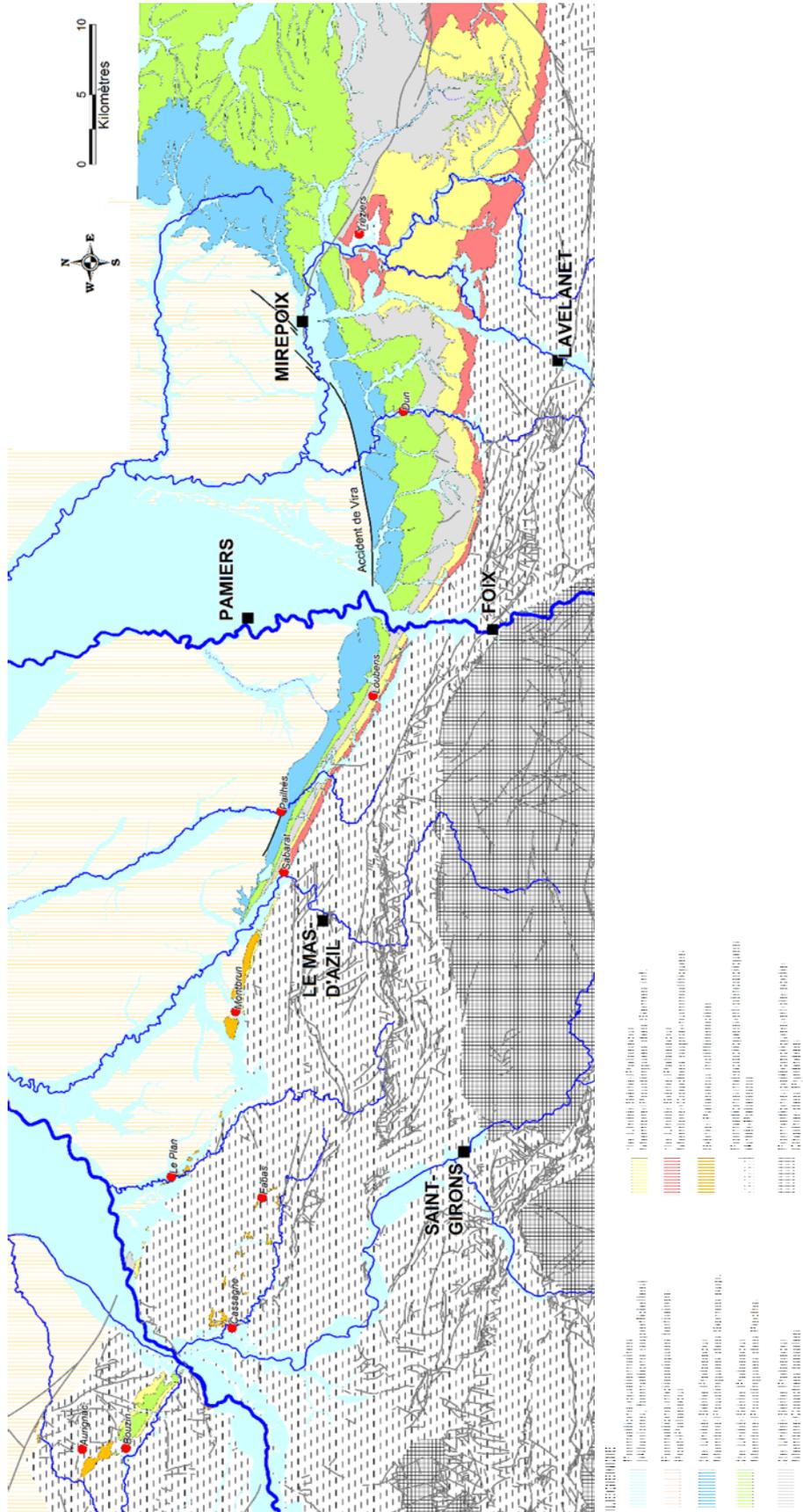


Illustration 27 - Unités tectono-sédimentaires des territoires ariégeois et haut-garonnais

- ✓ Effectuer des mesures *in situ* en période d'étiage sur les sources recensées (débit et paramètres physico-chimiques non conservatifs de terrain : conductivité électrique, pH, température) afin de mieux caractériser leurs propriétés et conditions d'émergence. Ces mesures permettent également d'établir une typologie des sources selon les formations aquifères en présence.
- ✓ Présélectionner des zones d'intérêt pour la mise en œuvre d'essais de perméabilité permettant de caractériser les différents faciès représentés dans la série de Palassou.

Au total, des observations de ce type ont été effectuées sur 95 points entre octobre 2017 et avril 2018, réparties en fonction des différentes unités/membres de la série. Sur ces 95 points, seulement 11 concernent des sources et des puits et 3 des cours d'eau, sachant que lors de ces reconnaissances certaines des sources étaient tarées et de nombreuses rivières en assec. Les 81 autres points correspondent à des observations hydrogéologiques et géologiques sur des affleurements et à des descriptions géomorphologiques du paysage (illustration 28). La carte de l'illustration 29 représente la répartition de ces différents types d'observations sur la zone d'étude.

L'ensemble des données collectées au niveau de ces points d'observation est synthétisé sous la forme d'un tableau présenté en annexe 8 comprenant :

- ✓ le code associé au projet, l'indice national BSS (pour les ouvrages souterrains reconnus, type sources, puits, forages), l'appellation du point, la commune, la nature du point d'arrêt et ses coordonnées (système géodésique WGS84),
- ✓ les résultats des mesures de débits, et les relevés des paramètres physico-chimiques,
- ✓ l'unité/membre de la série de Palassou concernée,
- ✓ les commentaires, justifications, et observations associés au point d'observation.

Type Points d'arrêt	Total	Palassou inf.		Palassou moy.		Palassou sup.	Palassou Indiff.	Autres
		Couch. supra-num.	Poud. Serres Inf.	Couch. Basales	Poud. Pechs	Pouding. Serres sup.		
Sources	10		4	3		1	1	1
Puits	1		1					
Cours d'eau	3				1			2
Affleurements	59	4	8	13	15	9	9	1
Prises de vue : observations géomorphologiques d'ensemble	22	2	2	4	3	9	2	
Total	95	6	15	20	19	19	12	4

*Illustration 28 - Tableau de répartition des types de points d'observation de terrain, en fonction des unités/membres de la série de Palassou*

L'ensemble des observations de terrain associé aux quelques données bibliographiques existantes souligne l'important contraste de perméabilité rencontré au sein de ces différentes formations, allant de terrains karstifiés à des séquences argilo-marneuses très peu perméables mais sans toutefois exclure qu'elles puissent jouer un rôle d'aquitard.

Les complexes conglomératiques, les bancs calcaires et les niveaux gréseux intercalés parfois sur de grandes épaisseurs au sein des séquences argilo-marneuses constituent des horizons favorables à des circulations d'eau. Le potentiel aquifère de ces horizons est toutefois fonction de leur degré de fissuration, induisant ainsi le développement plus ou moins grand d'une perméabilité de fissures. S'agissant de formations déformées par des mouvements tectoniques, comme mentionnée dans la présentation géologique, la majorité des affleurements de terrains indurés observés lors des reconnaissances est apparue fissurée, témoignant, du moins en surface, d'axes privilégiés de circulations hydrauliques.

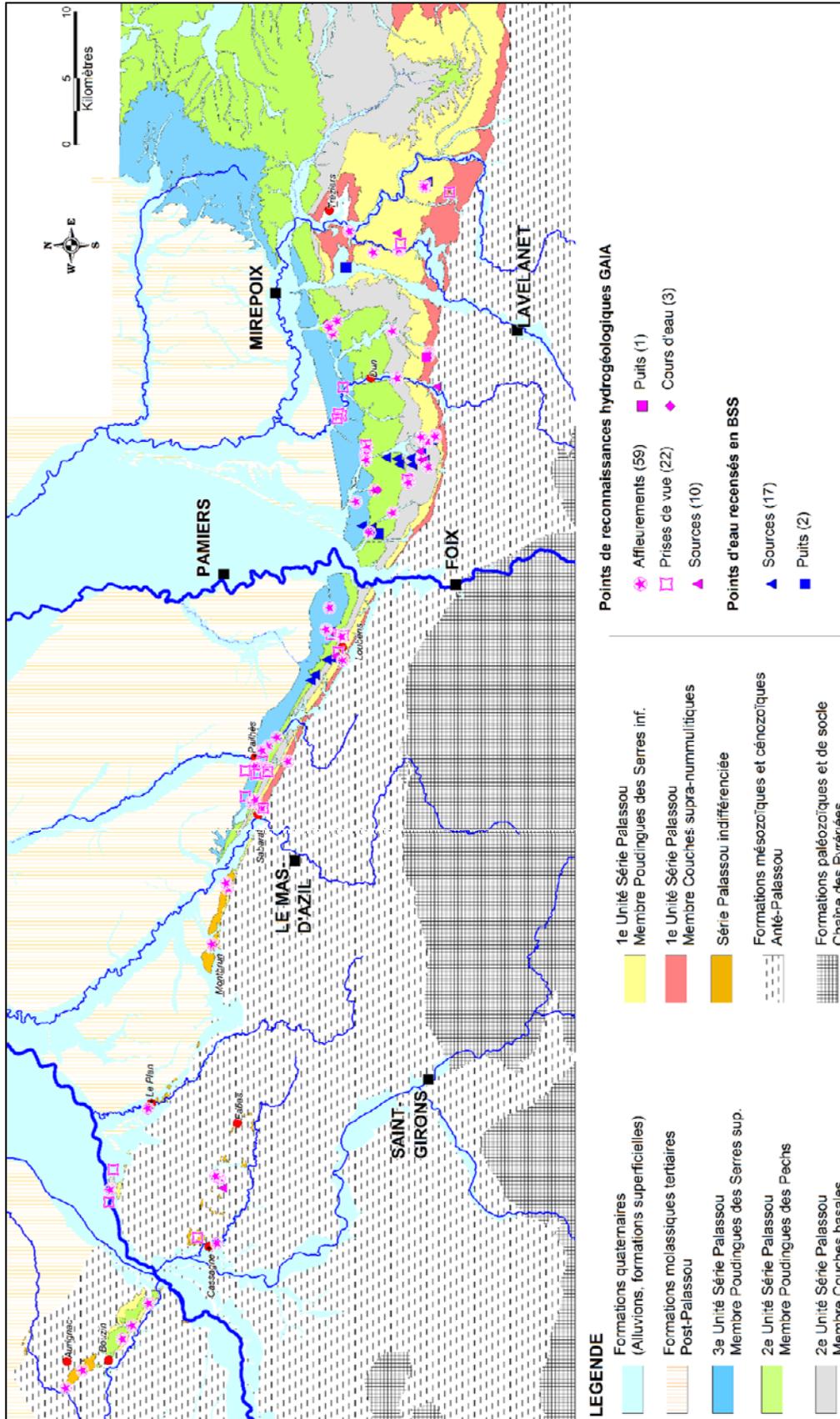


Illustration 29 - Localisation des points de reconnaissances hydrogéologiques effectuées sur les différentes unités/membres de la série de Palassou

Les sources en présence se positionnent majoritairement dans les vallons, à la base de ces horizons plus perméables conglomératiques, calcaires ou gréseux, au contact des niveaux marneux de très faibles perméabilités. Les circulations d'eau s'opèrent à la faveur de l'altération et/ou de la fissuration/fracturation affectant ces horizons, alimentées principalement par l'infiltration directe des précipitations. Ces sources présentent le plus souvent des débits d'étiage limités (quelques litres par seconde) mais *a priori* pérennes (selon les témoignages recueillis). Il s'agit donc d'aquifères aux capacités limitées caractérisés par de relativement faibles perméabilités.

D'intérêt hydrogéologique relativement limité dans les niveaux de surface, il semble néanmoins que des ressources en eau soient présentes en profondeur. En effet, les informations fournies par les rares forages réalisés dans le département de l'Aude mettent en évidence l'existence d'une ou plusieurs nappes captives isolées par les séquences argilo-marneuses de la série de Palassou. Les débits enregistrés au niveau de ces ouvrages sont néanmoins faibles mais constants, de l'ordre de quelques m<sup>3</sup>/h.

#### **4.4. SÉLECTION DES SITES ET MISE EN ŒUVRE DES CAMPAGNES DE MESURE**

##### **4.4.1. Sélection des sites pour la réalisation des essais de perméabilité**

Sur la base des reconnaissances géologiques des différentes unités/membres de la série de Palassou, à l'affleurement, dans le territoire ariégeois et haut-garonnais, une sélection de 12 sites a été effectuée pour la mise en œuvre des campagnes de mesures de perméabilité. En effet, les différentes reconnaissances réalisées ont permis d'apprécier l'importante variabilité de faciès de la série de Palassou à l'affleurement selon les secteurs, allant de marnes gréseuses peu perméables à des complexes conglomératiques plus ou moins fracturés et dans certains cas altérés. La carte de l'illustration 30 représente leur répartition géographique.

L'objectif recherché est ainsi de caractériser la perméabilité de ces différentes unités en fonction de l'hétérogénéité lithologique rencontrée. Deux méthodes distinctes tenant compte de la nature lithologique et de la profondeur d'investigation recherchée ont été mises en œuvre. Il s'agit pour les terrains indurés conglomératiques et les profils en profondeur de la méthode de Nasberg-Terletskata et de celle du perméamètre de Guelph, pour les séquences argilo-marneuses observées en sub-surface.

Par souci de simplification des démarches de demande d'autorisation, la recherche de parcelles communales a été privilégiée. Les critères de sélection de ces parcelles ont concerné la prise en compte concomitante de la variabilité de faciès définis au niveau des différentes unités/membres de la série, l'appréciation d'une faible épaisseur de terre végétale ou de terrains d'altération à forer avant d'atteindre la formation et l'existence de conditions d'accès relativement faciles notamment pour l'amenée de la sondeuse (méthode de Nasberg-Terletskata).

##### **4.4.2. Principes des méthodes employées**

A l'instar de la démarche mise en œuvre pour caractériser la perméabilité des différents faciès des argiles à graviers dans le Tarn (Saplaïroles et al, 2017), les méthodes expérimentales de mesures de la perméabilité des sols réalisées *in situ* (contrairement à des dispositifs menés en laboratoire) et à l'échelle ponctuelle (à la différence de dispositifs mis en œuvre à l'échelle parcellaire) ont été privilégiées. En effet, ces dernières permettent de répartir l'information dans l'espace tout en limitant la détérioration de l'état de surface du sol.

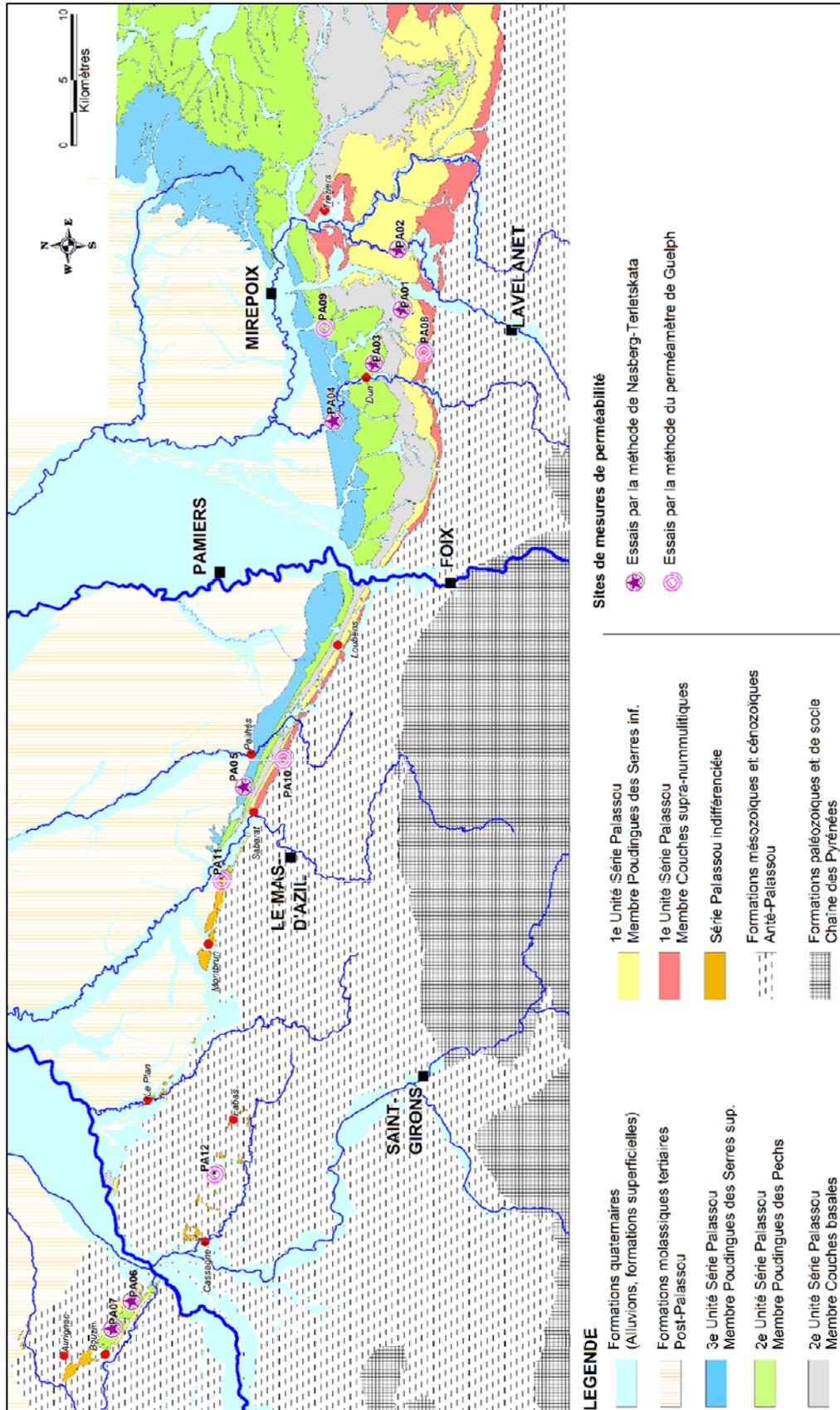


Illustration 30 - Carte de localisation des sites investigués pour les campagnes de mesures de perméabilité de la série de Palassou (Ariège - Haute-Garonne)

Pour les deux méthodes sélectionnées (cf. partie 4.4.1), un trou de tarière ou un forage est réalisé dans les terrains à investiguer permettant ainsi d'atteindre le niveau de mesure des paramètres hydrauliques souhaité. Les techniques de mesure de la perméabilité<sup>4</sup> *in situ* mises en œuvre font appel à l'infiltration d'eau sous contrainte (charge hydraulique constante) dans un volume de terrain réduit, saturé de façon incomplète, entouré de terrains non saturés à teneur en eau variable.

a) Méthode de Nasberg-Terletska

Le principe de l'essai consiste à mesurer le volume d'eau qui s'écoule à partir d'un trou de tarière ou de sondage dans lequel une charge hydraulique est maintenue constante. Bien qu'influencée par la nature des autres couches sollicitées par l'écoulement, la perméabilité horizontale ainsi déterminée reflète en premier lieu la perméabilité des couches les plus perméables.

La mise en œuvre de l'essai consiste dans un premier temps à réaliser un sondage de diamètre  $d$  dans la formation ou l'horizon à tester (illustration 31). De l'eau est ensuite versée avec un débit  $Q$  contrôlé de façon à maintenir au fond de l'ouvrage une colonne d'eau de hauteur  $h$  constante. Le contrôle du niveau d'eau est effectué à l'aide d'une sonde électrique. L'essai est stoppé lorsque le débit, noté à intervalle de temps régulier, devient constant.

La méthode de calcul de la perméabilité a été décrite par Terletska (1954) à partir de l'équation suivante :

$$K = \frac{0,423}{h^2} Q \log_{10} \frac{4h}{d}$$

dans laquelle :

$K$  (m/s) exprime la perméabilité du terrain

$d$  (m) est le diamètre du forage avec  $25 < \frac{h}{d} < 100$

$h$  (m) est la hauteur de la colonne d'eau dans le forage

$Q$  (m<sup>3</sup>/s) est le débit d'eau absorbé par le forage

La perméabilité ainsi mesurée s'applique à un volume de sol contenu dans un cylindre ayant pour axe le forage et un diamètre  $D$  (illustration 31) tel que :

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi K}}$$

$D$  en m  
 $Q$  en m<sup>3</sup>/s  
 $K$  en m/s

---

<sup>4</sup> Le terme de perméabilité employé ici correspond à la « perméabilité des hydrogéologues » employée par G. De Marsily (1981) pour regrouper les différentes terminologies existantes comme la perméabilité dite de Darcy ou le coefficient de perméabilité (Castany et Margat) ou encore la conductivité hydraulique (Banton et Bangoy) (Wuilleumier et al, 2015).

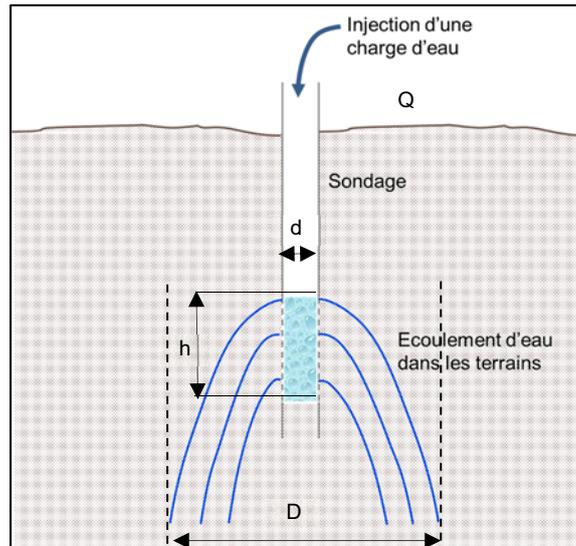


Illustration 31 - Schéma de principe de l'essai Nasberg-Terletska

#### b) Méthode du perméamètre de Guelph

La présentation des concepts théoriques et des définitions portant sur les mesures de perméabilité réalisées à l'aide d'un perméamètre de Guelph est détaillée dans le rapport Saplaïroles et al (2017). Pour rappel, cet instrument permet d'estimer la perméabilité à saturation des terrains et les paramètres hydriques dont elle dépend. Le champ d'application de cet appareil correspond à une gamme relativement étendue de perméabilités mesurées dans les sols variant entre  $10^{-8}$  et  $10^{-4}$  m/s.

#### 4.4.3. Mises en œuvre des campagnes de mesures

Parmi les 12 sites identifiés pour la réalisation des mesures d'infiltration, 7 d'entre eux concernent la mise en œuvre d'essais par la méthode de Nasberg-Terletska et 5 autres par la méthode du perméamètre de Guelph.

Ces investigations ont été effectuées dans un contexte hydrogéologique de recharge printanière faisant suite à une longue période excédentaire en précipitations (recharge hivernale) retranscrit par une relative homogénéité du degré d'humidité des terrains rencontrés, majoritairement frais à humide.

##### a) Spécificités opératoires liées aux essais par la méthode de Nasberg-Terletska

Comme mentionné précédemment, les essais réalisés par la méthode de Nasberg-Terletska ont nécessité au préalable la foration de sondages (illustration 32). Ces derniers ont été réalisés en diamètre 90 mm par foration destructive au marteau fond de trou (forage à l'air) dans les terrains indurés conglomératiques et au trilame dans les séquences argilo-marneuses. Ces sondages concernent des profondeurs comprises entre 8 et 11 m. Les paramètres de forage (vitesse d'avancement, pression d'injection, pression sur l'outil et couple de rotation) ont été enregistrés en continu et les cuttings de forage prélevés tous les mètres. Les coupes interprétatives de chaque sondage sont fournies en annexe 9.

A partir des relevés des coupes de sondage, les hauteurs de mise en œuvre des essais ont été sélectionnées, sachant que la mesure d'une perméabilité moyenne sur plusieurs mètres englobant plusieurs niveaux a été privilégiée plutôt qu'une mesure ponctuelle d'un niveau particulier.

Afin de s'approcher des conditions optimales de mise en œuvre de ce type d'essai, la saturation préalable des terrains sur la hauteur de mesure a été nécessaire, parfois durant plusieurs heures. Par la suite, un obturateur gonflable est descendu à la profondeur souhaitée au sein du sondage. L'obturateur est ensuite mis en pression contre les parois de ce dernier pour assurer l'étanchéité de la hauteur de mesure. Un tube permettant l'injection d'eau est positionné entre la base de l'obturateur des terrains et la surface du sol (illustration 32).

La foration des sondages et la mise en œuvre des essais de perméabilité se sont déroulées du 26 mars au 03 avril 2018 et ont été exécutées par l'entreprise 2GH.



*Illustration 32 - Photographies de mises en œuvre des campagnes de mesures pour la réalisation des essais de perméabilité par la méthode de Nasberg – Terletskata*

b) Spécificités opératoires liées aux essais par la méthode du perméamètre de Guelph

Afin de prendre en considération la variabilité locale, 3 essais successifs ont été menés sur les 5 sites investigués par la méthode du perméamètre de Guelph. Le nombre de mesures dépend de l'hétérogénéité locale observée, et du compromis souhaité entre la précision de la mesure et le temps disponible à y consacrer. Ainsi, 15 essais ont été réalisés au total sur cette campagne qui s'est déroulée du 06 au 17 avril 2018.

Dans un objectif de représentativité des mesures réalisées, une attention particulière a été portée sur le contexte de mise en œuvre des essais notamment vis-à-vis :

- de la caractérisation réelle des séquences argilo-marneuses de la série de Palassou et non des formations superficielles la recouvrant. La difficulté consiste à se positionner en contrehaut de l'affleurement bien identifié, tout en s'assurant d'une relative faible épaisseur de terrains à creuser pour accéder aux marnes. En moyenne, plus de 26 cm de terrains ont été ôtés lors de la campagne de mesures (avec pour certains sites un maximum de 40 cm) et les trous de tarière atteignent en moyenne 45 cm de profondeur,

- de l'occupation du sol en présence et notamment d'éviter les terrains remaniés (sous une action anthropique de type parcelle cultivée ou talus de route ou une action naturelle de type loupe de glissement) susceptibles d'augmenter la perméabilité.

En complément des essais d'infiltration, une description sommaire du terrain investigué a été effectuée. En effet, certains facteurs pédologiques, comme en particulier la texture ou la structure sont des éléments majeurs dans la détermination de la perméabilité (une texture équilibrée favorisant une structure stable et ainsi un bon potentiel d'infiltration). Dans le cas présent, et dans une optique de première approche (sans analyse de sols en laboratoire, notamment granulométrique ou de densité), la description effectuée a concerné la détermination de la texture de la matrice (par diagnostic tactile) et de sa couleur (selon la charte de couleur de Munsell), puis de la proportion, de la nature, de la taille et de la forme des éléments grossiers emballés dans la matrice. L'ensemble de ces données est consigné en annexe 10.

#### 4.5. ANALYSE DES RÉSULTATS

Les campagnes d'essais de perméabilité à partir des deux méthodes précédemment présentées ont concerné les différentes unités/membres tectono-sédimentaires de la série de Palassou identifiées par B. Crochet. Ainsi, hormis pour les couches basales de la deuxième unité où un seul essai a pu être mis en œuvre, deux essais ont été réalisés pour chacune des autres unités/membres.

Les tableaux de l'illustration 33 synthétisent les résultats de perméabilité obtenus lors de ces deux campagnes de mesures en les associant aux différents faciès de la série caractérisés.

Essais de perméabilité - Méthode de Nasberg-Terletska							
Num Site Essai	Appellation	Date Essai	Unité/Membres Série Palassou	Prof. Chambre d'essai (m)	Diam. Vol. Sol concerné par essai (m)	Faciès perméable Chambre Essai	K (m/s)
PA01	Limbrassac	03/04/2018	Unité 2 - Couches basales	3,0 - 7,5	5	Conglomérats à matrice marno-gréseuse	3E-08
PA02	Belloc	03/04/2018	Unité 1 - Poudingue des Serres Inferieures	3,0 - 6,8	4	Marnes sableuses à fins niveaux de calcaires argileux	1E-08
PA03	Dun	03/04/2018	Unité 2 - Poudingue des Pechs	2,0 - 10,1	9	Conglomérats à matrice gréséo-carbonatée à marno-gréseuse par niveau	3E-08
PA04	Vira	29/03/2018	Unité 3 - Poudingue des Serres Superieures	2,0 - 10,0	9	Conglomérats avec matrice alternant gréséo-carbonatée, gréséo-marneuse, marno-gréseuse	1E-07
PA05	Pailhès	30/03/2018	Unité 3 - Poudingue des Serres Superieures	2,0 - 10,1	9	Marnes à Marnes gréseuses à cailloutis calcaires	3E-10
PA06	Mancioux	29/03/2018	Unité 1 - Poudingue des Serres Inferieures	2,0 - 5,1	4	Conglomérats à matrice gréséo-carbonatée	4E-07
PA07	Auzas	30/03/2018	Unité 2 - Poudingue des Pechs	2,4 - 10,4	9	Conglomérats avec matrice alternant gréséo-carbonatée et marno-gréseuse	1E-05

Essais de perméabilité - Méthode du perméamètre de Guelph						
Num Site Essai	Appellation	Date Essai	Unité/Membres Série Palassou	Profondeur trou de tarière (cm)	Faciès	K (m/s)
PA08	Pradettes	06/04/2018	Unité 1 - Couches Supra-Nummulitiques	42 à 45	Marnes argileuses de teinte ocre à grise	2E-08
PA09	Besset	12/04/2018	Unité 2 - Poudingue des Pechs	41 à 43	Marnes indurées de teinte ocre-rosée se débitant en plaquettes	2E-08
PA10	Pailhès	13/04/2018	Unité 1 - Couches Supra-Nummulitiques	49 à 52	Niveaux marneux de teinte ocre à passées grises plus indurées très plastiques avec présence de cailloutis de quartz	3E-08
PA11	Campagne-sur-Arize	16/04/2018	Série de Palassou Indifférenciée	41 à 45	Niveaux marno-sableux de teinte ocre	6E-09
PA12	Cerizols	17/04/2018	Série de Palassou Indifférenciée	43 à 46	Marnes de teinte blanche à beige contenant de très nombreux cailloutis de calcaires et de quartz	2E-08

Illustration 33 - Résultats des mesures de perméabilité de la série de Palassou (Ariège - Haute-Garonne) obtenus lors des campagnes de mars et avril 2018

La perméabilité mesurée par la méthode de Nasberg-Terletska s'applique à un volume de sol contenu dans un cylindre ayant pour axe le forage et un diamètre D relativement limité compris entre 4 et 9 m environ selon les sites investigués.

Le graphique de l'illustration 34 représente la répartition des valeurs de perméabilités moyennes en fonction des sites et des unités/membres de la série caractérisées mais sans distinction de la méthode employée lors des deux campagnes de mesures. A partir de cette représentation en échelle logarithmique, il est possible de faire ressortir 5 gammes de valeurs pour les 12 sites de mesures, à savoir :

- valeurs de perméabilité supérieures à  $10^{-6}$  m/s ;
- valeurs de perméabilité comprises entre  $10^{-7}$  et  $10^{-6}$  m/s ;
- valeurs de perméabilité comprises entre  $10^{-8}$  et  $10^{-7}$  m/s ;
- valeurs de perméabilité comprises entre  $10^{-9}$  et  $10^{-8}$  m/s ;
- valeurs de perméabilité inférieures à  $10^{-9}$  m/s.

En première analyse et de manière globale, de très faibles valeurs de perméabilité sont retranscrites pour les différents terrains de la série de Palassou investigués, soient des valeurs majoritairement inférieures à  $10^{-7}$  m/s. Ainsi sur les 12 sites de mesures, seulement trois d'entre eux présentent des valeurs supérieures à  $10^{-7}$  m/s, dont un seul se caractérisant par une perméabilité supérieure à  $10^{-5}$  m/s.



Abréviation des unités/membres de la série de Palassou. SPI : Série de Palassou Indifférenciée, U1-CSN : Unité 1 - Couches Supra-Nummulitiques, U1-PSI : Unité 1 - Poudingue des Serres Inferieures, U2-CB : Unité 2 - Couches basales, U2-PP : Unité 2 - Poudingue des Pechs, U3-PSS : Unité 3 - Poudingue des Serres Supérieures

Illustration 34 - Répartition des valeurs moyennes de perméabilité mesurées lors des campagnes de mars/avril 2018 (éch. logarithmique) en fonction des sites et des unités/membres de la série de Palassou

Plus en détail, une importante hétérogénéité de valeurs mesurées est observée au sein des différentes unités/membres de la série. Ainsi, dans les cas les plus extrêmes ces différences peuvent varier d'un facteur 40, à 400 voire 600 pour respectivement l'unité 1 des poudingues des serres inférieures, l'unité 3 des poudingues des serres supérieures et l'unité 2 des poudingues des Pechs. Les deux derniers ensembles investigués à partir de 2 essais à savoir l'unité 1 des Couches Supra-Nummulitiques et les terrains de la série de Palassou indifférenciés présentent des valeurs relativement homogènes, du moins du même ordre de grandeur.

La carte de l'illustration 35 permet de visualiser la répartition géographique des 5 gammes de valeurs de perméabilité obtenues. Au vu des premiers constats formulés par l'analyse du graphique de l'illustration 34, il apparaît clairement que cette répartition des valeurs de perméabilité n'est pas conditionnée par le secteur géographique où se localisent les différentes unités mais bien logiquement par la variabilité lithologique de la série dans son ensemble. Le graphique de l'illustration 36 représente la répartition des valeurs de perméabilités moyennes en fonction du faciès lithologique dominant sur la tranche de terrains mesurée.

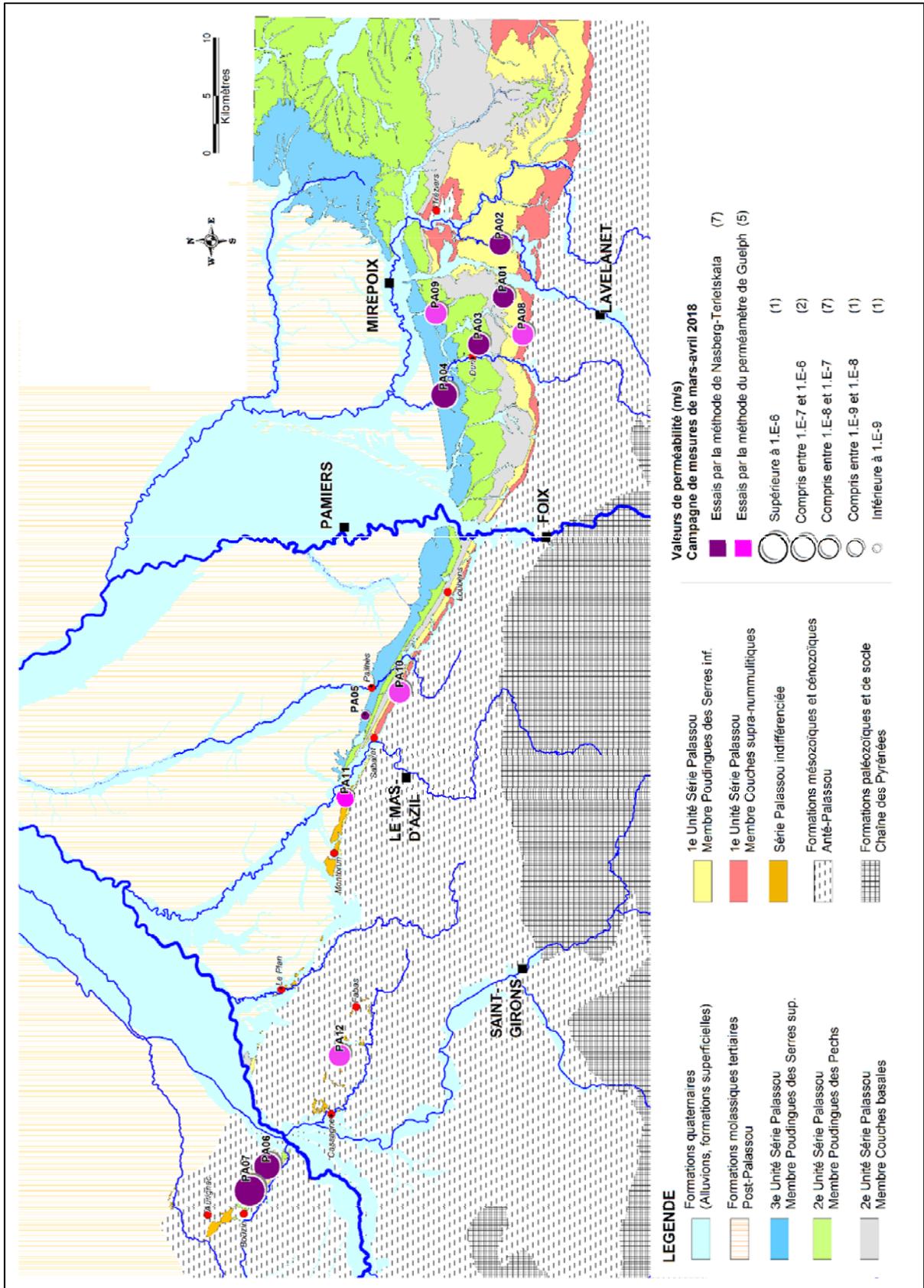


Illustration 35 - Répartition des valeurs moyennes de perméabilité des différentes unités/membres de la série de Palassou, en Ariège et Haute-Garonne (campagnes de mesures de mars et avril 2018)

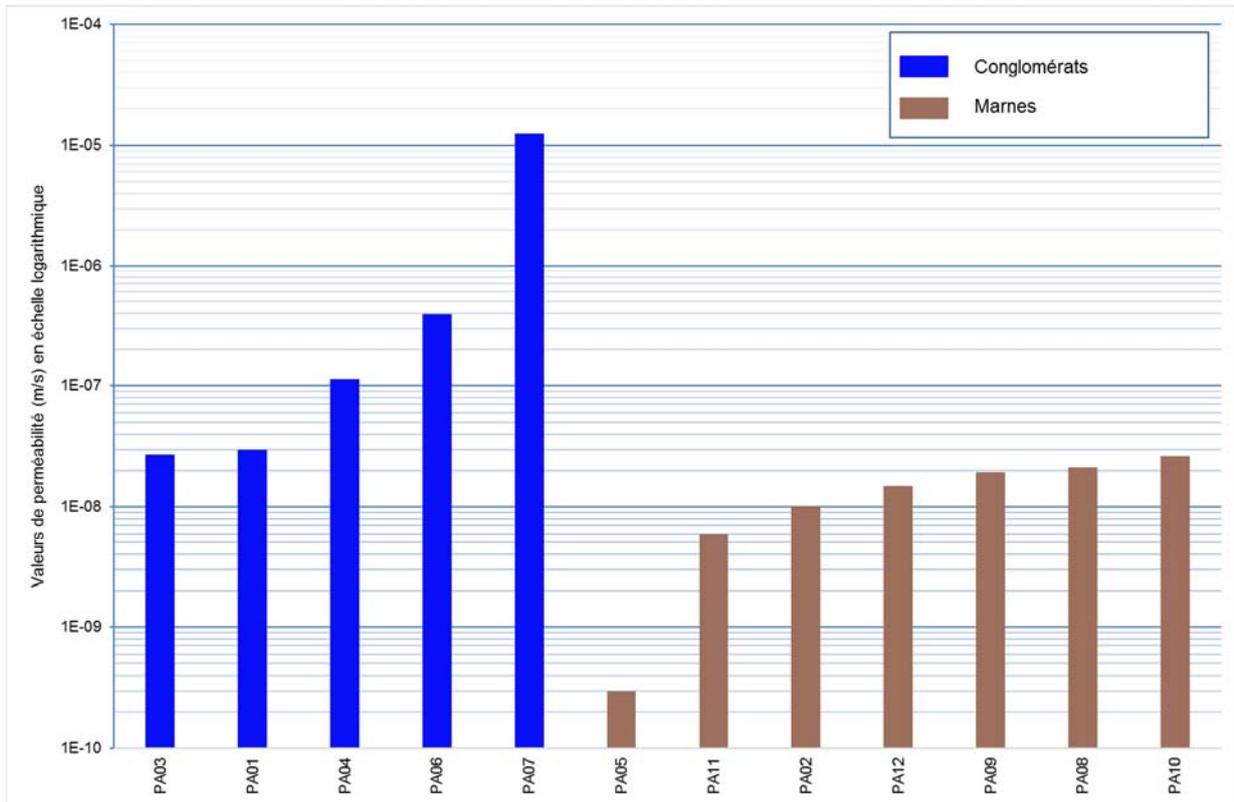


Illustration 36 - Répartition des valeurs moyennes de perméabilité mesurées lors des campagnes de mars et avril 2018 (échelle logarithmique), en fonction du faciès lithologique dominant, dans la tranche de terrain investigué

Il ressort des données de ce graphique une répartition des valeurs de perméabilité en fonction du faciès investigué au sein de la série. Ainsi, de manière simplifiée :

- le faciès conglomératique investigué à partir de 5 sites se caractérise par des perméabilités globalement comprises entre  $3 \cdot 10^{-8}$  m/s et en un point supérieures à  $10^{-5}$  m/s avec une variabilité des valeurs pouvant être reliée à la nature de la matrice. Ainsi, les conglomérats à matrice marno-gréseuse présentent une perméabilité de l'ordre de  $10^{-8}$  m/s et ceux à matrice gréso-carbonatée de l'ordre de  $10^{-7}$  m/s. La valeur la plus élevée supérieure à  $10^{-5}$  m/s a été mesurée sur le site d'Auzas (PA07) présentant sur les 6 premiers mètres un faciès altéré, faiblement consolidé favorisant l'infiltration de l'eau. Un autre paramètre est susceptible d'interagir dans les variations de perméabilité rencontrées au sein des différents conglomérats : il s'agit du degré de fissuration les affectant. Toutefois la technique de forage employé au marteau fond de trou n'a pas permis son évaluation,
- le faciès marneux investigué à partir de 7 sites est caractérisé par des perméabilités relativement homogènes, de l'ordre de  $10^{-8}$  m/s, voire pour la valeur la plus faible de l'ordre de  $10^{-10}$  m/s.

## **4.6. DISCUSSION**

### **4.6.1. Série de Palassou**

Le travail présenté dans ce chapitre est une première approche permettant d'apporter des ordres de grandeur de la perméabilité caractérisant la série de Palassou sur le piémont pyrénéen ariégeois et haut-garonnais. En effet, ce type d'investigations, n'ayant jamais été mis en œuvre sur la zone, fait ressortir la variabilité des valeurs de perméabilité rencontrées en relation avec le faciès de la formation caractérisée.

Les résultats de ces différents essais de perméabilité confortent les interprétations des observations de terrain réalisées en préalable aux campagnes de mesures qui soulignaient cet important contraste de perméabilité entre les différentes formations de la série.

Plus en détail, les résultats obtenus par ces essais de perméabilité pour les faciès conglomératiques intercalés au sein des séquences argilo-marneuses confirment que ces niveaux constituent des horizons favorables à des circulations d'eau, sachant que certains d'entre eux présentent même de véritables modelés karstiques, accentuant cette favorabilité.

L'association de ces premières valeurs de perméabilité, obtenues dans le programme GAIA, avec la description des caractères structuraux, texturaux et lithologiques des différents terrains de la série de Palassou et les cartographies associées réalisées par B. Crochet constituent un premier guide dans une volonté d'extrapolation et de représentation de la répartition spatiale des zones favorables à l'infiltration. Toutefois, la principale difficulté pour atteindre cet objectif réside dans la méconnaissance de la géométrie et dans la finesse de cartographie des complexes conglomératiques toute unité tectono-sédimentaire de la série confondue.

Ce type d'investigations n'ayant jamais été mené sur la zone apporte d'un point de vue général des informations intéressantes en termes de potentialité de recharge de la nappe, même si la faible connaissance du contexte géologique en profondeur ne permet pas d'appréhender précisément le cheminement des eaux souterraines des formations de recouvrement vers l'aquifère profond. Ainsi, un autre verrou de connaissance est à lever au niveau de la variabilité verticale de la perméabilité de cette formation, comme en témoignent les faciès hétérogènes observés dans les levés géologiques entrepris à l'occasion des essais de perméabilité ou sur les données de forage existantes dans le département de l'Aude. Il apparaît donc que, la géométrie multi-niveaux de cet aquifère sera un élément important à prendre en considération pour caractériser la potentielle alimentation des SIM par la série de Palassou.

A cette méconnaissance, s'ajoute le questionnement en cours au sujet de la zone de transition des dépôts de la série de Palassou avec les faciès des « Grès à Nummulites », ces derniers étant par ailleurs relativement éloignés de la zone d'affleurement de la série de Palassou. Les travaux géologiques actuellement menés indiquent qu'à grande échelle, seule la première unité de la série de Palassou est susceptible d'avoir un contact géométrique avec la formation des « Grès à Nummulites ». Toutefois, de grandes incertitudes perdurent sur la géométrie de cette zone de transition en raison du nombre limité d'affleurements et/ou de données de forages ou d'investigations géophysiques appropriées.

### **4.6.2. Comparaison avec les résultats de perméabilité obtenus pour la formation des argiles à graviers**

Dans une même optique de détermination des ordres de grandeur de la perméabilité caractérisant la formation des argiles à graviers présente à l'affleurement, une campagne de

mesures d'infiltration avait été effectuée en 2017 sur le territoire de l'Albigeois-Castrais. Les résultats obtenus avaient fait ressortir la variabilité des valeurs de perméabilité rencontrée, se répartissant entre  $10^{-7}$  et  $10^{-6}$  m/s pour les faciès les plus fins et atteignant  $10^{-5}$  m/s pour les faciès grossiers de la formation.

En comparaison avec les gammes de valeurs de perméabilité mesurées pour la série de Palassou, s'échelonnant entre moins de  $10^{-8}$  m/s et plus de  $10^{-5}$  m/s, un constat général fait ressortir une meilleure perméabilité pour la formation des argiles à graviers. Toutefois, au-delà des valeurs obtenues, il est important de garder à l'esprit l'existence de forts contrastes de perméabilité au sein des différents faciès de la série de Palassou, mais aussi de la présence de grands contrastes au sein même des faciès reconnus. Cette variabilité identifiée est alors principalement fonction du degré de fissuration et/ou d'altération des niveaux conglomératiques investigués et de la nature de leur matrice.

Par ailleurs, les méthodes distinctes mises en œuvre pour caractériser les gammes de perméabilité des deux formations influent également sur les résultats présentés. En effet, la méthode du perméamètre de Guelph, employée pour caractériser la formation des argiles à graviers mais aussi les faciès marneux de la série de Palassou, a uniquement permis de mesurer les niveaux de surface (premier mètre) sans fournir d'informations sur la potentielle variation de perméabilité en profondeur. A l'inverse, la méthode de Nasberg-Terletska a permis d'investiguer en profondeur (à partir de sondages profonds entre 8 et 11 m) l'alternance des différents faciès représentant la série de Palassou, sachant que les valeurs mesurées correspondent à une perméabilité moyenne sur plusieurs mètres, englobant plusieurs niveaux plus ou moins perméables.

Quoi qu'il en soit, sous réserve d'une relation hydraulique avérée avec l'aquifère des Sables Infra-Molassiques, les données acquises à partir de ces investigations de terrain d'une part pour les argiles à graviers de l'Albigeois-Castrais et d'autre part, pour la série de Palassou du piémont pyrénéen, améliorent la connaissance hydrogéologique de ces deux formations et permettront à termes de mieux contraindre le modèle hydrogéologique.

## 5. Effets de la thermique et de la minéralisation sur la piézométrie

En hydrogéologie, des esquisses piézométriques sont couramment réalisées à partir de mesures des niveaux de nappes dans divers ouvrages (forages, puits, piézomètres). C'est à partir de ces esquisses que sont notamment définis les sens d'écoulement des eaux souterraines. Dans les aquifères peu profonds (température faible) et avec des eaux peu minéralisées (eau douce), ces niveaux piézométriques mesurés sur le terrain reflètent directement les charges hydrauliques. Dans le cas de forages profonds, il devient par contre nécessaire de tenir compte de la salinité (potentiellement plus importante) et des températures qui augmentent en fonction de la profondeur (gradient géothermique, cf. Annexe 11), ces deux paramètres influençant notamment la masse volumique de l'eau. Ces phénomènes peuvent donc poser potentiellement des problèmes d'interprétation si l'on ne tient pas compte de ces derniers sur la mesure piézométrique. *Vandenbeusch (1976) indiquait notamment qu'« il apparaît ainsi que la hauteur de fluide incompressible  $1\text{g/cm}^3$ , équivalent à la pression réelle au toit du gisement aquifère profond, peut être assez différente de la hauteur de la colonne d'eau dans l'ouvrage. Cette remarque indique donc que l'établissement de cartes dites "piézométriques" basées sur une cartographie directe des niveaux mesurés in-situ peut fausser, dans certains cas, l'étude des mécanismes hydrodynamiques dans le réservoir aquifère ».*

Cet aspect a été décrit à plusieurs reprises dans la bibliographie relative aux Sables Infra-Molassiques (de façon non exhaustive : Seguin, 2003 ; Douez, 2007 ; Malcuit, 2008 ; David, 2010) et des calculs correctifs ont été proposés. Le rapport d'année 1 du projet GAIA (Wuilleumier et al., 2015) revient en partie sur ces correctifs. Toutefois, généralement et faute d'avoir des données de salinité et de température en tout point de la colonne d'eau, le calcul sur la charge s'effectue avec :

- pour la salinité : en l'absence de profil de salinité (ce qui est souvent le cas), une valeur constante sur toute la hauteur de la colonne d'eau est prise ou bien une valeur moyenne si plusieurs mesures ont été réalisées.
- pour la température : en l'absence de profil thermique dans la colonne, une variation linéaire de la température est admise.

Plusieurs questions sur ces approximations et donc sur la validité de ces calculs se posent :

- Quelle est l'évolution de la minéralisation au sein d'une colonne d'eau (circulation interne au sein du forage, interactions physico-chimiques avec les tubages, etc.) ?
- Quels paramètres à prendre en compte suite à un pompage ? Par exemple, quel est le temps de retour à l'équilibre de la température et quelles sont les cinétiques associées à l'évolution de la minéralisation ?

L'analyse de la bibliographie montre globalement que deux communautés s'intéressent aux mécanismes intra-puits : la communauté des hydrogéologues et une communauté s'intéressant à la mécanique des fluides dans la colonne d'eau. La communauté composée essentiellement des hydrogéologues cherche à proposer des approches intégrées permettant de corriger les mesures de niveaux piézométriques en utilisant des données de température et de densité (Luszczynski, 1961 ; Oberlander, 1989 ; Post et al., 2007).

La seconde communauté est focalisée sur les aspects processus/mécanismes se produisant dans le puits. Il s'agit principalement des processus de diffusion et de convection en lien avec les

gradients de température et de concentration. Cette communauté recouvre différents domaines tels que l'océanographie (étude des transferts entre couches de différentes salinités et températures), l'astrophysique, la géophysique, les milieux poreux. Des auteurs ont publié des articles plus spécifiques sur les processus dans les puits, que ce soit des puits de mines de grande taille (Wolkersdorfer, 2008, Hamm et Bazargan Sabet, 2010) ou dans des puits d'eau (Love et al., 2007).

Il apparaît ainsi que deux communautés travaillent sur différents phénomènes relatifs à la pression de la colonne d'eau d'un forage, sans vraiment d'interactions entre elles. Par ailleurs, il est assez surprenant de constater que ces deux communautés ne font généralement pas référence l'une à l'autre.

La première partie du présent chapitre s'intéressera donc à la vision « hydrogéologique » de la colonne d'eau d'un forage et le calcul des niveaux piézométriques avec :

- le calcul théorique des charges hydrauliques comparables entre elles ;
- la réalisation de tests visant à sérier les effets de la température et de la minéralisation (salinité) sur la colonne d'eau :
  - o influence de la température de l'eau sur la charge piézométrique pour une minéralisation faible et constante de 100 mg/l et pour différentes hauteurs de colonne d'eau, selon deux hypothèses différentes, à savoir i) une colonne d'eau entièrement à température équivalente à celle de l'eau dans l'aquifère ou ii) la même colonne d'eau dont la température de surface est égale à la température inter-annuelle moyenne de l'air (prise par hypothèse à 14°C) et dont la température évolue linéairement avec la profondeur.
  - o influence de la minéralisation sur la charge piézométrique, pour une température faible et constante de 14°C et pour différentes hauteurs de colonne d'eau.
- l'analyse du retour à l'équilibre thermique suite à un pompage ;
- une liste de quelques facteurs impactant potentiellement les niveaux piézométriques est également proposée ;
- enfin, une application sur des ouvrages du sud du Bassin aquitain est présentée.

La deuxième partie du chapitre présente la vision mécanistique de la colonne d'eau (diffusion, convection) et une synthèse est apportée dans une dernière partie.

Ce chapitre n'a pas la prétention de présenter l'ensemble des phénomènes pouvant influencer sur la colonne d'eau, ni de répondre à l'ensemble des questionnements soulevés. Il permet toutefois de lancer plusieurs pistes de réflexion pour mieux appréhender la colonne d'eau d'un ouvrage profond.

## **5.1. THERMIQUE ET DENSITÉ DANS LES FORAGES PROFONDS - APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE**

### **5.1.1. Calcul de la charge hydraulique dans un forage profond**

Cette partie vient en complément du travail de synthèse réalisé en année 1 (Wuilleumier et al., 2015) sur les effets de la température et de la minéralisation sur le niveau piézométrique et en particulier sur la méthode proposée par Seguin (2000) (cf. Annexe 12).

Dans un système où la masse volumique  $\rho$  varie spatialement, la charge  $h$  ne représente pas directement les variations de pression  $P$  (à la différence de la pression, la charge est dépendante de la densité). Pour une même valeur de pression, il peut correspondre des valeurs de charge différentes en fonction de la masse volumique de l'eau.

Dans les milieux à masse volumique variable, il est donc préférable d'utiliser la pression de l'eau et sa masse volumique plutôt que la charge hydraulique. Cependant, la mesure du niveau piézométrique demeure la mesure la plus facile à réaliser et la moins coûteuse expliquant la faible utilisation de la pression.

Pour pouvoir comparer les charges hydrauliques de différents piézomètres d'un milieu à masse volumique variable, une correction de la masse volumique est donc nécessaire. On se ramène alors au cas d'un milieu à masse volumique constante en normalisant les charges par rapport à une masse volumique de référence, identique pour tous les piézomètres. La masse volumique de référence choisie est généralement la masse volumique de l'eau douce ( $\rho_f \sim 1000 \text{ g.cm}^{-3}$ ) de manière à permettre une comparaison des niveaux avec les cartes piézométriques habituelles. On définit alors un "équivalent eau douce" ou "fresh water head" (Luszczynski, 1961 ; Seguin, 2000 - voir Annexe 12).

La correction couramment préconisée repose sur le principe d'équilibre des pressions et consiste à déterminer la hauteur d'une colonne d'eau douce fictive exerçant une pression équivalente à la pression exercée par la colonne d'eau salée de masse volumique  $\rho_i$ .

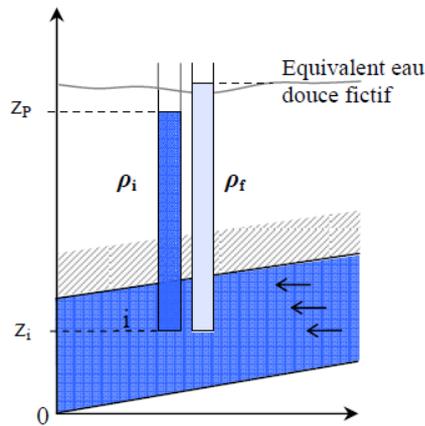


Illustration 37 - Représentation schématique de la charge « équivalent eau douce »

Si  $\rho_f$  est la masse volumique de référence, la charge "normalisée" s'exprime alors par :

$$h_{f,i} = \frac{P_i}{\rho_f g} + z_i \Rightarrow \frac{\rho_i}{\rho_f} (z_p - z_i) + z_i \quad (\text{Eq. 1})$$

L'équivalent eau douce peut également être facilement calculé à partir de la mesure piézométrique suivant l'équation (Eq. 2) :

$$h_{f,i} = \frac{\rho_i}{\rho_f} h_i - \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} z_i \quad (\text{Eq. 2})$$

avec  $h_i = z_p$ , le niveau piézométrique mesuré sur le terrain. Il apparaît que la charge corrigée est étroitement dépendante de la profondeur du piézomètre.

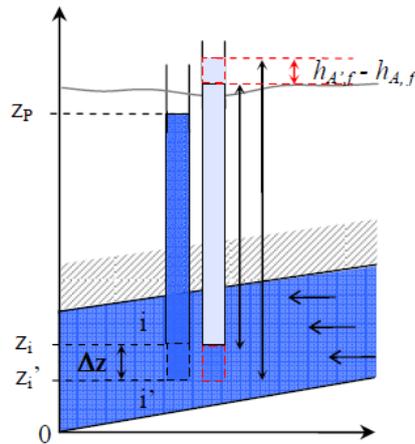


Illustration 38 - Représentation schématique de l'écart entre les équivalents eau douce calculés pour 2 profondeurs différentes d'un même piézomètre

(i) Dans le cas d'un aquifère d'eau douce où la densité est constante, la charge est indépendante de la profondeur de la mesure (Eq. 2). Donc  $h_i = h_{i'} = z_p$ .

(ii) Dans le cas d'un milieu à masse volumique variable, l'équivalent eau douce au point  $i'$  est défini, d'après l'équation (Eq. 3).

$$h_{i'} = \frac{P_{i'}}{\rho_f g} + z_{i'} = \frac{\rho_i g (z_p - z_{i'})}{\rho_f g} + z_{i'} \quad (\text{Eq. 3})$$

Comme :  $z_{i'} = z_i + \Delta z$

$$h_{i'} = \frac{\rho_i g (z_p - z_i + \Delta z)}{\rho_{ref} g} + z_i - \Delta z = h_i + \frac{\rho_i \Delta z}{\rho_{ref}} - \Delta z = h_i + \Delta z \left( \frac{\rho_i}{\rho_{ref}} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$h_{i'} = h_i + \Delta z \left( 1 - \frac{\rho_i}{\rho_{ref}} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Dans ce cas, la charge hydraulique n'est plus constante au sein de l'aquifère sur une même verticale et dépend de la profondeur atteinte et captée par le forage. Spatialement, la différence de profondeur des forages implique en elle-même une différence de charge hydraulique, même dans le cas d'un aquifère sans écoulement. L'utilisation de l'équivalent eau douce, dans le but d'estimer des gradients, nécessite donc que tous les piézomètres considérés aient la même profondeur et captent la même tranche aquifère, ce qui est rarement le cas.

En généralisant pour  $h=0$  et d'après l'équation (Eq. 5), on obtient directement l'erreur faite sur la correction "équivalent eau douce" en fonction de la profondeur. Post et al. (2007) ont évalué l'importance de cette erreur en fonction du contraste de la masse volumique et de la profondeur

de la mesure (illustration 39). Ils donnent ainsi un outil visuel permettant de quantifier l'erreur d'interprétation faite par le calcul de l'équivalent eau douce sur la pression du fluide dans le forage à la profondeur captée.

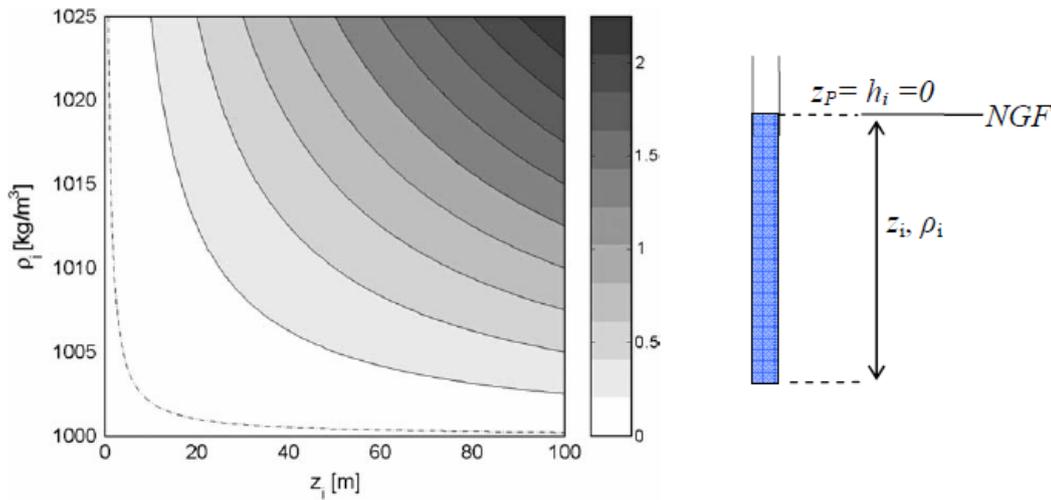


Illustration 39 - Variation des valeurs de l'équivalent eau douce  $h_f$  (en m) calculé d'après l'équation (Eq. 1) pour  $h = 0$  en fonction de  $\rho_i$  et  $z_i$ . La ligne en pointillé représente l'erreur minimum associée à la mesure piézométrique (0,20 m) (d'après Post et al., 2007).

Pour de faibles profondeurs (jusqu'à 20 m), l'erreur reste faible et l'équivalent eau douce est peu influencé par les variations de masse volumique. Pour des profondeurs importantes,  $h_f$  s'écarte de plusieurs mètres de la valeur  $h$  (prise à 0). Cet écart est à considérer au regard des gradients mesurés dans les aquifères côtiers de faibles dénivelés (comme les deltas) qui sont plus généralement de l'ordre du décimètre.

Cette correction est préconisée dans de nombreux ouvrages sans mise en garde particulière quant à son utilisation, à l'exception de Fetter (1994) qui indique que « pour des raisons théoriques, l'équivalent d'eau douce ne peut être utilisé pour déterminer le gradient hydraulique dans un aquifère où il existe des variations latérales de densité. En effet, **le gradient de densité doit être considéré pour déterminer les flux latéraux autant que le gradient hydraulique** ».

La correction de la charge hydraulique en équivalent eau douce ne peut donc pas être utilisée directement pour le calcul des gradients hydrauliques. Pour un aquifère à masse volumique constante, la charge est constante sur une verticale et cette transformation est donc faite de manière implicite. Pour **un aquifère à masse volumique variable**, les charges ne peuvent être comparées que si elles ont été préalablement amenées à une masse volumique constante, identique en tout point, en général l'équivalent eau douce  $h_f$ . Or  $h_f$  n'est plus constante sur une même verticale. Par conséquent, pour des piézomètres implantés à différentes profondeurs, l'équivalent eau douce doit être recalculé par rapport à une profondeur de référence appropriée.

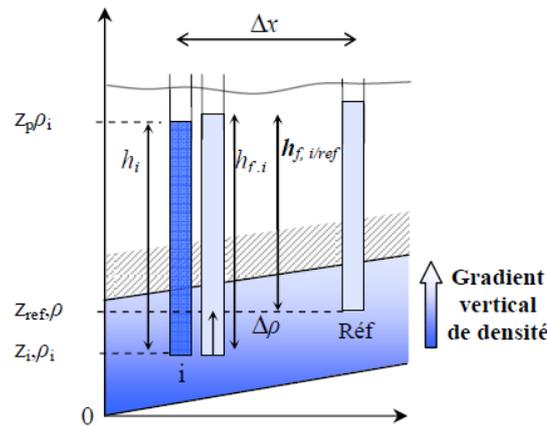


Illustration 40 - Représentation schématique de la charge équivalente eau douce ramenée à une profondeur de référence  $h_{f,i/\rho}$

En un point  $i$ , la pression à la profondeur de référence  $P_{i/ref}$  ( $z_{ref}$ ) exprimée en fonction de la pression mesurée dans la crépine  $P_i$  (illustration 40) est donnée par :

$$P_{i/ref} = P_i - g \int_{z_i}^{z_{ref}} \rho(z) dz \quad (\text{Eq. 6})$$

Il faut donc connaître la loi de répartition de la masse volumique entre la profondeur  $z_i$  et la profondeur de référence  $z_{ref}$ . Dans un aquifère à densité variable, les eaux de faibles densités « flottent » sur les eaux de plus fortes densités. Il existe donc une variation verticale de densité. En supposant une variation linéaire entre le point de mesure et le niveau de référence, l'intégrale de la masse volumique correspond alors à la masse volumique moyenne entre ces deux points. D'où :

$$P_{i/ref} = P_i - g(z_r - z_i) \frac{(\rho_{ref} + \rho_i)}{2} \quad (\text{Eq. 7})$$

La charge équivalente eau douce corrigée est alors donnée par :

$$h_{f,r} = z_{ref} + \frac{P_{i/ref}}{\rho_f g} = z_{ref} + \frac{\rho_A}{\rho_f} (h_A - z_A) - \frac{(\rho_{ref} + \rho_A)}{2\rho_f} (z_{ref} - z_A) \quad (\text{Eq. 8})$$

La charge équivalente eau douce corrigée peut alors être utilisée pour calculer des gradients horizontaux.

Ainsi, cette méthode permet de corriger l'erreur faite sur les gradients par l'utilisation directe des équivalents eau douce. Il reste cependant de nombreuses sources d'incertitude. En effet, la "normalisation" de l'équivalent eau douce par rapport à une profondeur de référence suppose de connaître la loi de répartition de la masse volumique suivante :  $z \left( \int_{z_i}^{z_{ref}} \rho(z) dz \right)$ .

Ainsi, l'établissement de l'équation (Eq. 8) repose sur des hypothèses fortes :

- la masse volumique varie selon  $z$  ;
- il existe une relation linéaire univoque entre la profondeur et la masse volumique. Une relation non linéaire pourrait également être envisagée, mais dans tous les cas, il faut que cette relation soit vérifiée par tous les piézomètres de manière univoque.

Cette correction repose de plus sur le choix d'une référence appropriée. En effet, la hauteur du niveau équivalent eau douce  $h_{f,r}$  normalisé par rapport à  $z_{ref}$  dépend du choix de la référence  $z_{ref}$ . Ainsi, les valeurs piézométriques recalculées sont fictives mais les gradients sont conservés. Cependant, si la profondeur de référence choisie correspond à un piézomètre d'eau douce, les niveaux recalculés correspondent alors à des niveaux piézométriques comparables aux autres cartes piézométriques. Le choix d'une référence d'eau douce, lorsque cela est possible, est donc le plus judicieux.

### **5.1.2. Approche numérique pour sérier les effets de la température et de minéralisation de l'eau sur une colonne d'eau d'un forage**

Afin de mieux se représenter les effets sur la colonne d'eau de la température et de la minéralisation, mais également de la compressibilité de l'eau, différents tests ont été effectués. Ces derniers ont été réalisés en tenant compte de la formule proposée par Rowe et Chou (1970) pour le calcul d'une charge d'eau douce<sup>5</sup> équivalente en fonction notamment de la masse volumique d'un fluide pour différentes conditions de température, de salinité et de pression. Les figures (illustration 41 et illustration 42) ont été réalisées à partir de données calculées et présentées dans le rapport d'année 1 (Wuilleumier et al., 2015). Pour ce faire, le postulat de départ a été de considérer différentes hauteurs de colonne d'eau (hauteur de 100 à 1 500 mètres avec un pas de 200 mètres). Pour chaque hauteur de colonne d'eau, des tests ont été effectués pour :

- des températures constantes au sein de la colonne d'eau (14°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C et 60°C - soit les températures des nappes plus ou moins profondes qui peuvent être rencontrées dans le sud Bassin, dans les nappes concernées par l'étude) et une minéralisation de 100 mg/l (illustrations 41 et 42) ;
- des températures qui évoluent en fonction d'un gradient de température au sein de la colonne d'eau : 14°C à la surface et 20°C, 30°C, 40°C, 50°C et 60°C en profondeur avec une minéralisation de 100 mg/l (illustration 41) ;
- différentes minéralisations de l'eau (100 mg/l, 250 mg/l, 1 000 mg/l, 2 000 mg/l, 5 000 mg/l) à température constante de 14°C (illustration 42).

Il est bien entendu qu'une colonne d'eau de 1500 m, présentant une température constante de 14°C, revêt un caractère totalement théorique. La finalité de ces tests réside avant tout dans leur capacité à mieux cerner les effets thermiques et densitaires de façon indépendante et viennent en ce sens compléter les informations apportées par les études précédentes qui restituent l'influence globale des deux paramètres sur la piézométrie. Ils visent ce faisant à proposer une première orientation en vue d'identifier les mesures complémentaires nécessaires pour permettre une qualification et une exploitation complètes des mesures piézométriques effectuées sur les aquifères profonds (Wuilleumier et al., 2015).

---

<sup>5</sup> En pratique, la minéralisation est prise égale à 100 mg/l.

La formule de Rowe and Chou (1970) donne pour la valeur de référence prise ici (14°C et 100 mg/l - illustrations 41 et 42), une diminution de la hauteur de la colonne d'eau du fait du poids de celle-ci et ce en fonction de la profondeur (« contraction » de la colonne d'eau sous son propre poids dû à la compressibilité de l'eau). Pour une colonne d'eau de 100 mètres (14°C et 100 mg/l) l'impact sera négligeable sur le niveau (2-3 mm) alors que pour les mêmes conditions de température et de salinité, pour une colonne d'eau de 1500 mètres la différence sera de -5 mètres (illustrations 41 et 42 - courbe référence).

Le poids de la colonne d'eau va varier notamment avec la masse volumique de l'eau et donc la minéralisation (pour une même colonne d'eau, le poids d'une eau salée sera plus importante qu'une eau douce). A noter par ailleurs que la compressibilité de l'eau évolue également avec la température (illustration 43). Enfin, la masse volumique de l'eau, à partir d'environ 5°C, va diminuer en fonction de la température pour une même minéralisation (illustration 44). Ainsi, pour une masse d'eau constante, le volume occupé par l'eau va augmenter avec la température (dilatation ou expansion thermique de l'eau).

Les résultats des tests effectués sont à analyser en fonction de la valeur de référence théorique de 14°C et une minéralisation de 100 mg/l, pour laquelle le poids de la colonne d'eau n'interviendrait pas. L'effet du poids de la colonne d'eau est observable sur la courbe bleue de l'illustration 41 : il est ainsi de 5 m environ pour une colonne d'eau de 1 500 m.

Le graphique de l'illustration 41 présente les résultats pour différentes températures constantes au sein de la colonne d'eau et des températures en fonction d'un gradient thermique. Ce graphique montre logiquement que plus les eaux sont chaudes et plus l'effet sur la colonne d'eau est important (expansion de la colonne d'eau) et donc que l'impact sur le niveau d'eau qui peut être mesuré est important. A titre d'exemple, pour une colonne d'eau au repos (et une température fonction du gradient thermique) et pour une hauteur de colonne de 1 000 mètres, l'effet serait de +5 mètres environ par rapport à la référence pour une température de fond de 50°C. Sur cette même hauteur de colonne d'eau et avec une température constante de 50°C (qui peut être considérée après un temps de pompage long), l'effet serait d'environ + 12 mètres. Ainsi, la différence, entre cette même colonne d'eau au repos (gradient thermique) et après avoir été sollicitée (température de 50°C sur tout la colonne), est donc de l'ordre de 7 mètres environ.

Le second graphique (illustration 42) présente les résultats pour des températures constantes au sein de la colonne d'eau et pour différentes minéralisations et une colonne d'eau à 14°C. L'effet de la minéralisation pour des gammes variant de 250 mg/l à 5 000 mg/l montre l'influence de la masse volumique (qui augmente en fonction de la minéralisation). La masse volumique augmentant le poids de la colonne d'eau augmente également.

Dans la colonne d'eau d'un forage profond, l'augmentation de la température réduit la masse volumique de l'eau, alors que, parallèlement, l'augmentation de la compression pour des eaux supérieures à 50 °C induit une modification opposée de la masse volumique.

Pour les valeurs fréquentes du gradient géothermique, la compressibilité de l'eau a une influence opposée et environ égale à la moitié de celle provoquée par l'accroissement de température sur la masse volumique du fluide (Vandebeusch, 1976).

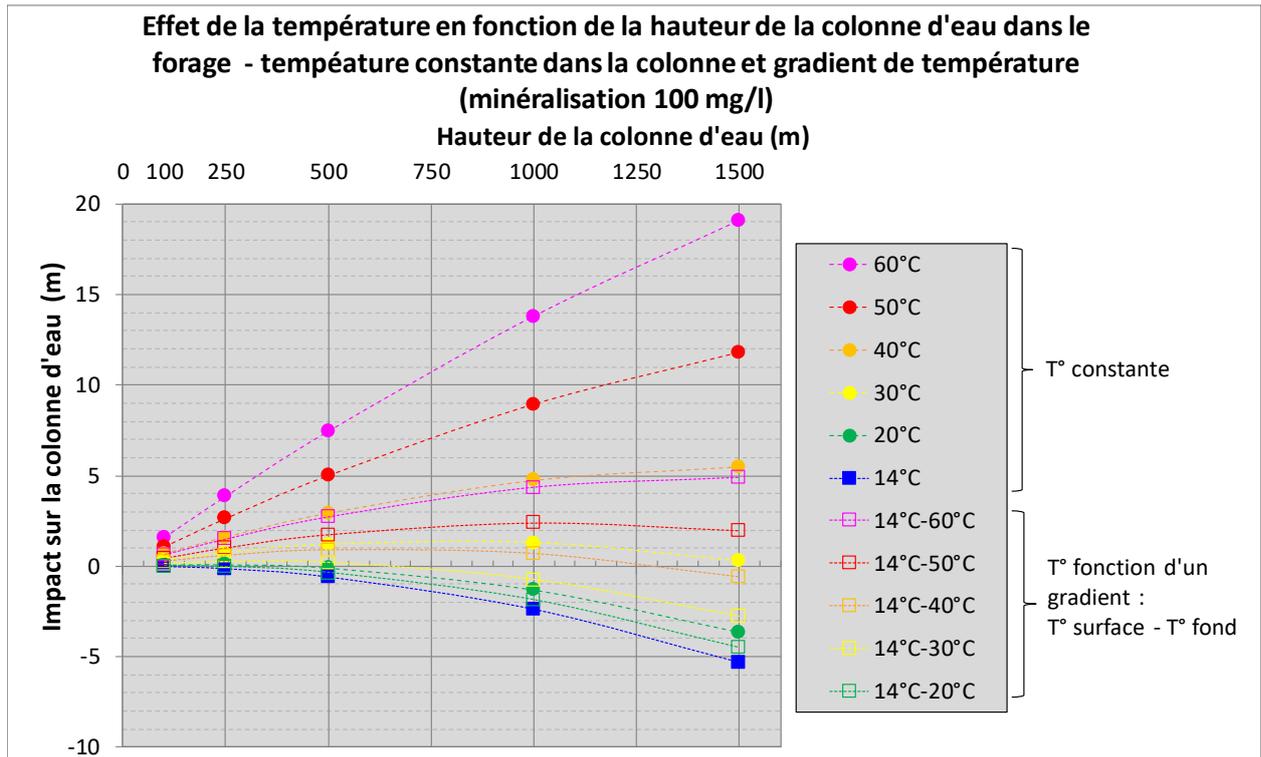


Illustration 41 - Influence de la température de l'eau sur la piézométrie (en m) pour différentes hauteurs de colonne d'eau : température constante de la colonne et température fonction d'un gradient de température imposé

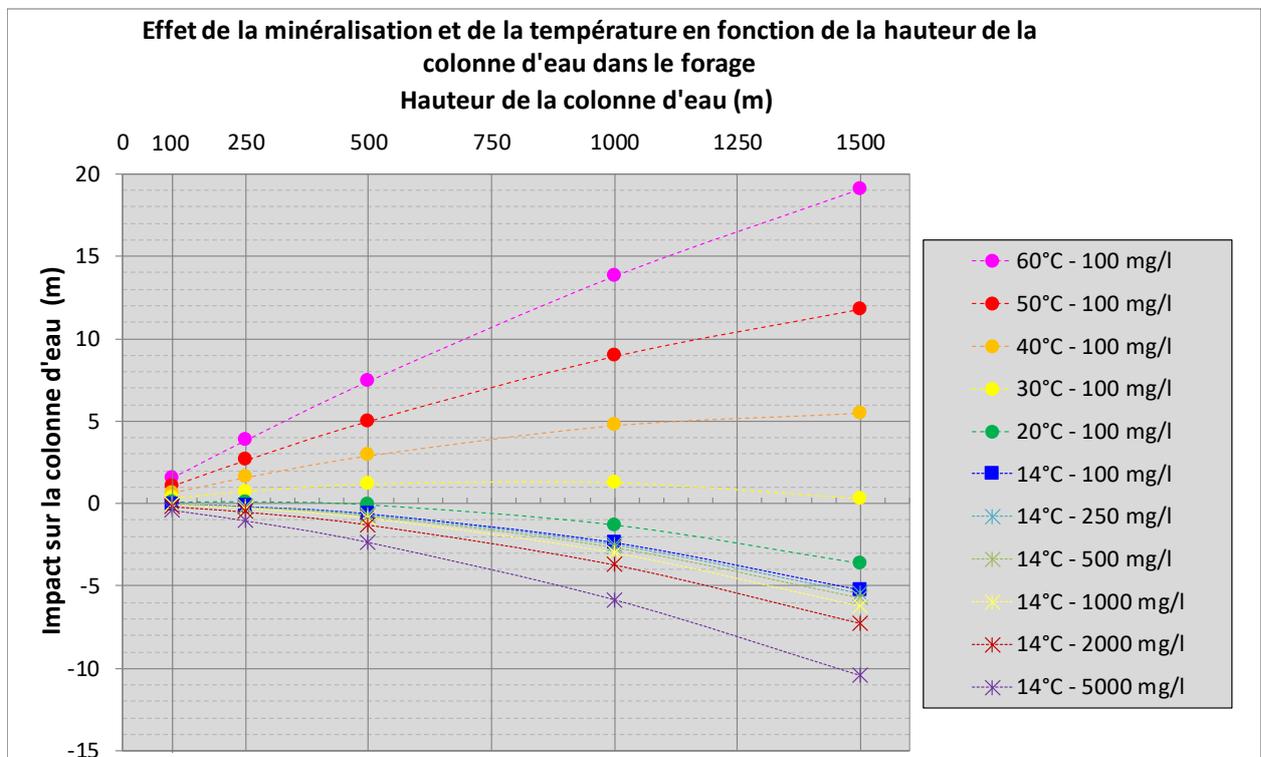


Illustration 42 - Influence de la température de l'eau et de la minéralisation sur la piézométrie (en m) pour différentes hauteurs de colonne d'eau

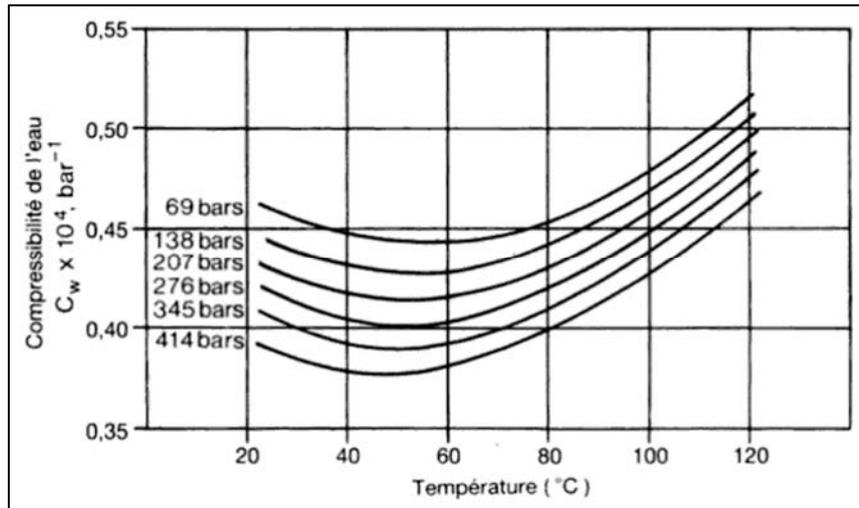


Illustration 43 - Compressibilité isotherme de l'eau pure (Gravier, 1986)

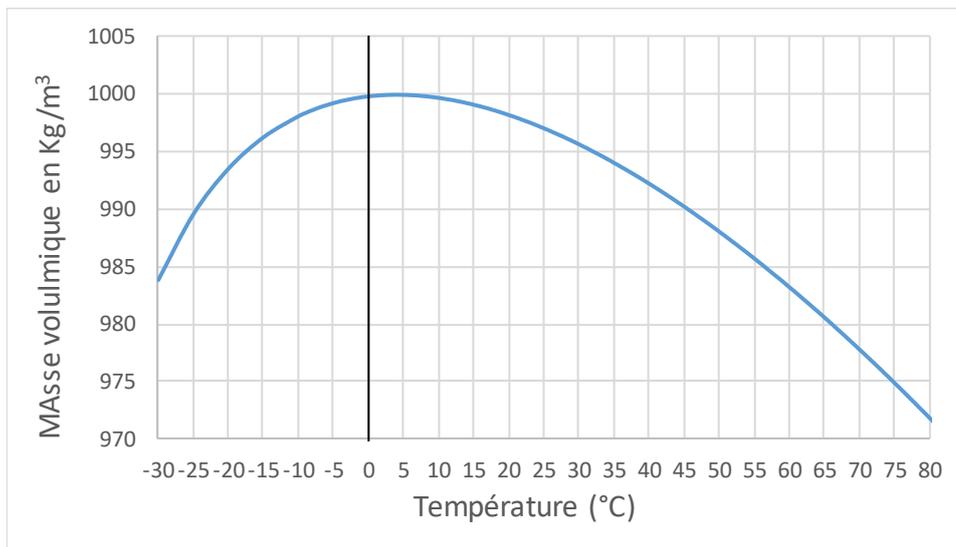


Illustration 44 - Masse volumique de l'eau pure en fonction de la température (données Kell, 1975)

Post et Von Asmuth (2013) ont réalisé des calculs pour estimer l'impact de la température et de la densité sur la mesure de la charge dans un piézomètre. Comme indiqué précédemment, il est possible de considérer une densité constante ou une densité variable dans la colonne d'eau. L'illustration 45 indique les erreurs engendrées si une stratification de densité se produit dans le puits, en relation avec un équilibre de la température de l'eau avec celle de l'encaissant. Dans cet exemple, l'aquifère A est pris avec une profondeur de 500 m et le niveau piézométrique est à la surface du sol ( $z=0$ ). L'illustration 45a montre les variations de température (selon un gradient de  $25^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ ) et de densité uniquement liées aux variations de température. Dans cette même figure, la fonction  $\rho_a(z)$  montre les variations de masse volumique moyenne entre  $z=0$  et  $z=z_i$  (masse volumique variable selon la profondeur). L'illustration 45b montre la variation du niveau piézométrique selon que l'on considère une densité constante de  $1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$  ou de  $998,2 \text{ kg.m}^{-3}$ . Ces calculs montrent que ce faible écart peut conduire à des différences de l'ordre de  $1 \text{ mm.m}^{-1}$  de colonne d'eau.

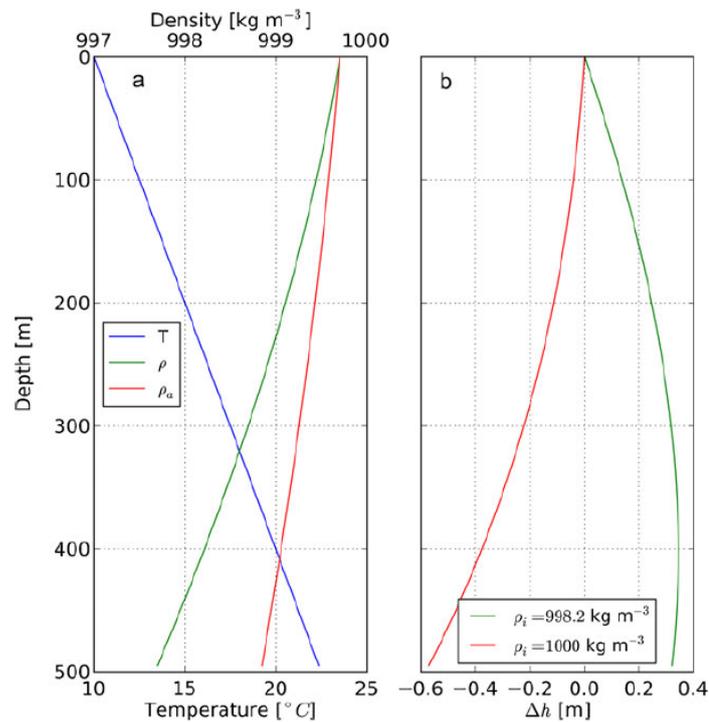


Illustration 45 : (a) Variation avec la profondeur de la température (en bleu) selon un gradient de  $25^{\circ}\text{C.km}^{-1}$  et une température en surface de  $10^{\circ}\text{C}$ , de la densité de l'eau à la température  $T$  (en vert) et de la densité de l'eau moyenne entre  $Z=0$  et  $z=z_i$ . (b) Charge calculée selon que la densité de la colonne d'eau est de  $998,2 \text{ kg.m}^{-3}$  ou  $1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$

Ces résultats montrent qu'il est donc important pour le calcul de charges hydrauliques comparables entre elles dans un même aquifère profond de prendre en considération les effets de température et de minéralisation et ce tout au long de la colonne d'eau si ces informations sont disponibles.

### 5.1.3. Evolution de la température et de la minéralisation sur les forages du sud du Bassin aquitain

L'hypothèse d'évolution linéaire de la température de l'eau dans une colonne de forage est confirmée dans deux sources bibliographiques ciblant ces problématiques dans le Bassin aquitain.

Fabris et Roche (1978) ont conduit la réalisation de diagraphies de température dans dix piézomètres du sud du Bassin (Auch 2, Auvillar, Castelnau-Magnoac, Lacquy 101, Lembeye 1, Muret 104, Polastron 101, Ponson-Dessus, Puymaurin 2, Senac 1). Ils constatent une évolution linéaire de la température entre la surface de l'eau et le toit de l'aquifère capté, après réalisation de diagraphies thermiques jusqu'à une profondeur maximale de 1 200 m. Ensuite, le gradient géothermique a tendance à décroître (Auch 2, Lembeye 1, Muret 104, Puymaurin 2, Senac). A Lacquy 101, la décroissance dans les séries carbonatées inférieures est mise en évidence du fait vraisemblablement des circulations au sein de ces calcaires dolomitiques. Dans Lembeye 1, le gradient est linéaire dans la molasse, diminue dans le réservoir infra-molassique, puis augmente dans les formations imperméables du mur de cet aquifère.

Forages	Gradient thermique (°C/100 m)
Auch 2	3.23
Auwillar	3.43
Castelnau-Magnoac 1	2.21
Lacquy 101	3.23 (2 tendances)
Lembeye 1	3.57 (3 tendances)
Muret 104	3.32
Polastron 101	3.15
Ponson-Dessus 1	2.04
Puymaurin 2	3.17
Senac 1	2.58

*Illustration 46 - Gradients géothermiques mesurés dans différents piézomètres profonds du Bassin aquitain (Fabris et Roche, 1978)*

Dans le cadre du projet CARISMEAU, des diagraphies de température ont également été conduites sur un certain nombre de forages du sud du Bassin aquitain (Negrel et al., 2008). Ces diagraphies qui ont porté sur les 140 premiers mètres des colonnes d'eau ont confirmé l'hypothèse de linéarité sur ces plages de profondeur.

A l'exception notable de quelques forages comme celui de Gondrin (indice BSS 09533X0016/F, dans lequel un suivi horaire de la piézométrie et de la température est effectué pour le compte du Syndicat Armagnac Ténarèze), une mesure de la température n'est pas effectuée systématiquement en parallèle de la mesure piézométrique.

Dans la cadre du projet GAIA, une étude spécifique a été réalisée dans des piézomètres profonds captant l'aquifère des Sables Infra-Molassiques. Les résultats et interprétations des investigations diagraphiques réalisées sont donnés dans un rapport à paraître (Barrière et al., 2019). Parmi les forages investigués, le forage de Polastron 101 (10082X0001) a en particulier pu être étudié avant et après pompage.

Ce forage initialement destiné à l'exploration pétrolière a été réhabilité en piézomètre de la nappe des Sables Infra-Molassiques en 1974. Initialement foré jusqu'à une profondeur de 2 751 m, il a été bouché à 1 289 m par un bouchon de ciment et perforé entre 818 et 828 m de profondeur, au droit des Sables de Lussagnet (cf. illustration 47). Le tubage jusqu'aux perforations est en 7".

Le niveau piézométrique mesuré en 2014 se situe vers la côte de 116 m, sans aucune anomalie identifiée sur la chronique piézométrique (1973-2014). La baisse de niveau piézométrique est lente et régulière.

Avant pompage, une diagraphie physico-chimique de la colonne d'eau a été réalisée. La colonne d'eau mesure 720 m, entre son sommet et le haut des perforations (illustration 48). Cette diagraphie montre que la température le long du forage varie de manière linéaire selon un gradient de l'ordre de 3.4 °C/100 m, soit une valeur conforme aux gradients observés dans d'autres forages du bassin (illustration 46). La température varie entre 15 et 39°C. Cette observation semble également indiquer que, malgré l'âge de l'ouvrage, aucune venue d'eau superficielle ou plus profonde, ni aucun défaut d'étanchéité de l'espace annulaire ne perturbent la température de la colonne d'eau. Après un court pompage, la température de l'eau augmente dans la colonne, variant de 20 à 39°C.

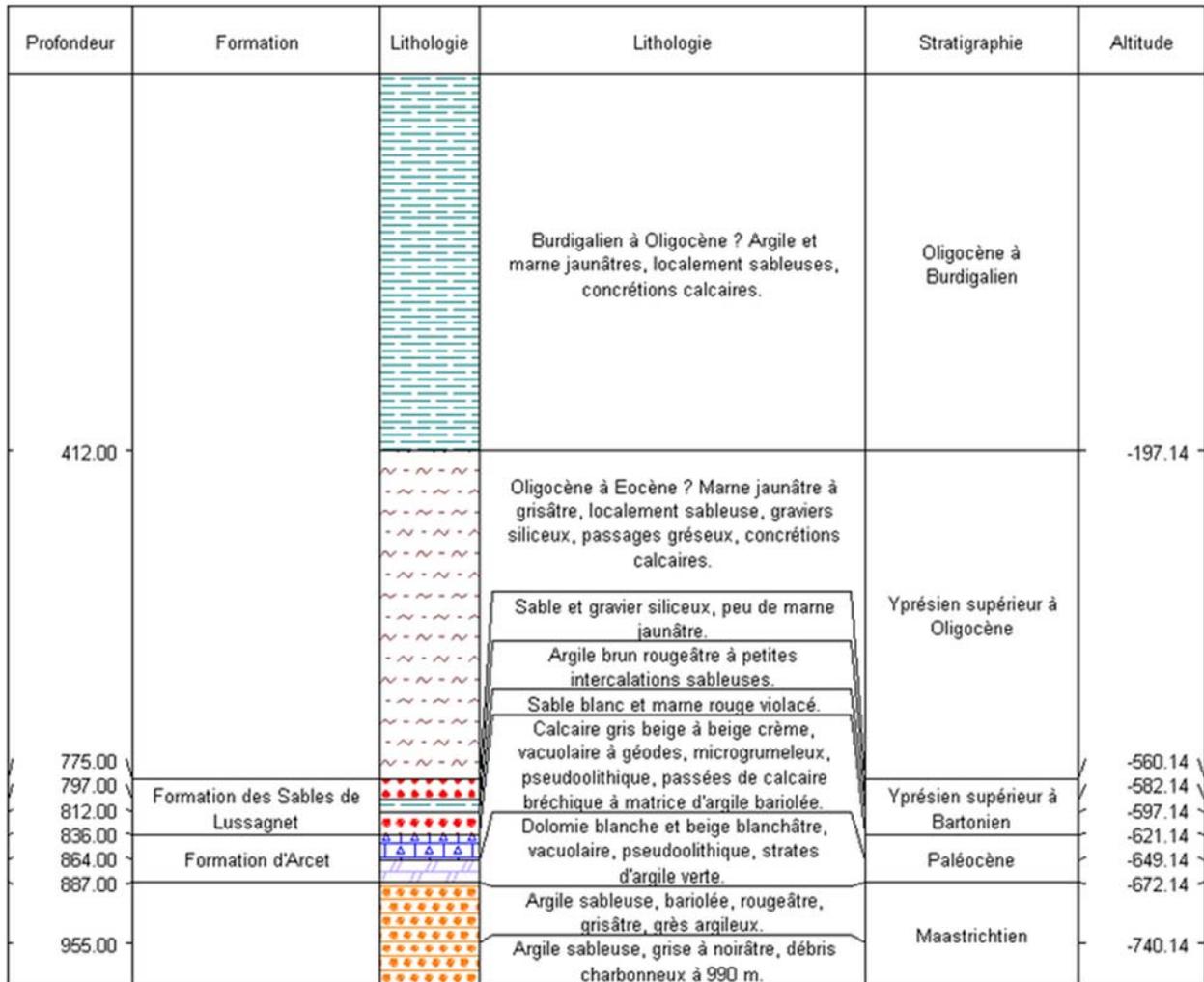


Illustration 47 - Log géologique validé du forage de Polastron 101 (10082X0001) - Données issues de la BSS le 07/03/2018

Cette diagraphie montre également que la conductivité électrique dans la colonne d'eau (au repos depuis plusieurs années) varie de manière linéaire jusqu'aux perforations, selon un gradient de l'ordre de  $10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}/100 \text{ m}$ . La conductivité varie de  $1\ 020$  à  $1\ 100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (valeurs corrigées à  $25^\circ\text{C}$ ) ce qui correspond à un fluide présentant une minéralisation comprise entre  $700$  et  $750 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (selon les tables de conversion conductivité/minéralisation - Richard et Cu, 1961). Comme pour la température, ce profil de conductivité semble confirmer l'absence de venues d'eau le long de la colonne. Un saut de conductivité beaucoup plus important a été observé au droit des perforations puisque celle-ci augmente rapidement à  $2\ 300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  dans cette zone (correspondant à une minéralisation moyenne de l'ordre de  $1\ 600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Cette observation semble cohérente avec la seule analyse chimique disponible pour ce forage. Elle date de 1972 et elle révélait une composition d'eau plutôt minéralisée (de l'ordre de  $1\ 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) dans les sables. A noter qu'une analyse a été faite dans les calcaires (riches en anhydrite) du Jurassique sous-jacents, analyse qui révèle la forte minéralisation de ces eaux (de l'ordre de  $1\ 900 \text{ mg/L}$ ). Après pompage, on note que la colonne d'eau renouvelée est constituée presque exclusivement d'eau minéralisée, avec une conductivité constante tout le long de la colonne (illustration 48) : la minéralisation (TDS calculé à partir des analyses chimiques effectuées sur les prélèvements) est ainsi avant pompage de  $703 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  à  $764 \text{ m}$  de profondeur et de  $1\ 565 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  à  $828 \text{ m}$ , soit à la base des perforations, tandis qu'elle passe après pompage à  $1\ 709 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  à  $810 \text{ m}$  et  $1\ 612 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  à  $828 \text{ m}$ .

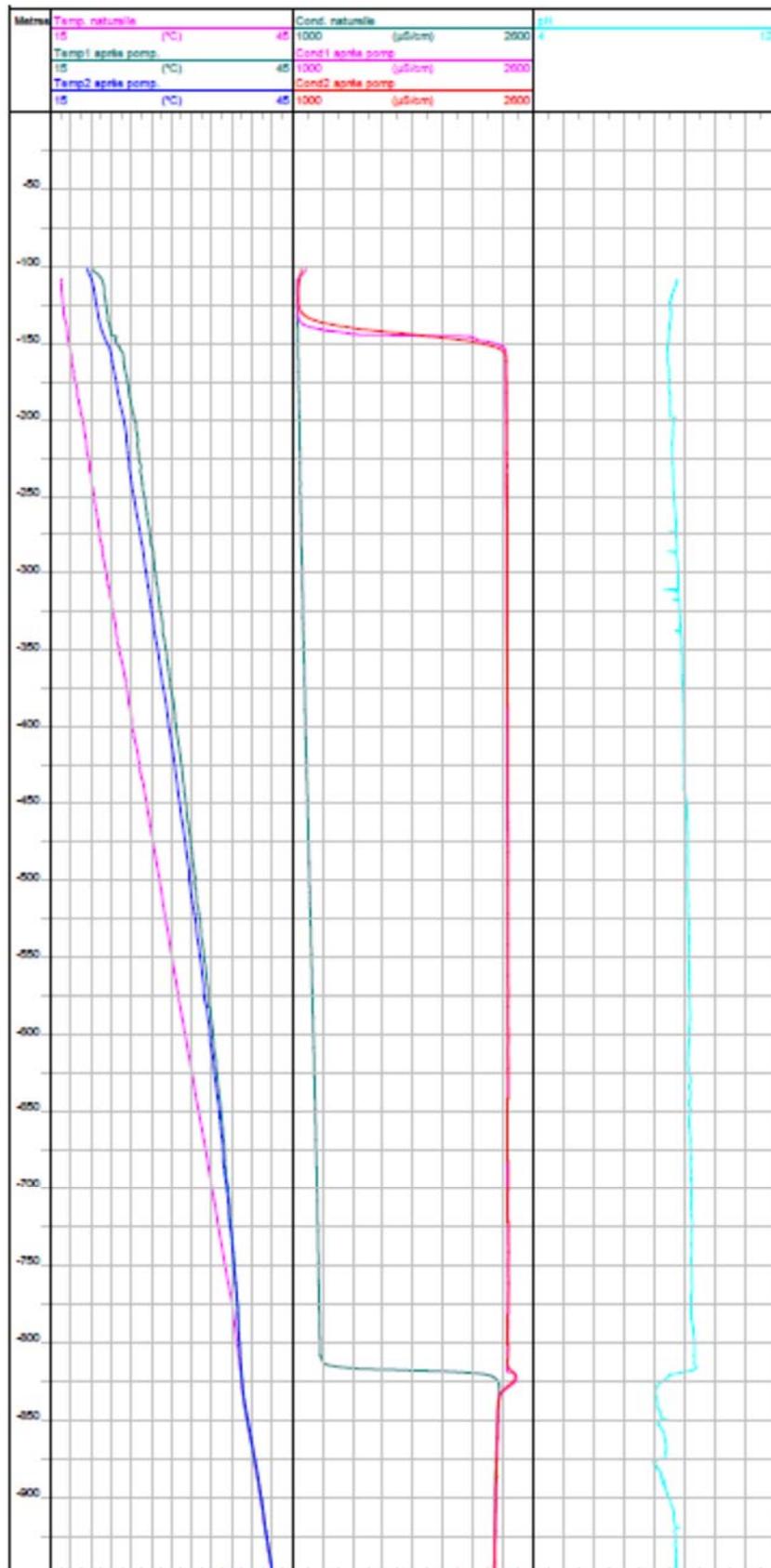


Illustration 48 - Diagraphies physico-chimiques réalisées dans le forage de Polastron 101 (10082X0001) avant et après pompage, entre le 9 et le 16 septembre 2017

Dans d'autres ouvrages, également investigués (Saint-André et Lacquy) au cours de cette campagne, les diagraphies montrent une température qui varie linéairement en fonction de la profondeur. Par contre, pour la minéralisation, le forage de Saint-André présente au repos (pas de pompage depuis plusieurs années) une eau avec une conductivité électrique non représentative des eaux de la nappe captée, la conductivité étant d'environ 230  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C et après pompage à 430  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C (TDS après pompage de 396  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Concernant le forage de Lacquy, seule une diagraphie deux mois après pompage a pu être réalisée. Elle montre probablement l'équilibre de la température de la colonne d'eau selon un gradient géothermique (ou du moins proche du gradient). La conductivité est d'environ de 1 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C dans sa partie supérieure. Les eaux sont moins minéralisées au droit des perforations (435-445 m de profondeur soit un TDS de l'ordre de 600  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), puis la minéralisation augmente à nouveau avec la profondeur pour atteindre 1 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C vers 900 m. En termes de minéralisation (TDS), les valeurs estimées à partir de la diagraphie sont de 708  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  à 350 m de profondeur, 595  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  au sommet des perforations (435 m) et de 606  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  à la base des perforations (445 m).

Ces résultats de terrain montrent la forte variabilité de la conductivité et donc de la minéralisation dans la colonne d'eau qui, dans certains cas, doit donc être prise en compte pour le calcul de la charge hydraulique. La question se pose donc de la valeur ou de l'intégrale des valeurs de minéralisation de la colonne d'eau à prendre en compte pour ce calcul quand le forage est à l'arrêt depuis plusieurs années ou bien quelques temps après pompage et sur la durée d'un possible retour à un certain équilibre de la minéralisation dans la colonne d'eau.

A noter qu'un calcul d'impact sur la colonne d'eau dans l'ouvrage de Polastron en fonction de la température et de la minéralisation après pompage a été réalisé dans le cadre d'un rapport à paraître (Gal et al., 2019).



Commune : Saint André (31)  
Forage : "Saint André"

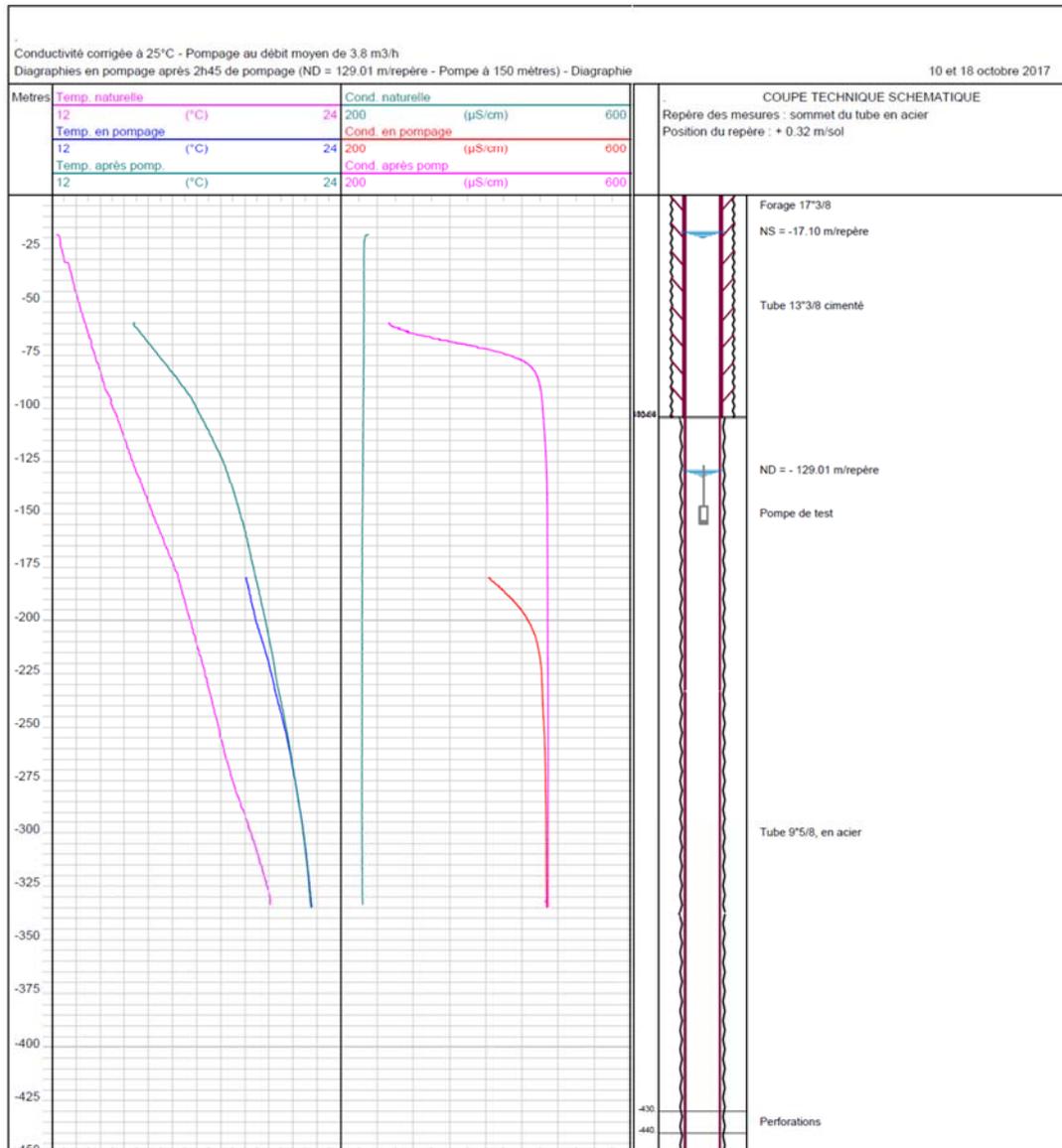


Illustration 49 - Diagraphies de production au repos et en pompage dans le forage de Saint-André

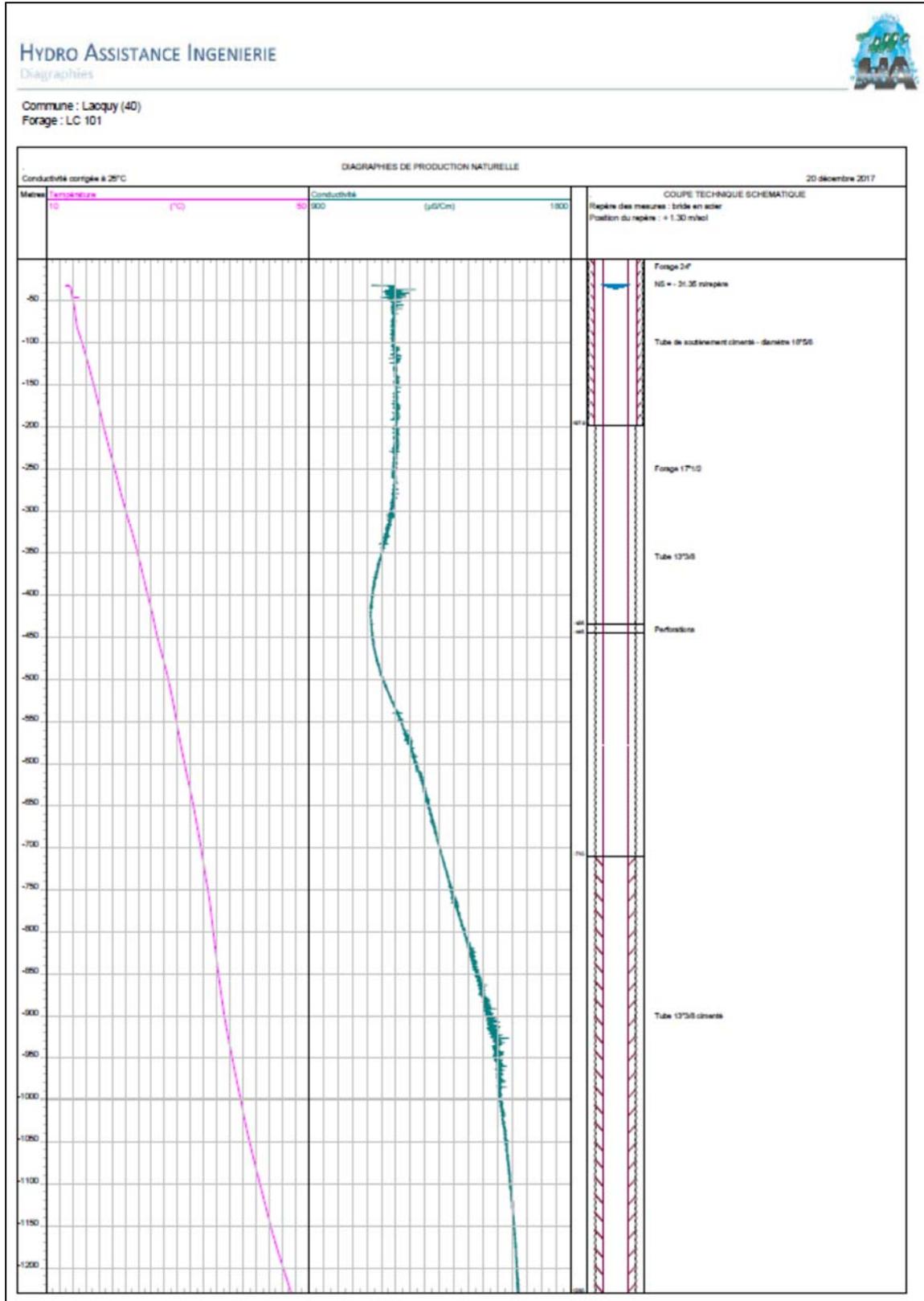


Illustration 50 - Diagraphies de conductivité-température dans le forage de Lacquy, après pompage

#### 5.1.4. Retour à l'équilibre thermique

Ce paragraphe s'intéresse à l'équilibre thermique au sein d'un ouvrage et notamment du temps de retour à l'équilibre thermique dans la colonne d'eau (selon le gradient géothermique) suite à un pompage. La colonne d'eau dans un forage, sans pompage ni venues d'eaux parasites, et donc sans mouvements verticaux importants, présente globalement une température en équilibre avec le milieu environnant. La température a donc tendance à augmenter en profondeur en fonction du gradient géothermique. Lors d'un pompage, la colonne d'eau va se réchauffer ainsi que le milieu environnant par conduction thermique de proche en proche. Ainsi, lors de l'arrêt du pompage la colonne d'eau va se refroidir, à un rythme qui sera notamment fonction de la vitesse de remise à l'équilibre thermique du milieu proche du forage. Fabris et Roche (1978) déclarent que « *La colonne d'eau qui s'établit dans le forage est en équilibre avec la pression de la formation de l'aquifère. Cette colonne est rapidement (en l'absence d'artésianisme jaillissant) en équilibre thermique sur toute sa hauteur avec le terrain encaissant. Les études théoriques (Bullard, 1947) montrent en effet que 3 mois de stabilisation suffiraient pour obtenir des températures de la formation représentative au 1/10<sup>ème</sup> de degré.* » La transmission de la chaleur de l'ouvrage en direction de la formation réservoir à faible perméabilité se fait essentiellement par conduction.

Oxburgh et Richardson (1972) montrent que la détermination précise des températures en cours de forage doit être retardée jusqu'à l'équilibre de la température en raison de l'impact du fluide de forage. Ils signalent qu'un arrêt de quelques heures permet ce retour à l'équilibre.

Les niveaux d'eau mesurés dans les tests sur les puits pompés ou artésiens dans les aquifères captifs sont généralement affectés par les changements de température dans la colonne d'eau. Ce phénomène est bien connu en géothermie, c'est pourquoi les essais sur les forages profonds dans ce domaine sont conduits avec des capteurs de pression en fond de trou permettant de s'en affranchir. Alternativement, un procédé de correction de température est proposé sur la base d'un modèle simple supposé décrire le refroidissement suite à un essai de nappe. Cette méthode est conçue pour déterminer la transmissivité de l'aquifère et de calculer un rabattement non influencé par les effets de la température. Les seules exigences de données sont des mesures des températures initiales et stabilisées « en décharge ». Cette méthode peut se révéler être utile dans de nombreux cas, si les puits d'observation et des installations de surveillance de la pression de fond de trou ne sont pas disponibles (Kawecki, 1995).

Ce retour à l'équilibre thermique est cependant très lié aux propriétés des roches entourant le forage. Suarez Ariaga et Samaniego (1999) ont étudié le transfert de chaleur autour de puits géothermiques en exploitation. Ils ont ainsi développé un modèle simulant le temps nécessaire de remise à l'équilibre du milieu encaissant sur un rayon d'une dizaine de mètres. Le modèle a été appliqué de manière à estimer l'effet de perturbations thermiques dans la formation voisine du puits, et d'enquêter sur le profil de température à l'intérieur de la colonne annulaire remplie de ciment. Ce modèle permet également d'estimer la distance maximale radiale atteinte par les perturbations thermiques produites par les opérations de forage dans des conditions différentes (illustration 51).

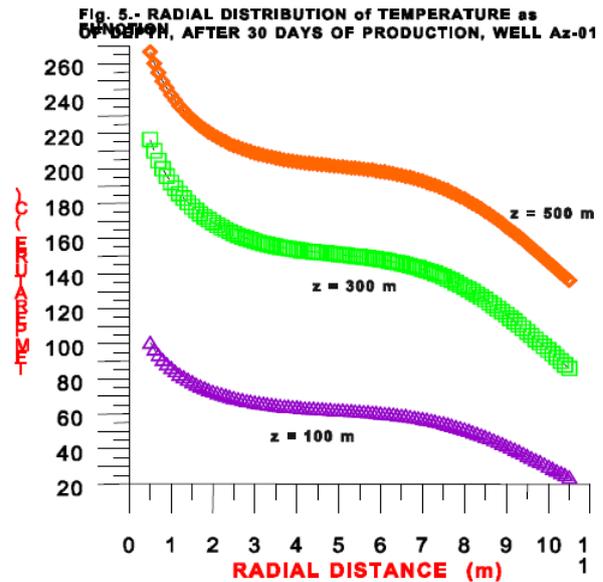
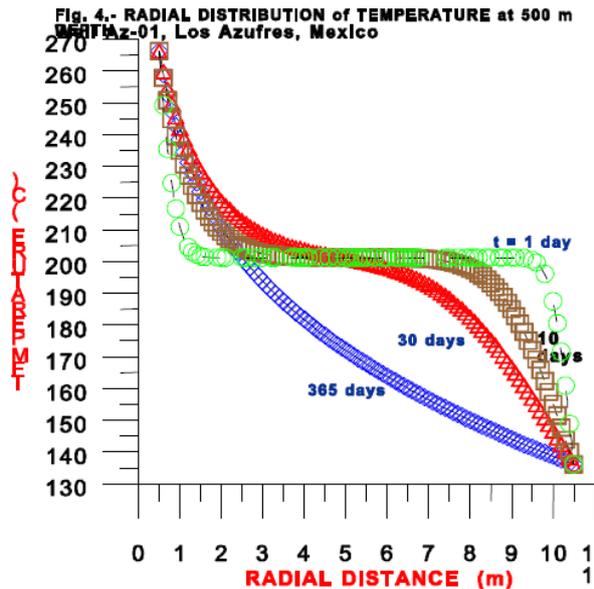


Illustration 51 - Modèle semi-conducteur analytique pour quantifier la distribution radiale de l'évolution de la température dans les puits géothermiques, à des profondeurs différentes (Suarez Ariaga et Samaniego, 1999)

### 5.1.5. Autres facteurs impactant les niveaux piézométriques

Oberlander (1989) liste les différents paramètres susceptibles d'influencer le niveau piézométrique dans un puits. Il souligne dans son étude l'intérêt de bien savoir caractériser les niveaux d'eau et passe en revue les différentes forces susceptibles de modifier et d'influencer ceux-ci, comme :

- la variation du champ gravitationnel en fonction de la latitude,
- la variation du champ gravitationnel en fonction de la profondeur du forage ;
- la quantité de sel dissous ;
- les variations de densité du fluide induites par le champ de température ;
- la compressibilité du fluide, propriété qui dépend de la température et de la pression (Osif, 1988).

Ses calculs soulignent la difficulté de conjuguer certains de ces processus compte tenu de leurs effets parfois contraires.

## 5.2. PROCESSUS MÉCANIQUES AU SEIN DE LA COLONNE D'EAU

Une revue bibliographique a été effectuée, afin de recenser les articles focalisés sur les processus/mécanismes hydrodynamiques, susceptibles de se produire dans la colonne d'eau d'un forage et qui vont potentiellement influencer le niveau piézométrique, qui peut être mesuré. Il ressort de cet inventaire que peu d'articles se focalisent sur ces mécanismes intra-puits.

Dans les puits, les différentes caractéristiques physiques ou chimiques des eaux tendent à provoquer des processus de stratification de l'eau. Cette stratification est souvent due à des contrastes de masse volumique du fluide en lien avec sa composition chimique (concentrations en éléments dissous), ses propriétés physiques (température, viscosité, etc.) ou sa turbidité.

Le schéma classique consiste en une couche d'eau de faible salinité présente sur une couche d'eau de plus forte salinité (différence de densité dans ce cas). Le fluide est homogénéisé dans chaque couche grâce à un écoulement convectif inter-étages (*i.e.*, naturel, du fait d'un contraste gravitaire) et/ou advectif (*i.e.*, forcé par un champ de vitesse).

La stratification thermique et chimique de l'eau dans des puits de mine a été très souvent citée (Wolkersdorfer, 2008) mais les connaissances sur la mise en place et la stabilité du phénomène sont encore très limitées.

De nombreux auteurs ont travaillé sur la théorie de la convection double-diffuse causée par les variations de température et de salinité dans des solutions, que ce soit dans le domaine de l'astrophysique, de la métallurgie, de la géologie ou de l'hydrologie de la zone vadose. Mais, peu d'étude se sont focalisées sur le transport thermo-halin dans des puits d'eau (Gershuni et Zhukhovitskii, 1976 ; Turner, 1973 ; Love et al., 2007 ; Berthold et Börner, 2008).

Dans la convection thermohaline, qui combine le transport de chaleur et de matière, la diffusivité thermique est environ deux ordres de grandeur supérieure à la diffusivité de matière. Cette différence de diffusivité peut parfois mener à des instabilités que l'on peut répertorier en deux catégories : la convection monotone et la convection oscillatoire.

La convection oscillatoire se produit classiquement lorsqu'une couche d'eau froide et peu salée repose sur une couche d'eau plus chaude et plus salée. Elles sont donc séparées par un palier brusque en masse volumique. Comme la chaleur se diffuse plus vite que le sel, sous certaines conditions, des instabilités gravitaires peuvent se développer de part et d'autre de l'interface (illustration 52).

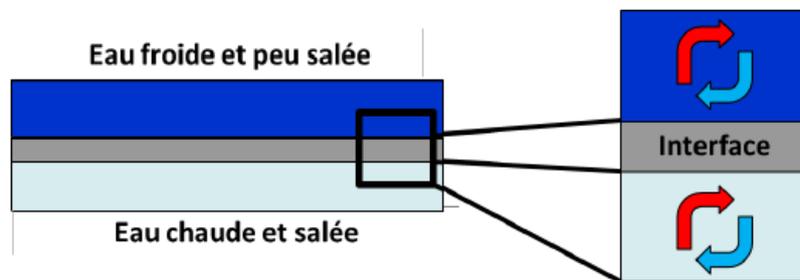


Illustration 52 - Fonctionnement d'une instabilité gravitaire oscillatoire (d'après Reichart, 2015)

Si un petit volume d'eau chaude et salée se déplace vers le haut, il est refroidi plus vite qu'il ne perd de sel et finit par devenir plus lourd que l'eau environnante : il commence alors à redescendre. Par la suite, ce même volume d'eau est chauffé plus vite qu'il ne se concentre en sel et devient moins lourd que l'eau environnante, il adopte donc un mouvement ascendant. Cela entraîne un mouvement oscillatoire avec apparition de cellules de convection de type Bénard/Lapwood (Kundu et Cohen, 1990). Ce processus se poursuit jusqu'à l'apparition d'une nouvelle couche de mélange.

Il en résulte un profil en forme « d'escalier », avec des interfaces de densité très raides séparées par des couches bien mélangées (Turner, 1973). Ce phénomène a été mis en évidence dans des puits de mine ennoyés (Hamm et Bazargan Sabet, 2010 ; Reichart, 2015) mais aussi dans des puits de surveillance des eaux souterraines par des mesures géophysiques (Berthold et Börner, 2008) (illustration 53).

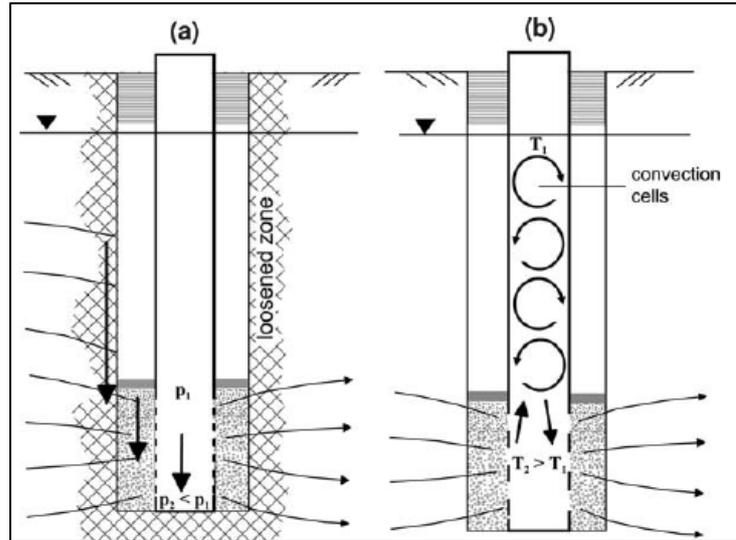


Illustration 53 - Schéma (a) des convections forcées dues au gradient hydraulique et (b) des cellules de convection libres dues au gradient de température dans un puits d'observation d'eau souterraine (Berthold et Börner, 2008)

Des études expérimentales ont également été réalisées par Berthold et Börner (2008) dans une installation d'essais à moyenne échelle avec un ratio hauteur/rayon élevé (de l'ordre de 19). Couplés à de la modélisation numérique, les résultats expérimentaux ont montré que de nombreux puits de surveillance remplis d'eau devraient faire apparaître un écoulement convectif libre dans des conditions normales.

### 5.2.1. La convection monotone

La convection monotone se produit lorsque la somme des nombres de Rayleigh thermal et solutal dépasse un nombre de Rayleigh critique (le nombre de Rayleigh est un nombre adimensionnel permettant de définir si les échanges thermiques ont lieu selon des processus de conduction ou de convection). Par exemple, dans le cas où une couche d'eau chaude et salée est présente au-dessus d'une couche froide et peu salée, une petite perturbation d'un fluide descendant va prendre la forme d'une goutte d'eau salée qui refroidit tandis que des gouttes d'eau douce plus froide vont avoir tendance à monter. Il se produit alors une forme de digitation (front caractérisé par la présence de plusieurs doigts qui progressent dans le fluide sous-jacent) qui traduit cette description physique de la convection monotone (illustration 54).

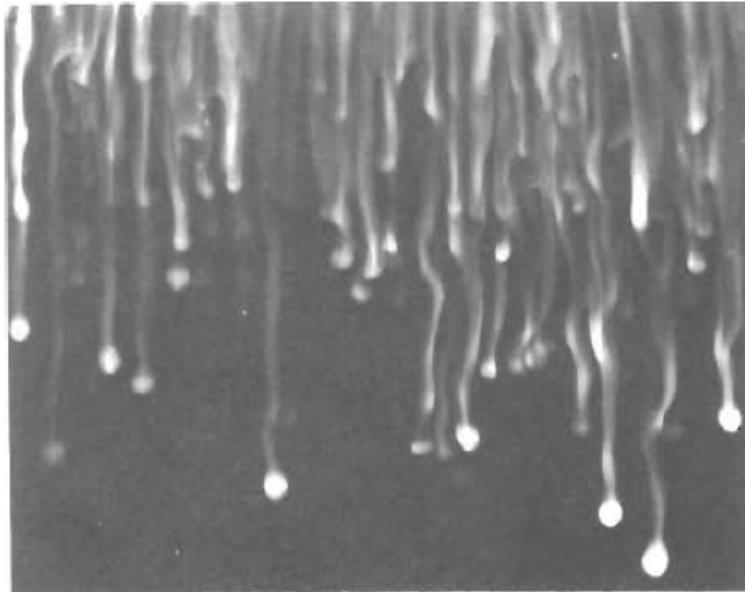


Illustration 54 - Développement de digitations à partir de l'ajout d'eau chaude salée au sommet d'une couche homogène d'eau froide peu minéralisée (Turner, 1973)

### 5.2.2. Approche théorique des mécanismes

Love et al. (2007) font une revue exhaustive des différents modèles utilisés pour caractériser le mécanisme thermo-halin dans un puits, compte tenu de ses caractéristiques. Ainsi, un certain nombre d'outils est utilisé pour décrire la physique d'un volume d'eau. Parmi les plus cités, il y a les nombres de Rayleigh thermique ( $Ra_f$ ) et solutal ( $Ra_{fD}$ ) d'une colonne d'eau selon les relations suivantes :

$$Ra_f = \frac{g\beta H_f^3 \Delta T}{\nu \cdot \kappa} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$Ra_{fD} = \frac{g\beta_c H_f^3 \Delta C}{\nu \cdot D} \quad (\text{Eq. 10})$$

Où  $H_f$  est la hauteur d'eau considérée,  $\Delta T$  et  $\Delta C$  sont les variations de température (K) et de salinité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) entre les extrémités haute et basse de la colonne d'eau,  $\beta$  et  $\beta_c$  sont les coefficients de dilatation thermique ( $1/\text{K}$ ) et solutal ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) du fluide,  $\kappa$  et  $D$  sont les diffusivités thermique et solutale du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) et  $g$  l'accélération de la pesanteur ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

Le nombre de Rayleigh thermique  $Ra_f$  augmente dans le sens de déstabilisation de l'eau : plus la température augmente avec la profondeur, plus l'on s'éloigne du régime diffusif. A l'inverse, le nombre de Rayleigh solutal  $Ra_{fD}$  augmente dans le sens de la stabilisation de l'eau : plus la salinité augmente avec la profondeur, plus l'on se rapproche du régime diffusif.

Le nombre de Rayleigh ( $Ra$ ) effectif du système thermosolutal est donc la différence des deux expressions précédentes : il caractérise le rapport entre les effets de la poussée d'Archimède (impactée par les gradients de concentration et de salinité), et ceux de la viscosité :

$$Ra = Ra_f - Ra_{fD} \quad (\text{Eq. 11})$$

Le nombre de Rayleigh critique ( $Ra_{f0}$ ) de la colonne d'eau est :

$$Ra_{f0} = \frac{215.6}{r_a^4} \cdot (1 + 3.84r_a^2) \quad (\text{Eq. 12})$$

Où  $r_a (= r_p/H_f)$  est le rapport d'aspect du puits avec  $r_p$  le rayon du puits. Lorsque ce nombre est dépassé, il est certain que des phénomènes convectifs sont en cours dans la colonne ; cette condition est suffisante, mais pas nécessaire (Love et al. 2007).

### 5.2.3. Influence de la convection interne sur l'échantillonnage

Il a été observé, dans des puits d'eau, des processus de transport convectif permettant le transfert d'oxygène dissous des zones peu profondes vers les zones profondes, en raison des variations de température saisonnières qui rendent les eaux de surface beaucoup plus froides que les eaux plus profondes. Ainsi, les puits ayant des niveaux d'eau proches de la surface sont beaucoup plus susceptibles de développer des convections thermiques car les eaux peu profondes sont plus impactées par les variations de température de l'air. La profondeur de pénétration de l'oxygène dissous est très dépendante de la taille des cellules de convection (Vroblecky et al., 2006).

Dans leur papier, Sodolov et al. (2001) démontrent que, dans un puits non perturbé, l'eau de la colonne est moins minéralisée et plus oxygénée que l'eau de la formation. Les auteurs expliquent que ceci est probablement dû à la condensation périodique de l'humidité de l'air présent au-dessus du niveau d'eau (dans le tubage) lors des variations de température journalières. Leur estimation théorique montre que la distribution température-profondeur entraîne une convection thermique qui déplace les eaux les moins minéralisées (au sommet du puits) vers les eaux de la formation.

Sammel (1968) réalise une étude des processus thermiques susceptibles de se produire dans un puits au repos. Il indique que la température de l'eau dans un puits peut ne pas représenter exactement le gradient géothermique car des perturbations internes au puits peuvent se produire, même dans des puits de faible diamètre. Ainsi, il démontre que la colonne d'eau est en équilibre instable dès que le gradient thermique dépasse certaines valeurs. Pour un puits de diamètre 4", avec une température comprise entre 40 et 50°C, l'équilibre thermique est instable lorsque le gradient thermique est supérieur à 0,001°C.m<sup>-1</sup> (soit 1°C.km<sup>-1</sup>). Sammel propose même des tailles de cellules de convection, selon le diamètre du tubage (jusqu'à 2.10 m pour un forage de 4").

## 5.3. SYNTHÈSE

Ce chapitre consacré à l'étude de l'effet de la température et de la minéralisation sur la colonne d'eau a permis de s'intéresser aux deux communautés scientifiques qui étudient les effets de ces paramètres : à l'échelle plutôt macro, pour la communauté des hydrogéologues et à une échelle plus petite, pour les mécaniciens des fluides.

Pour le domaine de l'hydrogéologie, la nécessité de tenir compte des paramètres de température et de minéralisation sur l'eau (quand ces paramètres présentent en particulier de fortes valeurs) pour le calcul de la charge est admise depuis longtemps. Pour ce faire, différentes méthodes sont utilisées et renseignées dans divers travaux. L'analyse de différents tests sur les effets de température et de minéralisation a permis de sérier les effets de ces paramètres sur la colonne d'eau.

Ainsi, dans la colonne d'eau d'un forage profond, l'augmentation de la température réduit la masse volumique de l'eau (« expansion de l'eau »), alors que, parallèlement, l'augmentation de la compression (pour des températures supérieures à 50°C) induit une modification opposée de la masse volumique. Une minéralisation croissante va augmenter la masse volumique de l'eau, si bien que la colonne d'eau sera plus lourde (« écrasement » de la colonne d'eau sous son propre poids).

Toujours dans l'objectif d'un calcul des charges, des questions se sont posées sur les valeurs à prendre en compte que ce soit avant, pendant et après pompage, pour ces paramètres, en analysant notamment les résultats de diagraphies réalisées dans des ouvrages profonds.

La prise en compte de la température, au sein d'un ouvrage ne faisant pas l'objet de pompages ou pour des mesures piézométriques effectuées longtemps après pompage, semble assez aisée, car la colonne d'eau se remet rapidement à l'équilibre avec l'encaissant (quelques semaines) et présente un gradient de température qui est fonction du gradient géothermique local. Lors du pompage, il est par contre plus difficile d'appréhender la température à prendre en compte, car la colonne d'eau va se réchauffer jusqu'à ce que celle-ci atteigne la température rencontrée au sein de l'aquifère. Toutefois cela sera fonction de la durée du pompage, du débit de la pompe et de la hauteur de la colonne d'eau.

Pour la minéralisation, le constat est plus complexe, car les ouvrages au repos depuis plusieurs années présentent de fortes stratifications. En pompage, la minéralisation de l'eau dans le forage se rapproche très rapidement de celle de l'aquifère. Après pompage, et dans les observations disponibles, la remise à l'équilibre de la minéralisation est par contre beaucoup plus lente (sans qu'on ait d'idée du temps de remise à l'équilibre (plusieurs années)).

Des diagraphies régulières dans le forage de Polastron 101 permettraient de constater l'évolution de la minéralisation au sein de l'ouvrage, voire de mieux appréhender le retour à un équilibre. Sur la base de ces mesures, la réalisation de prélèvements de fonds sériés apporterait des éléments de compréhension significatifs concernant les interactions chimiques en jeu.

Enfin, la seconde partie de l'étude s'est intéressée à une revue bibliographique des processus intervenant au sein de la colonne d'eau et auxquels les mécaniciens des fluides s'intéressent. Parmi les différents mécanismes complexes qui interviennent, on peut citer notamment des processus de stratification de l'eau, liés aux phénomènes de convections (thermohaline, oscillatoire ou monotone).

## 6. Datation des eaux souterraines

### 6.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude des temps de résidence et des datations des eaux de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques. Bien que des données acquises dans le cadre d'études précédentes soient ici présentées, ce chapitre s'appuie principalement sur des mesures de carbone-14 et de chlore-36, réalisées dans des eaux prélevées lors d'une campagne d'échantillonnage, menée du 9 au 12 janvier 2017, dans 14 forages (illustration 55).

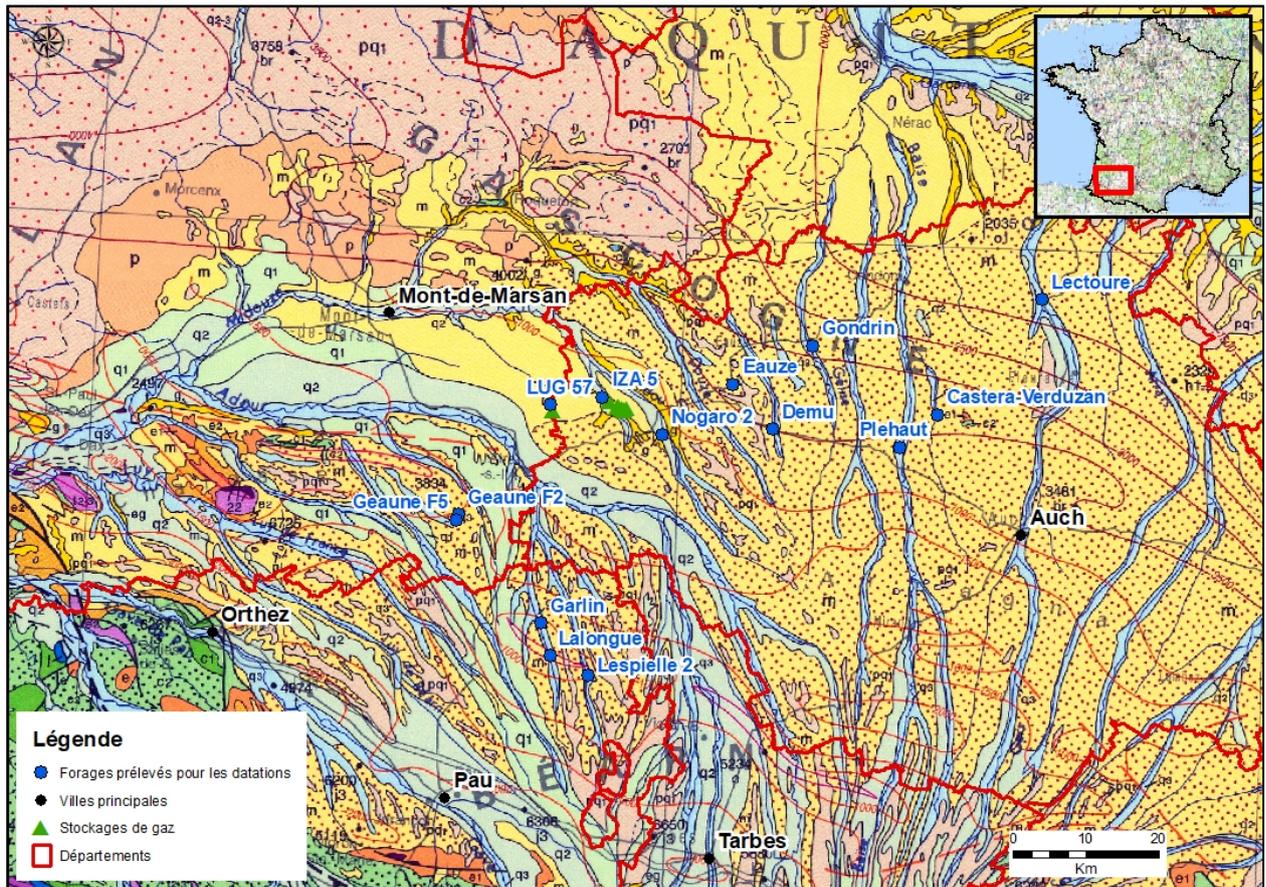


Illustration 55 - Carte des forages d'eau échantillonnés, lors de la campagne du 9 au 12 janvier 2017

En préambule des données isotopiques (isotopes de la molécule d'eau, carbone-14 et chlore-36), nous présentons ici les caractéristiques principales de ces eaux, à savoir leurs propriétés physico-chimiques et leurs compositions en éléments majeurs et traces.

### 6.2. DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES ET COMPOSITIONS CHIMIQUES

Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés sur place, en tête de puits, lors du pompage. Après stabilisation des différents paramètres (pH, Eh, conductivité), les prélèvements pour l'analyse des éléments majeurs, traces et les isotopes ont été réalisés (illustration 56). La mesure de l'alcalinité présentée dans cette illustration correspond à une mesure sur site par dosage acido-basique.

Forage	N° BSS	Prélèvement	Temp. (°C)	pH	Cond <sub>25°C</sub> (µS/cm)	Eh <sub>mes</sub> (mV)	Eh <sub>corr</sub> (mV/NHE)*	Alcalinité** (mg HCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinité (meq/L)
IZA 5	09527X0018	09/01/2017	21.1	7.57	367	-234	-27	186.42	3.056
LUG57	09526X0210	09/01/2017	40.1	7.24	382	-143	50	174.77	2.865
NOG2	09528X0026	10/01/2017	48.7	7.17	347	-199	-12	148.60	2.436
EAUZE	09536X0030	10/01/2017	31.5	7.40	333	-165	35	149.21	2.446
GONDRIN	09533X0016	10/01/2017	41.3	7.32	381	-147	46	161.59	2.649
CASTERA2	09545X0017	10/01/2017	26.0	7.42	507	-36	167	203.25	3.332
PLEHAUT	09545X0018	10/01/2017	26.9	7.26	404	-67	136	156.59	2.567
DEMU	09536X0008	10/01/2017	53.2	7.25	326	-198	-14	154.64	2.535
GEAUNE2	09788X0004	11/01/2017	31.7	7.24	359	-72	127	177.82	2.915
GEAUNE5	09788X0069	11/01/2017	32.3	7.17	348	-75	124	175.19	2.872
GARLIN	10052X0006	11/01/2017	28.2	7.52	367	-190	12	180.44	2.958
LALONGUE	10052X0037	11/01/2017	23.3	7.49	335	-231	-26	175.19	2.872
LESPIELLE1	10053X0002	11/01/2017	27.7	7.40	340	-235	-33	173.85	2.850
LECTOURE	09287X0023	12/01/2017	41.8	7.05	3120	-110	82	370.88	6.080

\* Correction du potentiel redox par rapport à l'Electrode Normale à Hydrogène (NHE)

\*\* Mesures d'alcalinité réalisées sur site

*Illustration 56 - Mesures des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées lors de la campagne de janvier 2017*

Excepté les eaux du forage de Lectoure, qui présentent une forte minéralisation, les eaux sont généralement faiblement minéralisées, avec des conductivités n'excédant pas 500 µS/cm. Les eaux sont réduites et proches de la neutralité (pH compris entre 7.0 et 7.5).

Les compositions chimiques des eaux prélevées lors de la campagne de janvier 2017 sont données dans les illustration 57 (= éléments majeurs) et illustration 58 (= éléments traces). Les concentrations ont été mesurées par les laboratoires du BRGM. La mesure de la concentration en hydrogencarbonates est un contrôle de la mesure d'alcalinité effectuée sur site.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>
	mg/L							
IZA 5	47.4	6.3	5.8	10.9	7.7	3.9	21.6	187
LUG57	46.9	8.0	6.5	10.8	5.9	20.5	20.7	172
NOG2	39.1	4.9	5.5	15.2	7.8	17.9	24.1	152
EAUZE	35.8	5.4	6.0	16.6	6.7	19.8	18.4	148
GONDRIN	33.3	7.8	6.2	26.5	6.7	33.1	19.6	161
CASTERA2	50.4	16.4	6.9	22.3	7.2	70.6	17.3	199
PLEHAUT	39.9	10.3	8.2	17.9	6.4	53.7	15.2	157
DEMU	33.2	4.6	6.0	19.0	8.1	6.8	25.8	155
GEAUNE2	53.2	4.9	4.0	8.6	5.2	14.6	18.6	178
GEAUNE5	53.6	4.9	4.0	7.1	4.9	14.1	18.2	175
GARLIN	31.4	8.3	3.1	25.9	16.7	3.2	14.5	179
LALONGUE	38.3	3.6	2.7	23.9	9.3	4.1	14.9	163
LESPIELLE1	40.6	3.1	2.7	24.6	10.7	2.9	16.2	175
LECTOURE	55.6	15.9	11.7	596.8	367.7	721.1	19.0	369

*Illustration 57 - Compositions chimiques en éléments majeurs des eaux échantillonnées lors de la campagne de janvier 2017*

	Al	B	Ba	F	Fe	Li	Mn	Sr
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l
IZA 5	0.54	17.0	117	0.1	0.218	6.03	31.2	409
LUG57	1.20	11.8	168	0.1	1.017	7.41	34.6	573
NOG2	0.60	29.3	91.4	0.2	0.309	8.27	10.9	436
EAUZE	0.56	35.4	80.5	0.2	0.349	8.97	13.9	445
GONDRIN	1.23	50.7	58.5	0.3	0.139	14.8	13.2	529
CASTERA2	< LQ	69.1	25.9	0.8	0.195	18.2	2.41	992
PLEHAUT	0.52	56.6	58.9	0.4	0.278	18.6	15.3	703
DEMU	0.73	33.3	93.1	0.2	0.343	10.9	12.7	434
GEAUNE2	1.91	7.62	67.1	0.1	0.022	3.13	1.79	200
GEAUNE5	2.69	9.12	61.9	0.1	0.024	3.70	1.75	219
GARLIN	1.91	56.5	48.2	0.3	0.373	5.70	8.94	1758
LALONGUE	1.86	43.1	32.0	0.1	0.065	6.08	6.11	306
LESPIELLE1	1.68	33.2	28.8	0.1	0.026	4.32	4.90	305
LECTOURE	1.41	1445	20.4	3.9	0.190	75.0	25.7	1166

*Illustration 58 - Compositions chimiques en éléments traces des eaux échantillonnées lors de la campagne de janvier 2017*

### 6.3. LES ISOTOPES DE LA MOLÉCULE DE L'EAU

Les isotopes de la molécule d'eau permettent une première approche de l'époque à laquelle s'est produite la recharge. Si depuis la recharge, l'eau souterraine n'a pas subi de processus d'échanges à haute température ni d'évaporation, alors les compositions isotopiques, couplées dans un diagramme  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$  doivent se situer au voisinage de la droite des précipitations océaniques mondiales définie par Craig (1961). En contexte froid (glaciaire), les eaux sont plus pauvres en isotopes lourds et les compositions plus négatives qu'en période interglaciaire.

Les données  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  reportées sur l'illustration 59 intègrent plusieurs campagnes de prélèvements dont celle de janvier 2017. Les analyses de cette dernière ont été réalisées par les laboratoires du BRGM par spectrométrie de masse en phase gazeuse. L'illustration 59 montre que les points analytiques suivent une tendance linéaire et se situent au voisinage de la droite définie par les précipitations actuelles mesurées à Dax, pour une période de 6 ans (1997-2003).

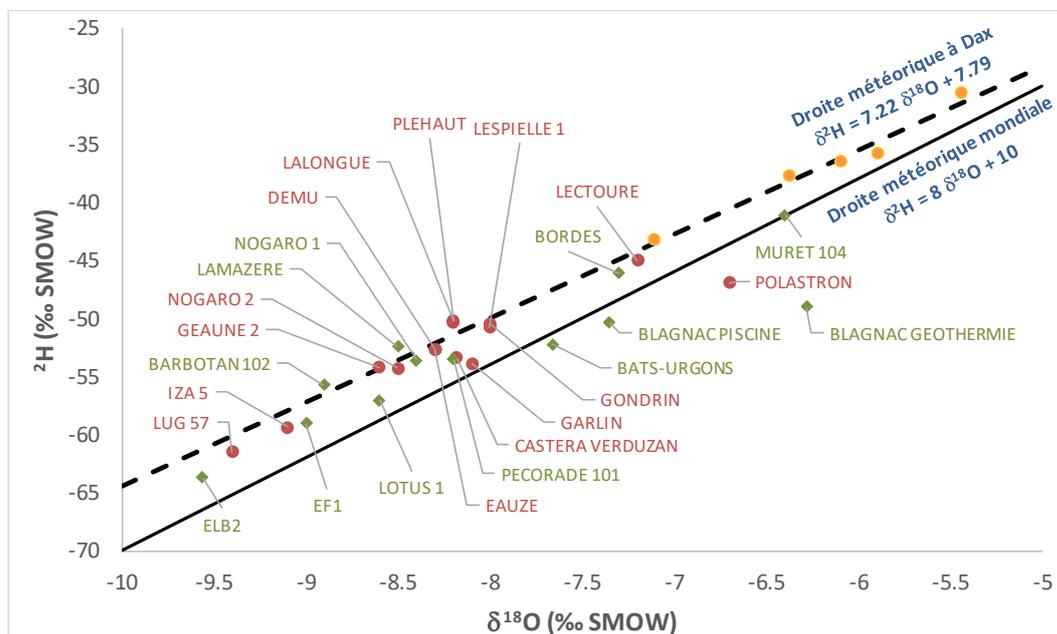


Illustration 59 - Diagramme  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$  pour les eaux analysées lors de la campagne de janvier 2017 (symboles rouges) et des eaux du même secteur géographique, mesurées lors de campagnes précédentes (symboles verts). Les symboles oranges correspondent aux valeurs moyennes enregistrées pour les eaux de pluie à Dax, entre 1997 et 2003 (Millot et al., 2010). La droite météorique mondiale (Craig, 1961) est représentée par la droite noire en trait plein, et la droite météorique de Dax est représentée en pointillés.

Une information importante qui peut être tirée de l'illustration 59 est que de nombreuses eaux présentent des faibles valeurs d'isotopes lourds, caractéristiques d'une empreinte « glaciaire ». Cette recharge portant une composante glaciaire anté-holocène indique clairement des temps de résidence anciens. Ainsi, les faibles valeurs de  $\delta^2H$  et  $\delta^{18}O$  mesurées pour les eaux de LUG 57, IZA 5 et Eugénie-les-Bains (EF1 et ELB2) sont particulièrement caractéristiques de ces conditions de recharge glaciaires anté-holocène. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Négrel et al. (2008a) sur ces mêmes traceurs isotopiques et par André et al. (2005) sur les activités en  $^{14}C$ .

On notera cependant des teneurs sensiblement plus fortes en isotopes lourds à l'est du Bassin. En effet, les eaux de Blagnac, Muret, Polastron ou Lectoure présentent des valeurs beaucoup plus élevées pouvant indiquer des conditions de recharge différentes par rapport aux zones ouest

des Sables Infra-Molassiques. Dans ce secteur, on notera également que les points s'écartent sensiblement de la droite météorique, avec un enrichissement en  $^{18}\text{O}$ . Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cet enrichissement comme une phase d'évaporation des eaux lors de leur infiltration ou bien des mélanges avec des eaux plus profondes présentant des  $\delta^{18}\text{O}$  enrichis ou des échanges eau-roche en contexte géothermal à haute température.

## 6.4. PRINCIPE DE BASE DE LA DATATION RADIOCARBONE

### 6.4.1. Principe de base de la datation radiocarbone

Le carbone-14, appelé carbone moderne ou radiocarbone, est utilisé pour dater les eaux anciennes. Sa demi-vie, d'une valeur de 5 730 ans, permet de dater les eaux jusqu'à environ 35 000 ans. Le carbone-14, produit dans la haute atmosphère, se mélange au  $^{12}\text{CO}_2$  atmosphérique et se transmet à toutes les formes vivantes, par des processus comme la photosynthèse, ainsi qu'aux eaux météoriques et océaniques, par l'intermédiaire des échanges de dioxyde de carbone.

En conséquence, tout dérivé carbonaté, dérivé du  $\text{CO}_2$  atmosphérique depuis le Pléistocène supérieur, est potentiellement utilisable pour la datation au  $^{14}\text{C}$ . Le  $^{14}\text{C}$  est par conséquent un outil permettant d'estimer l'âge des eaux anciennes et fossiles. Cette datation s'appuie sur la mesure de la désintégration du radionucléide dans un échantillon donné. Deux règles doivent être toutefois observées :

- la concentration initiale doit être connue et constante dans le temps ;
- le système doit être fermé à d'éventuels gains ou pertes, excepté la désintégration radioactive.

Si ces deux conditions sont remplies, le temps peut être mesuré précisément à partir de la perte exponentielle de la source suivant sa période de demi-vie :

$$A^{14}\text{C} = A_0 \cdot \exp(-\lambda t) \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\text{soit } t = -8267 \cdot \ln\left(\frac{A_t^{14}\text{C}}{A_0^{14}\text{C}}\right) \quad (\text{Eq. 14})$$

t est le temps exprimé en années et  $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$  avec  $t_{1/2} = 5\,730$  ans

Cependant, des dilutions et des pertes de radiocarbone, au cours de réactions géochimiques, dans le sol ou au cours du trajet souterrain, peuvent affecter la teneur en  $^{14}\text{C}$ . Les réactions les plus typiques incluent :

- la dissolution de la calcite ;
- la dissolution de la dolomie ;
- la dissolution de gypse entraînant la précipitation de calcite ;
- les échanges d'ions avec la matrice aquifère ;
- l'oxydation de la matière organique contenue dans l'aquifère ;
- la diffusion du radiocarbone dans la matrice aquifère.

La dilution du  $^{14}\text{C}$  à travers ces réactions peut être prise en compte dans l'équation de désintégration par l'intermédiaire du facteur de dilution q. Les équations précédentes deviennent alors :

$$A^{14}\text{C} = q \cdot A_0 \cdot \exp(-\lambda t) \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\text{soit } t = -8267 \cdot \ln\left(\frac{A_t^{14}\text{C}}{q \cdot A_0^{14}\text{C}}\right) \quad (\text{Eq. 16})$$

Des "modèles statistiques", jusqu'à des "modèles de process", ont été établis pour tenter d'estimer le facteur  $q$  (Clark et Fritz, 1997) :

- le modèle statistique : établi de manière empirique, il s'appuie sur une série de données, collectées dans les eaux d'Europe de l'Ouest. Une valeur moyenne est affectée à  $q$ , selon les terrains traversés par les eaux (Vogel, 1970) ;
- l'équation de Tamers (1975) qui s'appuie sur la composition des eaux et en particulier l'alcalinité (i.e.  $\text{HCO}_3$ ) ;
- le modèle de Pearson et Hanshaw (1970), qui utilise le  $\delta^{13}\text{C}$  comme traceur, dans des systèmes ouverts ou fermés, de l'évolution du carbone inorganique dissous (CID) dans les eaux souterraines. Tout processus qui ajoute, enlève ou échange du carbone et qui altère la concentration en  $^{14}\text{C}$  va aussi affecter la concentration en  $^{13}\text{C}$  ;
- le modèle de Fontes et Garnier (1979) : c'est un modèle correctif qui s'appuie sur la dissolution des minéraux et les réactions d'échange isotopique à l'intérieur de la matrice.

#### 6.4.2. Données du Bassin aquitain

Les eaux ont été prélevées dans 13 forages, lors de la campagne de janvier 2017. Seul le forage de IZA 5, initialement prévu, n'a pas été échantillonné : en effet, ce forage est situé à proximité de la bulle de stockage de gaz et les mesures de carbone peuvent être perturbées par la présence du gaz.

Compte tenu des faibles concentrations en carbone-14 déjà observées lors de campagnes précédentes (Blavoux et al., 1993 ; André, 2002), le prélèvement des eaux n'a pas été réalisé selon un protocole classique, c'est-à-dire le prélèvement de 1 litre d'eau dans des flacons en polyéthylène. L'échantillonnage a été réalisé au moyen de capsules en inox (volume de 500 mL), munies de deux robinets à l'entrée et à la sortie (illustration 60). Les capsules sont initialement purgées en laboratoire avec un gaz inerte (ici de l'azote). Sur le terrain, la capsule est connectée à la tête de forage au moyen d'un tuyau imperméable aux gaz. Elle est purgée de son gaz grâce au passage de plusieurs volumes d'eau puis les robinets sont fermés simultanément afin d'éviter tout contact de l'échantillon avec l'atmosphère. Au laboratoire, les capsules sont connectées directement sur la ligne de mesure comprenant une Spectroscopie de Masse par Accélérateur (AMS). Les mesures de carbone-13 et carbone-14 ont été réalisées au laboratoire Géosciences de Paris Sud (Université Paris-Sud).



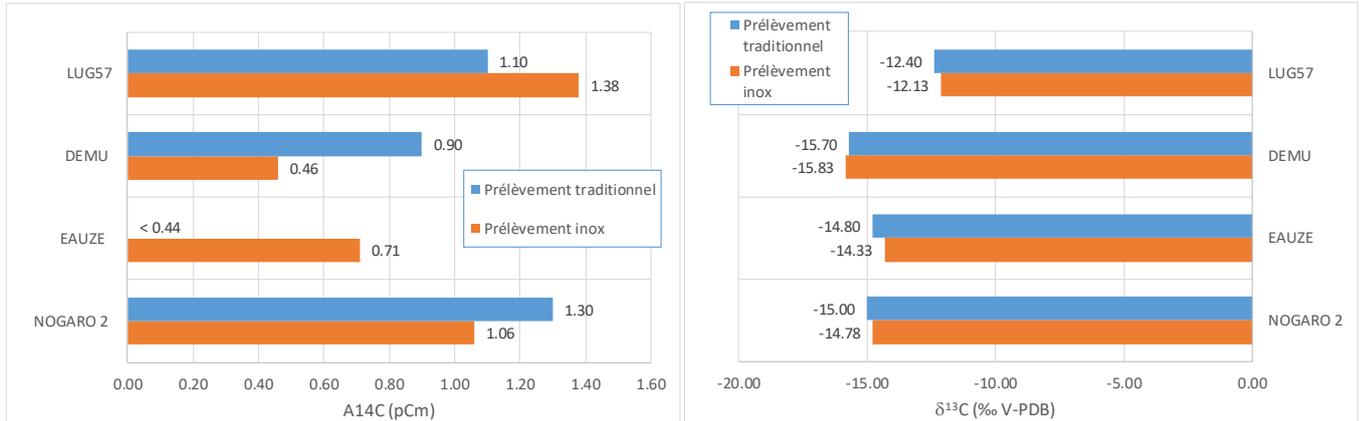
Illustration 60 - Dispositif de prélèvement des eaux pour les mesures de carbone 13 et 14 : à gauche selon une méthode traditionnelle (flacons en polyéthylène) et à droite dans des capsules en inox

Les résultats en termes de carbone-13 et de carbone-14 sont listés dans l'illustration 61. Un double échantillonnage a été réalisé sur le forage de Dému afin de tester la reproductibilité de l'échantillonnage et de la mesure. Ces résultats montrent que, à l'exception des eaux de Lectoure, le carbone-14 est « dosable » dans l'ensemble des eaux étudiées. Les activités sont faibles mais comme le montrent les deux prélèvements réalisés sur Dému, les mesures sont reproductibles avec une bonne précision.

	$A^{14}C$ AMS (pmC)	$\pm 1\sigma$ (pmC)	$\delta^{13}C$ IRMS (‰ V-PDB)
<b>PLEHAUT</b>	0.33	0.06	-14.33
<b>DEMU</b>	0.46	0.06	-16.04
<b>DEMU</b>	0.46	0.05	-15.83
<b>CASTERA-VERDUZAN</b>	13.47	0.09	-11.62
<b>GEAUNE 2</b>	5.37	0.07	-12.4
<b>GEAUNE 5</b>	6.5	0.07	-12.25
<b>LUG 57</b>	1.38	0.06	-12.13
<b>GONDRIN</b>	0.55	0.06	-14.36
<b>GARLIN</b>	0.8	0.06	-15.37
<b>NOGARO 2</b>	1.06	0.06	-14.78
<b>EAUZE</b>	0.71	0.06	-14.33
<b>LALONGUE</b>	0.83	0.06	-16.24
<b>LESPIELLE 1</b>	1.13	0.06	-16.72
<b>LECTOURE</b>	<0.27	0.05	-10.01

Illustration 61 - Mesures de carbone-13 et carbone-14, dans les eaux échantillonnées dans le Bassin aquitain en janvier 2017

A titre de comparaison, 4 prélèvements (LUG57, DEMU, EAUZE et NOG2) ont été réalisés en doublon, c'est-à-dire en capsule inox et en flacons en polyéthylène, selon une méthode traditionnelle. Les résultats sont présentés sur l'illustration 62. Pour le carbone-13, les résultats sont très similaires, alors que pour le carbone-14, des différences notables sont observées, notamment pour les forages d'Eauze et Dému, sans pouvoir cependant établir les raisons exactes de ces différences.



*Illustration 62 - Comparaison des résultats en carbone 13 et 14 entre deux types de prélèvement des eaux : en capsule inox (= prélèvement inox) et en flacons plastiques (= prélèvement traditionnel). A gauche, les activités en carbone-14 et à droite, le  $\delta^{13}\text{C}$ .*

Il est à noter que l'on n'observe pas d'écarts significatifs entre les deux modes de prélèvements si l'échantillon est analysé rapidement après l'échantillonnage. En revanche, des variations importantes apparaissent lorsque l'échantillon est conservé en bouteilles plastiques sur de longues périodes, notamment en dehors du réfrigérateur (Takahashi et al., 2015). Il est donc fortement conseillé d'analyser dans des délais relativement brefs les échantillons stockés en flacon polyéthylène.

### **Carbone-13**

L'analyse du carbone-13 montre que les eaux sont particulièrement appauvries avec des valeurs qui s'échelonnent entre -10 et -17 ‰. Les nouvelles valeurs mesurées sont toujours inférieures aux valeurs mesurées lors des précédentes campagnes, même si ces valeurs restent proches (illustration 63).

Ces très faibles valeurs semblent indiquer que ces eaux sont très peu influencées par des interactions avec des carbonates (qui auraient tendance à faire remonter le  $\delta^{13}\text{C}$ ). Ceci implique aussi que de très faibles corrections seront nécessaires lors du calcul de l'âge des eaux, à partir des activités en carbone-14.

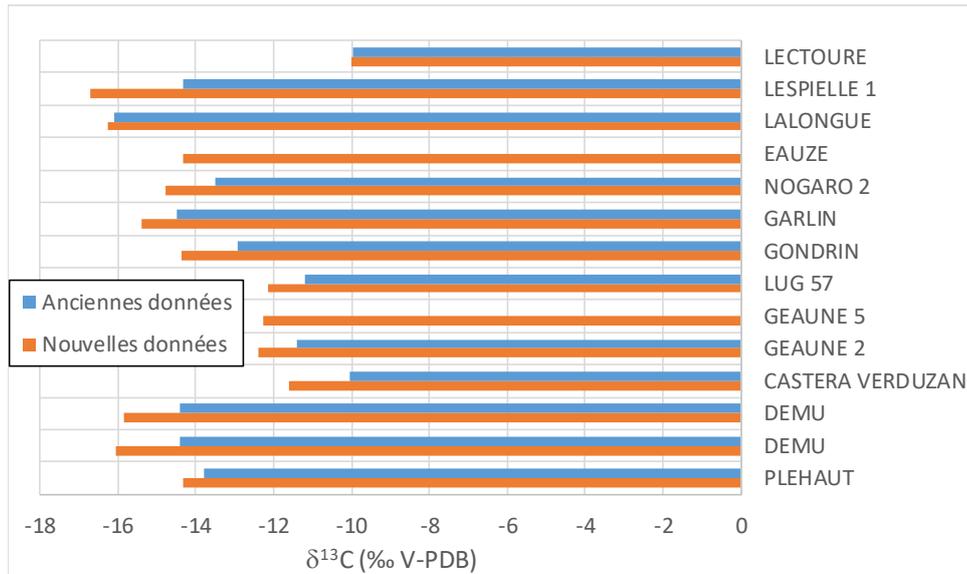


Illustration 63 - Données de composition en carbone-13, des eaux issues d'anciennes études (Anciennes données) et mesurées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (Nouvelles données)

### Carbone-14

A l'exception des eaux de Castéra-Verduzan, toutes les mesures en carbone-14, réalisées lors de la campagne de janvier 2017, sont inférieures aux valeurs mesurées lors de précédentes campagnes (illustration 64). Les écarts sont parfois très importants comme par exemple à Lectoure (où l'activité en carbone-14 est inférieure au seuil de détection), Dému et Pléhaut.

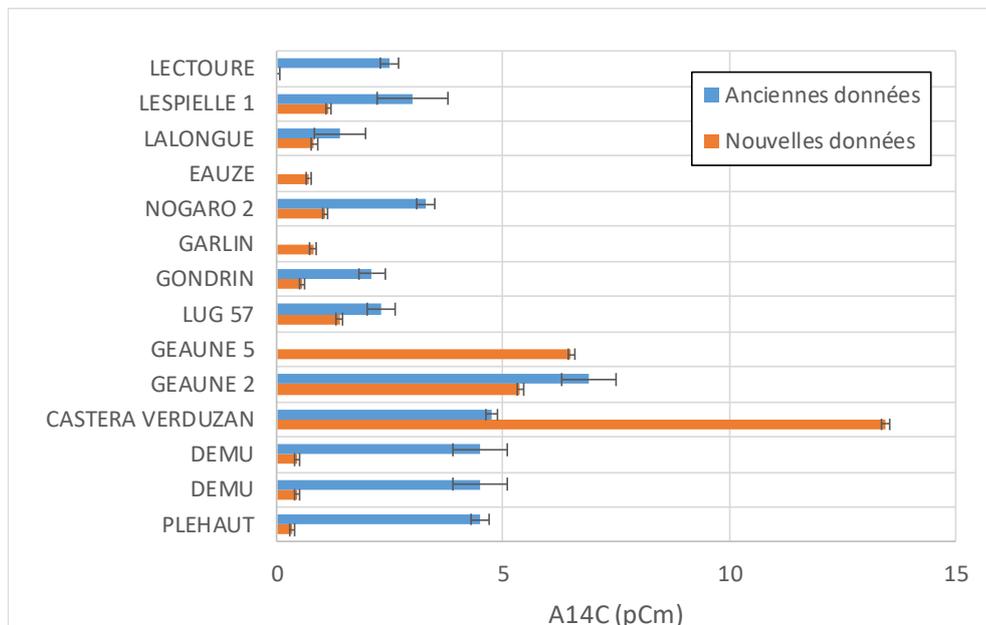


Illustration 64 - Activité en carbone-14 des eaux issues d'anciennes études (Anciennes données) et mesurées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (Nouvelles données)

Les valeurs d'activité  $^{14}\text{C}$  sont généralement très faibles puisqu'elles sont généralement inférieures à 2 pCm, excepté à Geaune (2 et 5) et à Castera-Verduzan (illustration 65). Comme indiqué plus haut au sujet de la reproductibilité des mesures, l'indice de confiance sur les valeurs mesurées est bon car l'erreur sur la mesure (par la technique AMS) est très faible ( $\sigma < 0.1$  pCm).

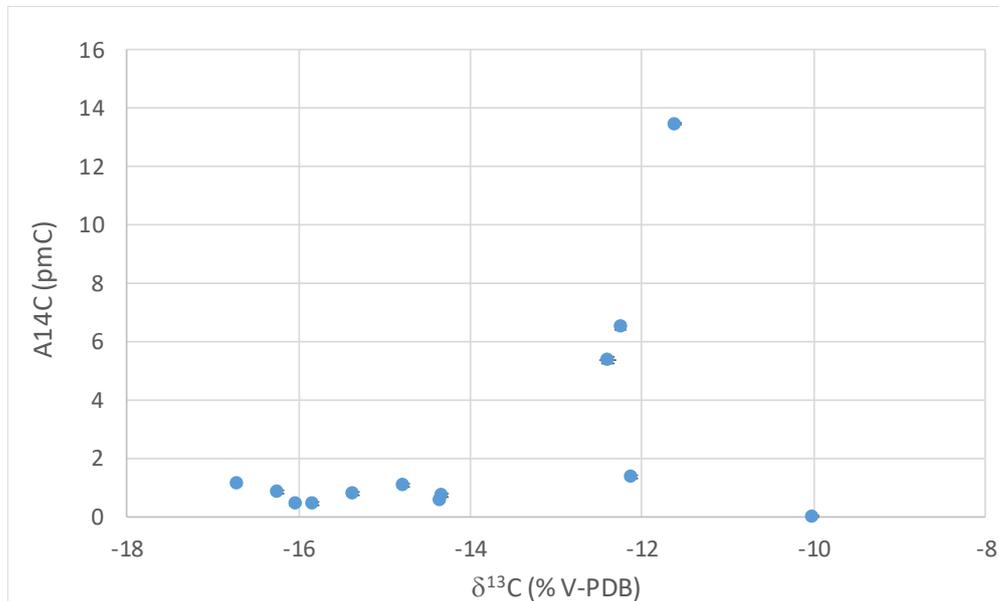


Illustration 65 - Activité en carbone-14 vs  $\delta^{13}\text{C}$  des eaux prélevées dans le cadre de la campagne de janvier 2017

Concernant le forage de Lectoure, il est le seul à présenter une activité en  $^{14}\text{C}$  inférieure aux limites de détection. Par ailleurs, sa valeur de  $\delta^{13}\text{C}$  est relativement basse, par rapport aux autres eaux échantillonnées (de l'ordre de -10 ‰). Cette valeur particulière pourrait révéler un enrichissement par du carbone-13 mort (de type carbone profond mantellique). Des analyses plus poussées sur le  $\text{CO}_2$  libre pourraient donner des informations sur l'origine du carbone.

D'un point de vue géographique, si l'on exclut le secteur de Geaune et les eaux de Castéra-Verduzan, on constate une baisse sensible des activités en carbone-14 du sud vers le nord, sur une ligne allant de Garlin à Gondrin (illustration 66). On note en revanche une sensible augmentation entre Garlin et le secteur de Lussagnet/Nogaro.

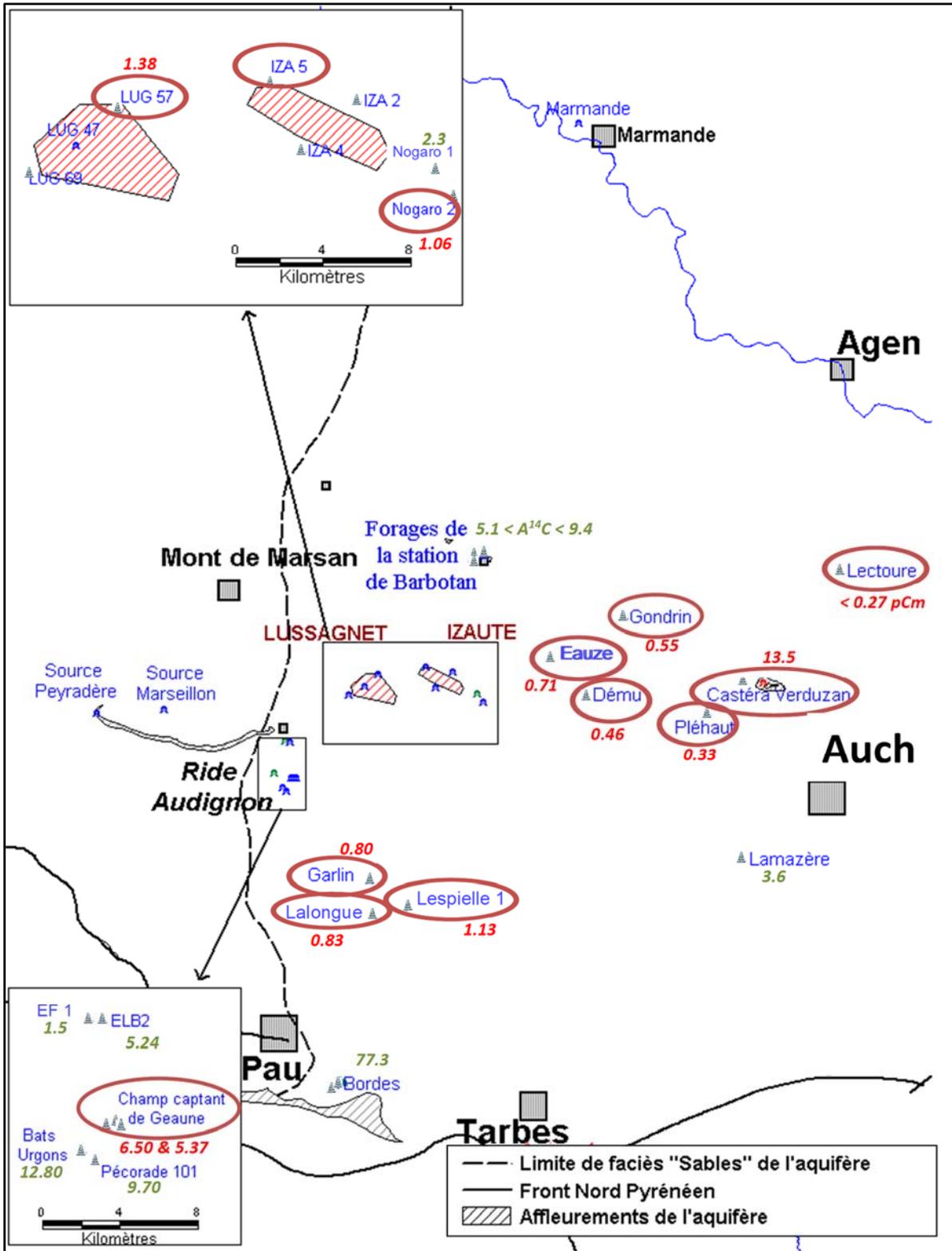


Illustration 66 - Carte des activités en carbone-14 (exprimées en pCm) des eaux prélevées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (valeurs en rouge). Les valeurs vertes correspondent à des mesures réalisées au cours de précédentes campagnes d'échantillonnage.

### • Secteur de Geaune

Dans ce secteur, c'est-à-dire à l'ouest de la zone d'étude, proche de la limite des Sables Infra-Molassiques, des valeurs d'activité  $^{14}\text{C}$  relativement fortes (par rapport aux autres eaux du bassin) ont été mesurées. Ainsi, sur les forages de Geaune 2 et Geaune 5, des valeurs respectives de 5.37 et 6.50 ont été enregistrées. Ces valeurs sont bien supérieures aux valeurs mesurées sur les forages voisins (LUG57, NOG2...).

Ces nouvelles valeurs sont toutefois cohérentes avec les valeurs mesurées lors de campagnes précédentes. Ainsi, sur Geaune 2, une valeur d'activité de 6.9 pCm avait été mesurée en 1989 (Blavoux, 1993). Sur le forage agricole de Bats-Urgons, voisin de quelques kilomètres, l'activité en  $^{14}\text{C}$  était de 12.81 +/- 0.13 pCm, à Pecorade 101, A $^{14}\text{C}$  # 9.72 +/- 0.11 pCm et sur le piézomètre d'Eugénie-les-Bains (ELB2), une valeur de 5.24 +/- 0.12 pCm a été mesurée (André, 2002).

Ce secteur géographique de l'aquifère semble donc influencé par des venues d'eau plus récentes qui pourraient rajeunir les eaux de l'aquifère. Il faut cependant noter que les valeurs d'activité  $^{14}\text{C}$  à Geaune ne diffèrent pas entre les valeurs mesurées en 2001 et en 2018. Si des apports d'eau ont lieu, il semble qu'ils soient très faibles et réguliers dans le temps.

### • Secteur de Castéra-Verduzan

Les mesures d'activité en carbone-14 dans les eaux de Castéra-Verduzan en font un point singulier, car c'est le seul prélèvement qui montre une activité en carbone-14 supérieure à celle mesurée lors des campagnes précédentes. Entre le prélèvement de 2001 et celui de 2017, la valeur a doublé pour atteindre une activité voisine de 13 pCm. Cette forte activité semble indiquer de potentiels mélanges avec des eaux plus récentes.

Cette hypothèse semble envisageable compte tenu de la profondeur de l'aquifère qui vient se biseauter sur la flexure celtaquitaine. Pour comprendre ce potentiel mélange, nous avons comparé les compositions en éléments majeurs des eaux prélevées dans les années 2000 et en 2017. On note en particulier une augmentation significative des concentrations en calcium et en hydrogénocarbonates (illustration 67).

	T. eaux (°C)	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)
11/1999	31.5	462	8.03	47.69	15.03	23.08	7.35	7.57	74.47	184.29
03/2000	30.4	460	7.48	44.32	14.55	21.38	6.85	7.09	79.20	178.60
01/2017	26.0	507	7.42	50.40	16.40	22.30	7.20	7.20	70.60	203.25

*Illustration 67 - Composition en éléments majeurs des eaux de Castéra-Verduzan*

Cette augmentation des carbonates est également visible sur l'illustration 68 : cette tendance à la hausse pourrait indiquer un mélange avec des eaux plus jeunes et plus riches en carbonates. Un bémol cependant : le  $\delta^{13}\text{C}$  n'a pas diminué sur la même période alors que l'apport de carbonates aurait dû le faire baisser.

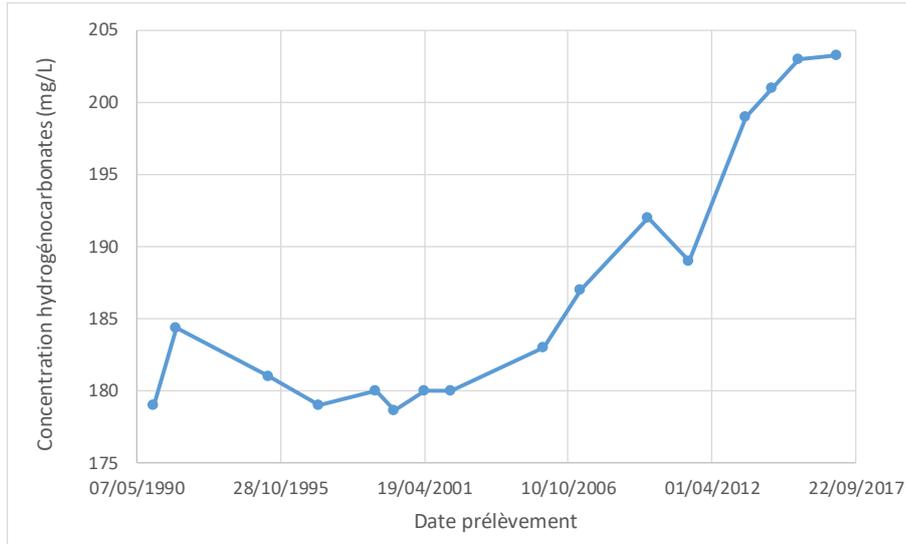


Illustration 68 - Evolution temporelle de la concentration en hydrogencarbonates dans les eaux de Castéra-Verduzan

Ce comportement spécifique à Castéra-Verduzan semble cependant comparable au fonctionnement observé à la station des thermes de Barbotan. En effet, dans ce dernier secteur, les eaux présentent des activités en carbone-14 relativement élevées (Forage B102:  $A^{14}C$  # 5.5 +/- 0.3 pCm ; Forage LOTUS 1 :  $A^{14}C$  # 24.2 +/- 0.4 pCm; Forage GEYSER 2:  $A^{14}C$  # 9.4 +/- 0.3 pCm) ce qui semble dû, comme pour Castéra-Verduzan, à des échanges avec des eaux récentes.

### 6.4.3. Modèles d'âge apparent des eaux

Comme évoqué précédemment, il est possible d'établir un âge apparent des eaux à partir de l'activité en carbone-14. Cependant, en raison des interactions eau-roche, cet âge peut être corrigé en fonction de différents paramètres comme la teneur en carbone-13 ou en carbonates. Une estimation des âges apparents selon différents modèles est proposée en Illustration 69.

L'âge brut correspond à une estimation basée sur l'équation 13 : cet âge est calculé à partir de l'activité  $^{14}C$  dans les eaux et d'une estimation de l'activité initiale  $A_0$ . Toute la difficulté réside dans la détermination de cette activité initiale. En faisant l'hypothèse que l'essentiel du carbone minéral dissous résulte de l'activité en  $^{14}C$  du  $CO_2$  du sol, il en résulte que cette valeur est proche de 100 % de carbone moderne (Fontes et Garnier, 1979 ; Blavoux, 1995). Sans indication supplémentaire, cette valeur a été prise comme référence pour l'ensemble des modèles d'estimation d'âge cités en Illustration 69.

Le modèle de Pearson et Hanshaw (1970) utilise une correction basée sur le carbone-13. La valeur de référence retenue pour le  $\delta^{13}C$  du sol est fixée à -23 ‰ et le  $\delta^{13}C$  de la calcite dissoute est fixée à 0 ‰. Pour le modèle de Tamers (1975), la correction utilise les activités en hydrogencarbonates et en  $CO_{2(aq)}$ . Afin d'estimer ces valeurs d'activité, une simulation avec le logiciel Phreeqc (Appelo et Parkhurst, 2013) a permis de calculer la spéciation des carbonates.

Pour le modèle statistique de Vogel (1970), la valeur de 0.85 a été retenue pour le facteur de correction  $q$ . Cette valeur varie selon les terrains traversés : elle est comprise entre 0.75 et 0.9 pour les sédiments faiblement carbonatés et entre 0.9 et 1.0 pour les roches cristallines.

	Age brut (années)	Age selon Modèle Pearson (années)	Age selon Modèle Tamers (années)	Age selon Modèle Vogel (années)
<b>PLEHAUT</b>	47236	43325	41956	45893
<b>DEMU</b>	44491	41511	39515	43147
<b>DEMU</b>	44491	41402	39611	43147
<b>CASTERA-VERDUZAN</b>	16573	10928	11420	15229
<b>GEAUNE 2</b>	24176	19068	19085	22832
<b>GEAUNE 5</b>	22597	17389	17440	21253
<b>LUG 57</b>	35408	30119	30470	34065
<b>GONDRIN</b>	43013	39119	38009	41670
<b>GARLIN</b>	39916	36583	34978	38572
<b>NOGARO 2</b>	37589	33933	32764	36246
<b>EAUZE</b>	40902	36991	35634	39559
<b>LALONGUE</b>	39611	36734	34401	38268
<b>LESPIELLE 1</b>	37061	34424	31926	35717
<b>LECTOURE*</b>	51376	44499	46639	50033

\* Pour Lectoure, il n'a pas été possible de mesurer l'activité en carbone 14 (< 0.27 pCm). Une valeur d'activité arbitraire en carbone de 0.2 pCm a été choisie pour faire les calculs : ceci rend les âges proposés purement indicatifs.

*Illustration 69 - Estimation de l'âge apparent des eaux de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques selon différents modèles*

Compte tenu des faibles  $\delta^{13}\text{C}$  mesurés dans les eaux échantillonnées, les corrections entre l'âge brut et l'âge corrigé restent faibles. On notera le bon accord entre les différentes approches.

La révision des activités en carbone-14 et des âges apparents des eaux nous ont amenés à revoir l'évolution paléoclimatique proposée par Blavoux et al. (1993). En effet, ces auteurs ont proposé une évolution basée sur les âges apparents des eaux (établis à partir des mesures en  $^{14}\text{C}$ ) et les données de température issues des mesures de gaz rares dans les eaux (courbe bleue - illustration 70). Les nouveaux âges des eaux établis dans cette étude permettent de ré-estimer l'évolution paléoclimatique (courbe orange - illustration 70). Aucune nouvelle donnée n'ayant été acquise sur ces mesures de gaz rares, les températures estimées par Blavoux et al. ont été conservées. Pour certains forages forés récemment, les mesures de gaz rares ne sont pas disponibles. Des estimations de la température, basées sur les données d'isotopes stables de l'eau ( $\delta^{18}\text{O}$ ), ont été réalisées. Ces estimations s'appuient sur les relations proposées par Dansgaard (1964) et revisitées par Douez (2007) pour les eaux des Sables Infra-Molassiques. Si les eaux du secteur de Castéra-Verduzan apparaissent déconnectées de l'évolution paléoclimatique générale (semblant ainsi confirmer des processus annexes dans ce secteur géographique), toutes les autres eaux se positionnent sur une évolution globale assez cohérente.

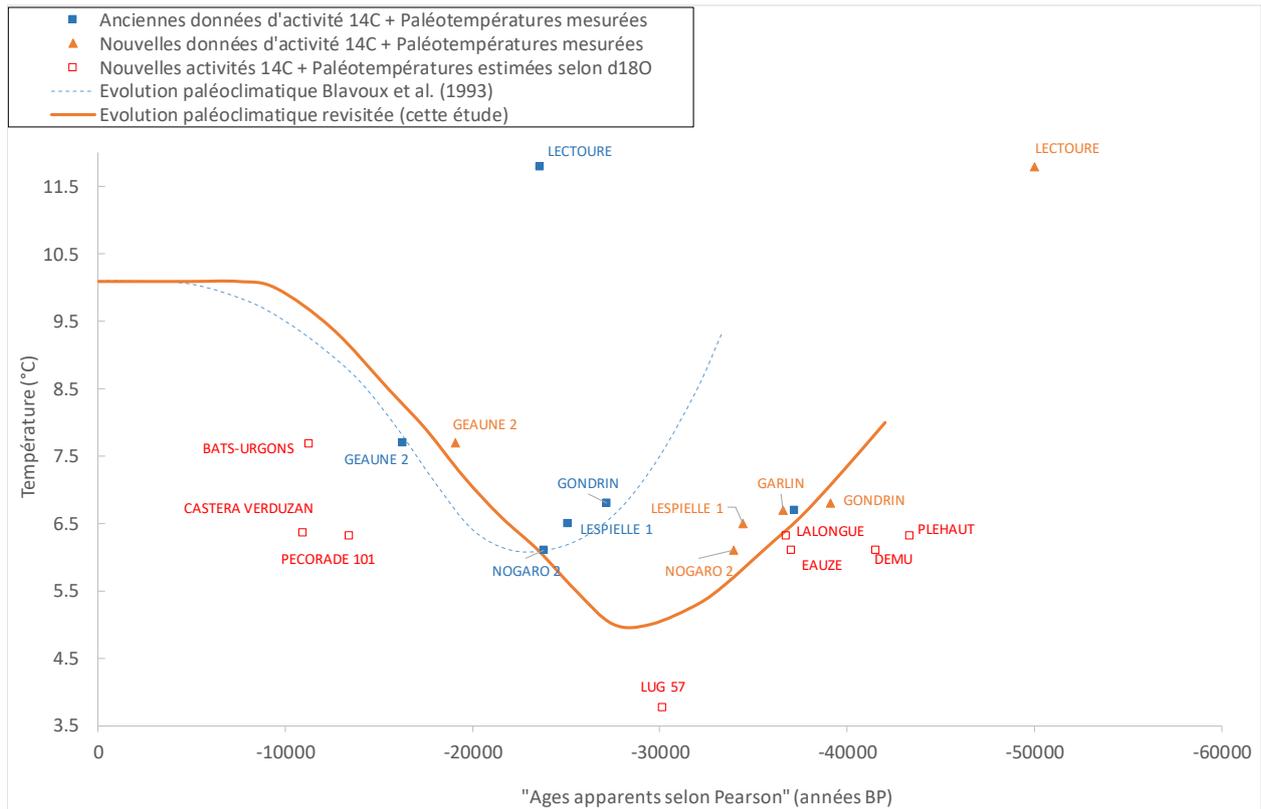


Illustration 70 - Evolution paléoclimatique : évolution entre les températures d'infiltration estimées et l'âge apparent corrigé des eaux des Sables Infra-Molassiques

Il est important ici de pouvoir comparer cette nouvelle évolution paléoclimatique établie à partir des eaux aux variations climatiques déterminées à l'échelle du bassin au moyen de différentes méthodes comme les datations des carbonates dans la grotte de Villars en Dordogne (illustration 71, Genty, 2012). Ces études ont montré que la croissance des stalagmites a été interrompue à deux reprises, durant la période glaciaire (qui s'étale sur le Würm ancien et récent d'environ 75 000 à 15 000 ans BP), entre 67 000 et 61 000 BP et entre 30 000 et 16 000 BP. Ces deux périodes, extrêmement froides, auraient empêché toute infiltration et donc toute croissance des stalagmites.

Les eaux de Lussagnet, dont l'âge apparent est de l'ordre de 25 à 30 000 ans, présentent des teneurs très faibles en isotopes lourds de la molécule d'eau, ce qui aurait tendance à confirmer que ces eaux se sont infiltrées dans des conditions extrêmement froides (proche du minimum glaciaire). Cette infiltration en période glaciaire est en accord avec les observations de Saltel et al. (2019) qui font l'hypothèse de l'existence d'un pergélisol discontinu durant ces épisodes les plus froids.

Les études sur les stalagmites ont aussi montré qu'un évènement climatique chaud s'est produit vers 45 000 ans BP. En effet, de nombreux évènements climatiques abrupts se sont produits durant toute la période glaciaire. Ces évènements sont synchrones des évènements de Dansgaard-Oeschger (DO) vus dans les autres archives climatiques, comme les glaces du Groenland. Genty et al. (2010) ont identifié l'évènement DO#12 sur plusieurs stalagmites de la grotte de Villars, ce qui semblerait confirmer l'existence de cet épisode plus tempéré dans notre région d'étude. On peut supposer, au vu des âges apparents et des paléotempératures, que les eaux de Dému, Pléhaut, Gondrin, Lalongue (...) auraient pu s'infiltrer durant cette période (plus froide qu'à l'actuel mais plus chaude que le minimum glaciaire).

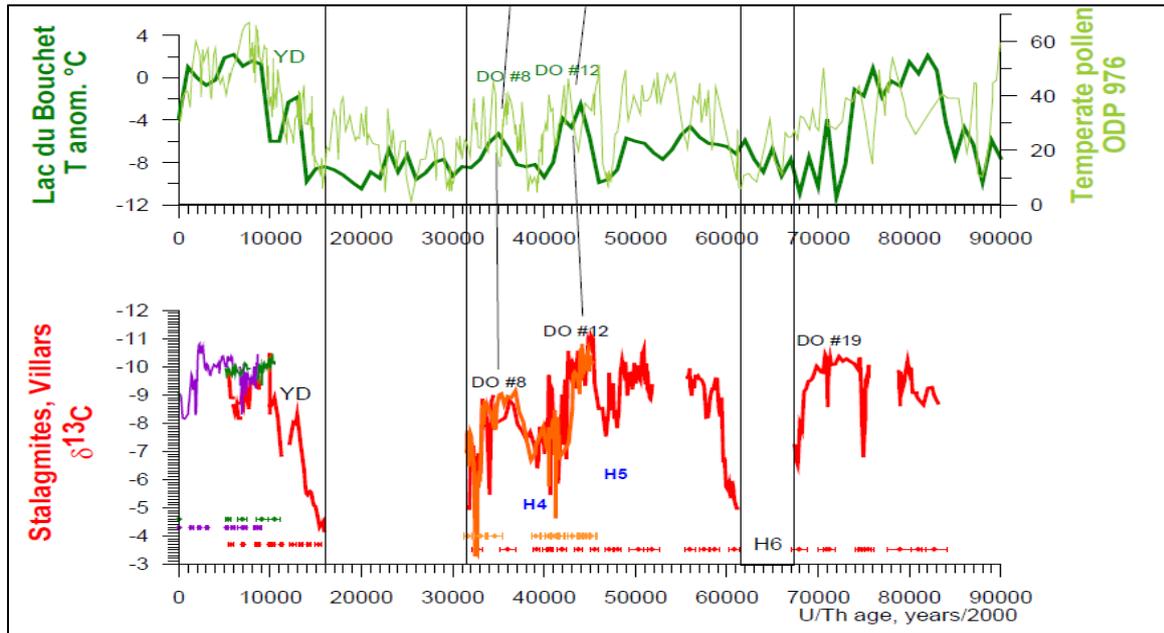


Illustration 71 - Reconstitutions paléoclimatiques pour les derniers 90 ka, à partir des stalagmites de la grotte de Villars. Comparaison avec les reconstructions de température faites à partir des grains de pollen du lac du Bouchet et le  $\delta^{18}\text{O}$  du forage NGRIP au Groenland (d'après Genty, 2012).

Enfin, le cas de Lectoure est beaucoup plus singulier. Les paléotempératures mesurées à partir des gaz rares sont supérieures à l'actuel. De plus, les activités en carbone-14 sont inférieures aux limites de détection, ce qui semble indiquer des âges apparents supérieurs à 50 000 ans. A partir de ces données, les deux hypothèses qui se présentent seraient une infiltration durant une période chaude de l'ère glaciaire (comme le DO # 14) ou bien durant une période plus chaude qu'à l'actuel, comme l'avant dernière période interglaciaire (~ 125 000 BP à ~ 75 000 BP).

## 6.5. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LE CHLORE-36

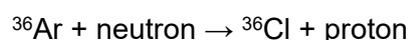
### 6.5.1. Le cycle hydrologique du chlore-36

Le chlore-36 est un isotope largement utilisé en hydrogéologie pour la datation des eaux souterraines très anciennes. L'âge des eaux est estimé à partir de la mesure de la décroissance radioactive du chlore-36 atmosphérique. Il se désintègre en  $^{36}\text{Ar}$  avec une période demi-vie de l'ordre de  $301\,000 \pm 4\,000$  ans (Bentley et al., 1986).

Le chlore-36 est produit dans la haute atmosphère du fait de l'irradiation par le rayonnement cosmique des atomes d'argon ( $^{40}\text{Ar}$ ). Il est estimé qu'environ les deux tiers du chlore-36 atmosphérique est produit par la réaction de spallation suivante:



L'autre tiers du chlore-36 atmosphérique est produit par la réaction de spallation suivante:



Ce chlore-36 ainsi créé se mélange avec le chlore stable issu des océans, beaucoup plus pauvre en chlore-36 (illustration 72).

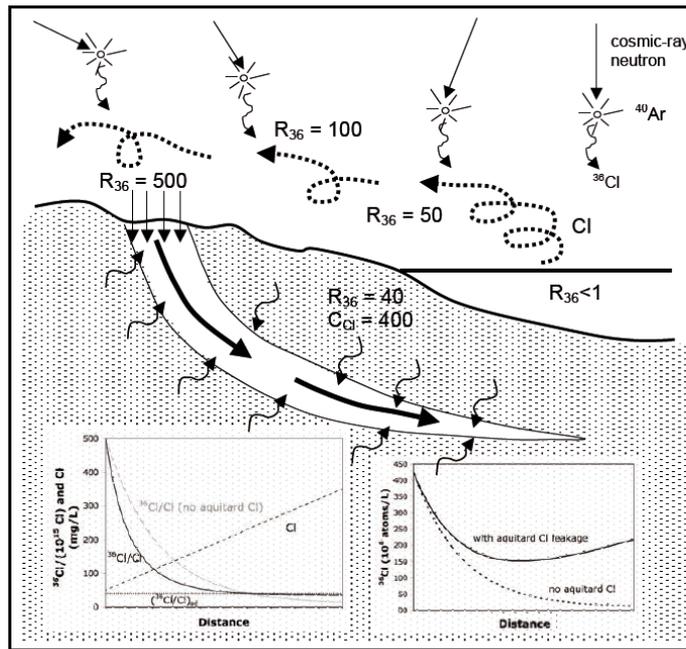


Illustration 72 - Représentation schématique du cycle hydrologique du chlore-36 (Les valeurs numériques données ne sont pas représentatives.)

Il résulte de ce processus que les ratios entre chlore-36 et chlore stable Cl ( $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ) sont relativement faibles près des côtes alors qu'ils ont tendance à augmenter vers le centre des continents, compte tenu de la diminution des concentrations en chlore stable. Ces observations ont pu être faites au travers d'études menées sur les précipitations aux Etats Unis (illustration 73) et en Europe (illustration 74).

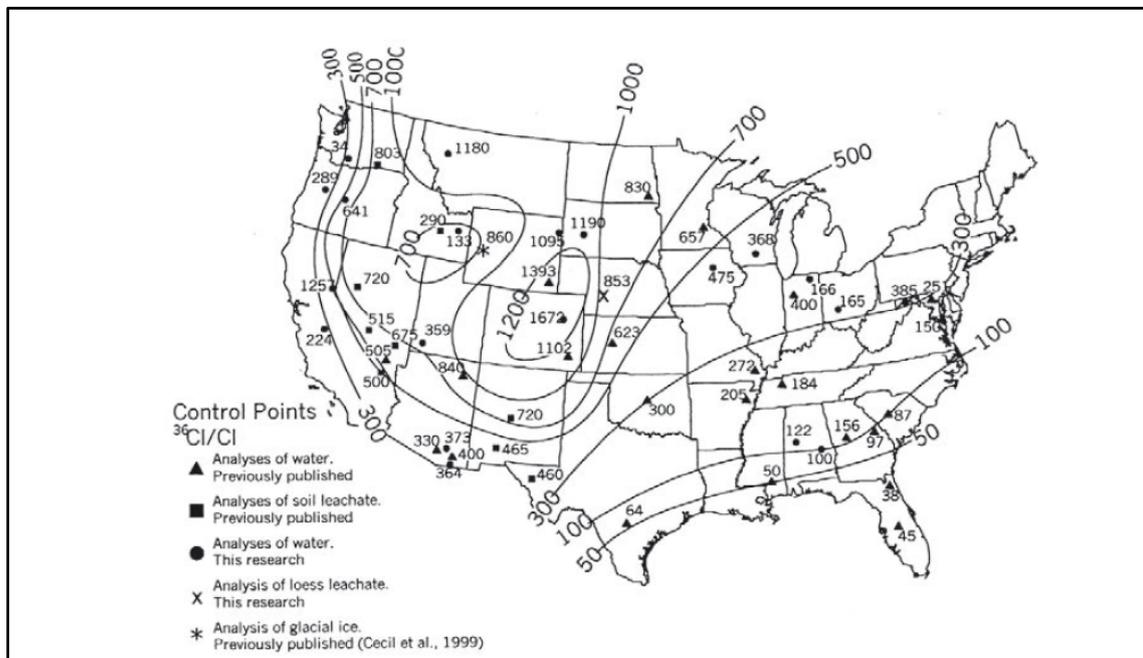


Illustration 73 - Carte, établie à partir de données empiriques, de la répartition spatiale du ratio  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  dans les précipitations aux Etats-Unis (Davis et al., 2003)

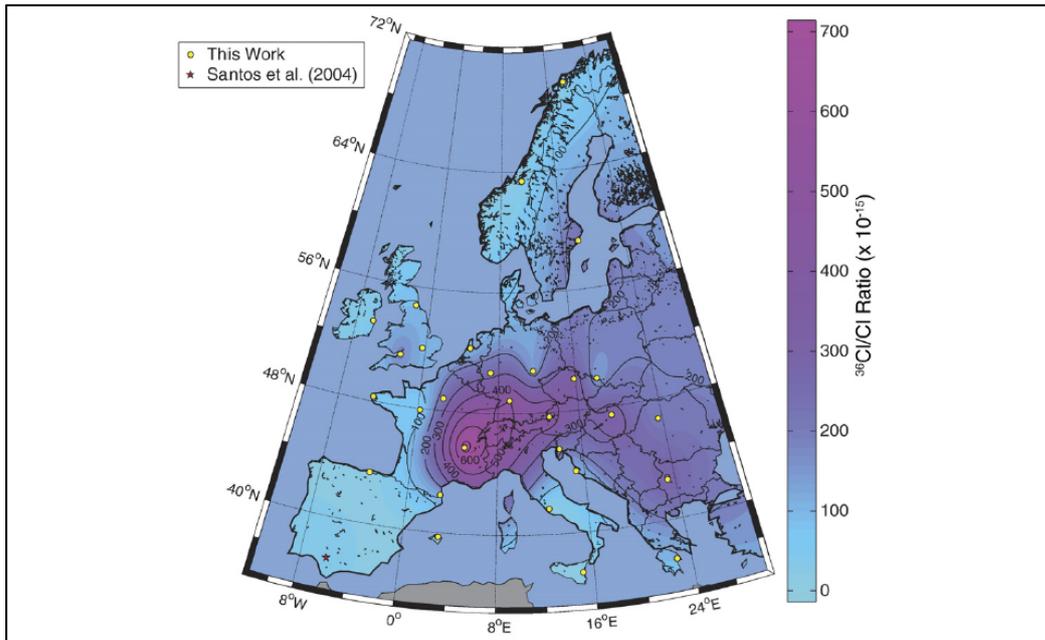


Illustration 74 - Carte de la répartition spatiale du ratio  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  dans les précipitations européennes (Johnston and McDermott, 2008)

Puis, le mélange chlore-36 et chlore stable va se déposer à la surface du sol, dissous dans les précipitations ou sous forme d'aérosols secs. Le mélange va alors pénétrer le sol, traverser la zone non-saturée puis atteindre l'aquifère où son déplacement va être contrôlé par la vitesse de l'eau dans le réservoir. Comme l'âge des eaux augmente dans le réservoir, le chlore-36 décroît.

Dans un système "isolé", c'est-à-dire ne recevant aucun apport de chlore-36 ou de chlore stable des épontes ou des aquifères adjacents, il est facile de déterminer l'âge d'une eau à partir de la teneur initiale, de la teneur mesurée et de la courbe de décroissance radioactive (illustration 72).

Dans la réalité, les aquifères peuvent recevoir des apports variés de chlore-36 et/ou de chlore stable (mélanges avec d'autres aquifères, avec les épontes, évapotranspiration ...). Dans ces conditions, le challenge est de déconvoluer le signal pour déterminer la part liée à la décroissance radioactive du chlore-36 et celle liée aux apports divers et variés.

### 6.5.2. Facteurs impactant la mesure de chlore-36

Contrairement à de nombreux composés chimiques (traceurs, radio-isotopes...) qui peuvent subir de nombreuses réactions chimiques (dissolution/précipitation, absorption, échanges...) lors de leur cheminement souterrain, le chlore-36 est virtuellement inerte ce qui simplifie l'interprétation des mesures. Cependant, malgré cette simplicité toute relative, cette interprétation n'est souvent pas aussi simple. Différents facteurs peuvent influencer la teneur en chlore-36.

#### **Les sources météoriques de chlore-36**

Comme indiqué plus haut, le chlore-36 est issu de l'interaction entre un rayonnement cosmique et des atomes de  $^{40}\text{Ar}$ . Cette production est plus forte près des pôles géomagnétiques et plus faible proche de l'équateur, en raison du champ magnétique de la Terre qui dévie les faisceaux de protons.

Le chlore-36 se forme en majorité dans la stratosphère car le rayonnement cosmique y est plus fort que dans la troposphère. Puis, entre ces deux couches, un mélange se produit et il génère des concentrations maximales en chlore-36 vers des latitudes proches de 40°, lors du printemps. Cela implique des pics de dépôts à ces latitudes et des dépôts moins importants vers les pôles et vers l'équateur.

Dans l'atmosphère, le chlore-36, ainsi que le chlore stable Cl, ont pour propriété de s'absorber dans les aérosols atmosphériques. En raison de leurs tailles, ces aérosols se déposent selon des vitesses variables. Ils peuvent également servir de nucleus pour la condensation de gouttes d'eau ou être noyés dans les gouttes après leur formation. Selon le degré de saturation en eau de l'atmosphère, ces gouttes peuvent grossir rapidement et tomber sous forme de précipitation ou bien rester dans l'atmosphère. Ainsi, le temps de résidence et les vitesses de dépôt diffèrent selon les parties de la troposphère.

D'autres sources peuvent altérer la teneur en chlore-36 dans l'atmosphère comme la variation du champ magnétique sur de longues périodes ou les apports anthropiques (explosion des bombes nucléaires au cours des années 50 et 60). Pour ce dernier cas, il est important de coupler les mesures de chlore-36 à d'autres éléments comme  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{H}/^3\text{He}$  ou les CFC.

### ***La recharge***

Lors du dépôt sur le sol et son infiltration dans la zone non-saturée, différents processus peuvent affecter les concentrations en chlore-36 et le ratio  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ , parmi lesquels :

- l'évapo-transpiration : ce processus se produit quelles que soient les contrées du globe, à plus ou moins grande échelle. Bien entendu, il sera primordial dans les régions arides. Mais, les variations climatiques aux échelles géologiques peuvent aussi générer de fortes variations des processus d'évapotranspiration pour une région donnée ;
- les processus biologiques et le transport dans la zone vadose ;
- le relargage de chlore-36 issu de l'altération des minéraux.

### **6.5.3. Limites des datations des eaux par le chlore-36**

Comme indiqué plus haut, la demi-vie du chlore-36 est de l'ordre de 300 000 ans. Et sa gamme d'utilisation ne recoupe pas celle du radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ). En effet, la décroissance du chlore-36 reste très faible lorsque les limites de décroissance du radiocarbone sont atteintes. Phillips (2000) compare chacune des approches sur deux aquifères (Jo Alamo et Nacimiento) du Bassin de San Juan (sud-ouest des USA). L'activité en  $^{14}\text{C}$  montre une décroissance exponentielle avec la distance (illustration 75). Après 30 km, l'activité est si faible qu'il devient impossible d'en déduire une estimation de l'âge. Sur le même intervalle de distance, le ratio  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  est sensiblement constant.

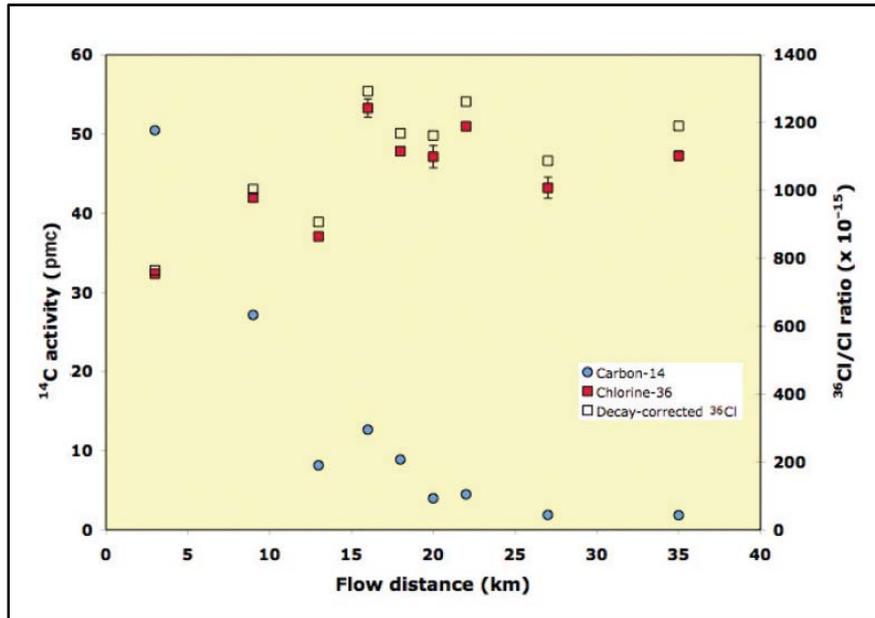


Illustration 75 - Variation de l'activité en  $^{14}\text{C}$  et du ratio  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  avec la distance pour deux aquifères (Ojo Alamo et Nacimiento) du Bassin de San Juan (USA) (Phillips, 2000; Plummer, 1996 ; Stute et al. 1995)

#### 6.5.4. Echantillonnage et analyse

La campagne de prélèvements des eaux sur la zone d'étude a eu lieu en janvier 2017, de manière simultanée avec les prélèvements pour les analyses de carbone-14 (illustration 77). L'échantillonnage pour le chlore-36 consiste à prélever 1 litre d'eau brute. Ce volume peut cependant être plus important selon la concentration en chlore dans l'eau. Les mesures de chlore-36 ont été réalisées au laboratoire (CEREGE), sur spectromètre de masse à accélérateur (AMS).

#### 6.5.5. Résultats des mesures de Chlore-36 pour le Bassin aquitain

Avant de décrire les résultats des isotopes du chlore, il faut tout d'abord rappeler que les eaux prélevées (à l'exception de Lectoure) sont des eaux très peu minéralisées avec des concentrations en chlore généralement inférieures à 10 mg/L (illustration 77). Comme le montre l'illustration 76, de sensibles variations dans les concentrations en éléments majeurs et en éléments traces sont cependant observables : on note notamment des teneurs plus fortes en chlore et en brome au forage de Garlin tandis que ces eaux (ainsi que celles de Lespielle et Lalongue) ont des concentrations en sulfates très faibles.

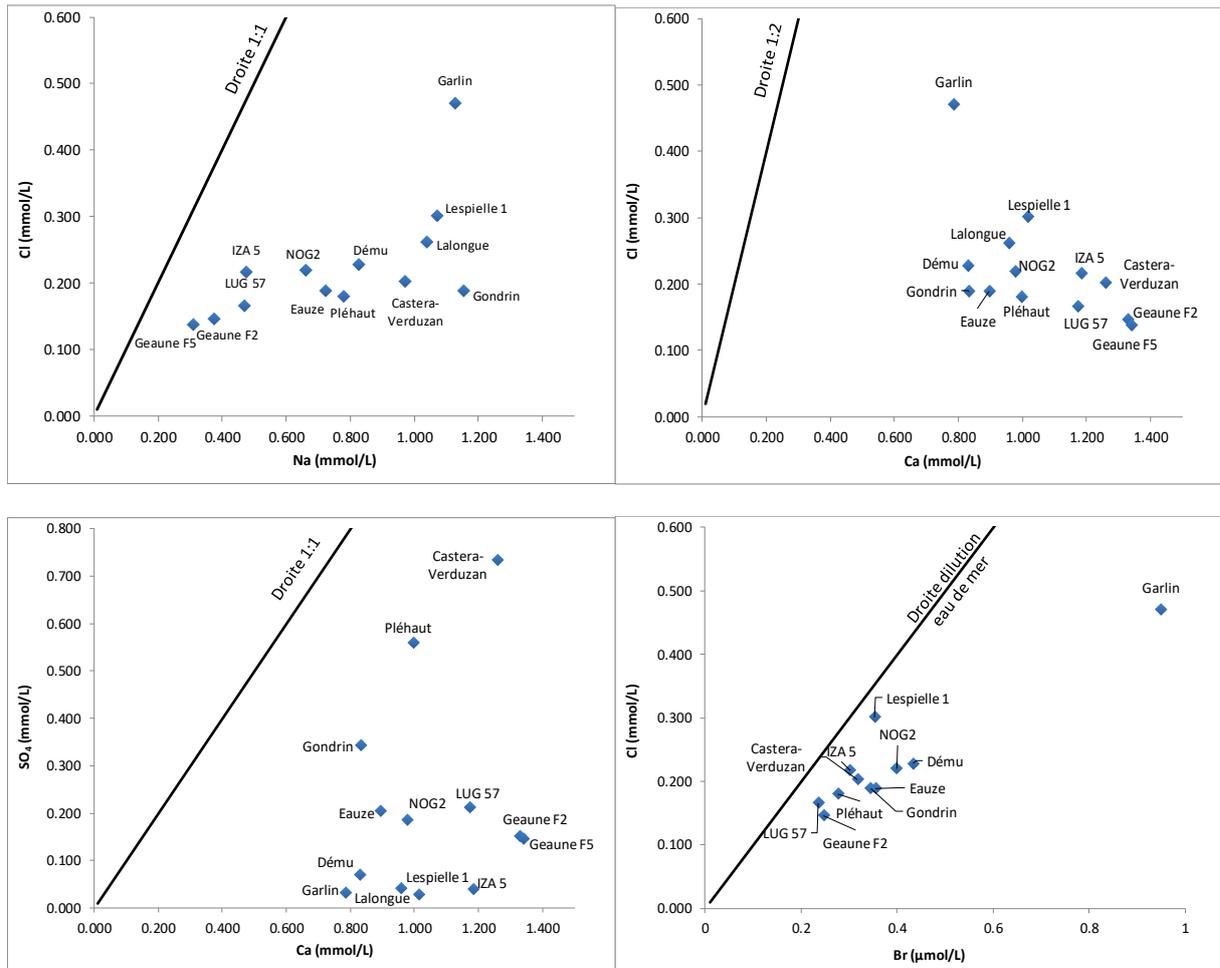


Illustration 76 - Cl versus Na avec la droite de dissolution de la halite (a) ; Cl versus Ca avec la droite de dissolution du CaCl<sub>2</sub> (b) ; SO<sub>4</sub> versus Ca avec la droite de dissolution du gypse (c) ; Cl versus Br avec la droite de dilution de l'eau de mer (d)

Les mesures de chlore-36 font apparaitre des variations notables entre les eaux. La valeur la plus faible du rapport <sup>36</sup>Cl/Cl est obtenue pour les eaux de Lectoure (10.41 x 10<sup>-15</sup> at/at<sup>6</sup>) alors que la plus forte est observée à LUG57 (41.91 x 10<sup>-15</sup> at/at).

<sup>6</sup> Le rapport <sup>36</sup>Cl/Cl est exprimé en at/at, c'est-à-dire en atome de <sup>36</sup>Cl/atome de Cl.

	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ( $\times 10^{-15}$ at/at)	$\pm$ Err (1 $\square$ )	Err % (1 $\square$ )	$^{36}\text{Cl}$ ( $\times 10^6$ at/L)	Cl (mg/l)
IZA 5	21.95	2.70	0.12	2.87	7.7
LUG 57	41.91	7.70	0.18	4.19	5.9
NOG2	25.66	3.18	0.12	3.39	7.8
Eauze	25.30	3.00	0.12	2.88	6.7
Gondrin	35.31	3.74	0.11	4.01	6.7
Castéra-Verduzan	37.80	4.28	0.11	4.62	7.2
Pléhaut	30.32	3.49	0.12	3.29	6.4
Dému	29.43	3.40	0.12	4.04	8.1
Geaune F2	32.58	3.49	0.11	2.87	5.2
Geaune F5	30.06	3.27	0.11	2.50	4.9
Garlin	12.48	2.32	0.19	3.54	16.7
Lalongue	15.56	3.52	0.23	2.45	9.3
Lespielle 1	21.22	2.94	0.14	3.85	10.7
Lectoure	10.41	1.70	0.16	6.49	367.7

Illustration 77 - Mesures de chlore-36 dans les eaux échantillonnées dans le Bassin aquitain en janvier 2017

Si l'on exclut Lectoure (compte tenu de sa localisation), les valeurs les plus faibles du rapport  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  sont observées dans la partie sud du bassin (Garlin, Lalongue, Lespielle). Ce rapport augmente en allant vers le nord de la zone d'étude. L'illustration 78 montre notamment que le rapport  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  augmente lorsque la teneur en chlore diminue dans les eaux.

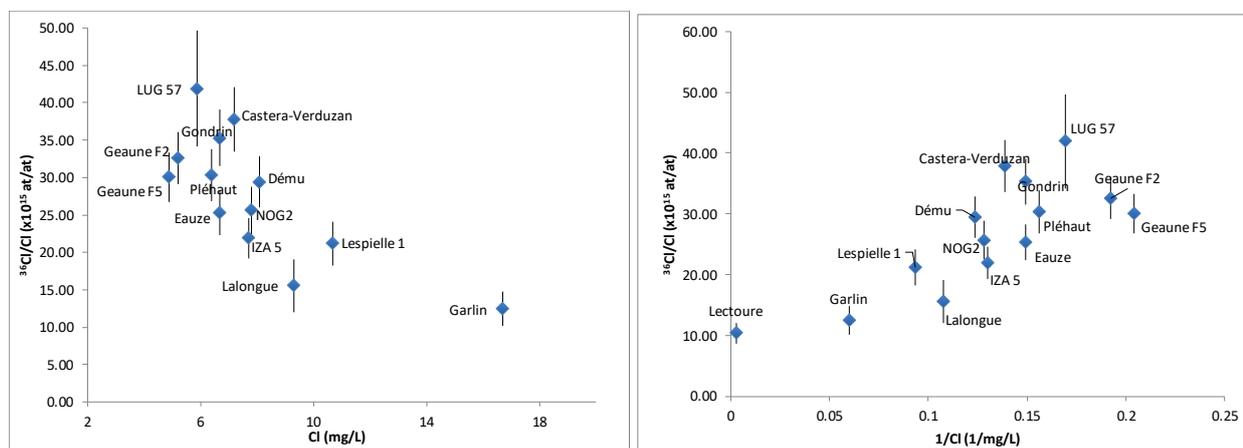


Illustration 78 - Evolution du rapport  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  en fonction de la teneur en chlore total dans les eaux (à gauche) et de l'inverse de la concentration (à droite)

En supposant que les eaux pénètrent dans l'aquifère sur les contreforts pyrénéens, cette évolution des teneurs en chlore et du rapport isotopique  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  semble indiquer que des processus de dilution pourraient se produire du sud vers le nord (en considérant une continuité hydraulique entre ces différents points de prélèvement) (illustration 79).

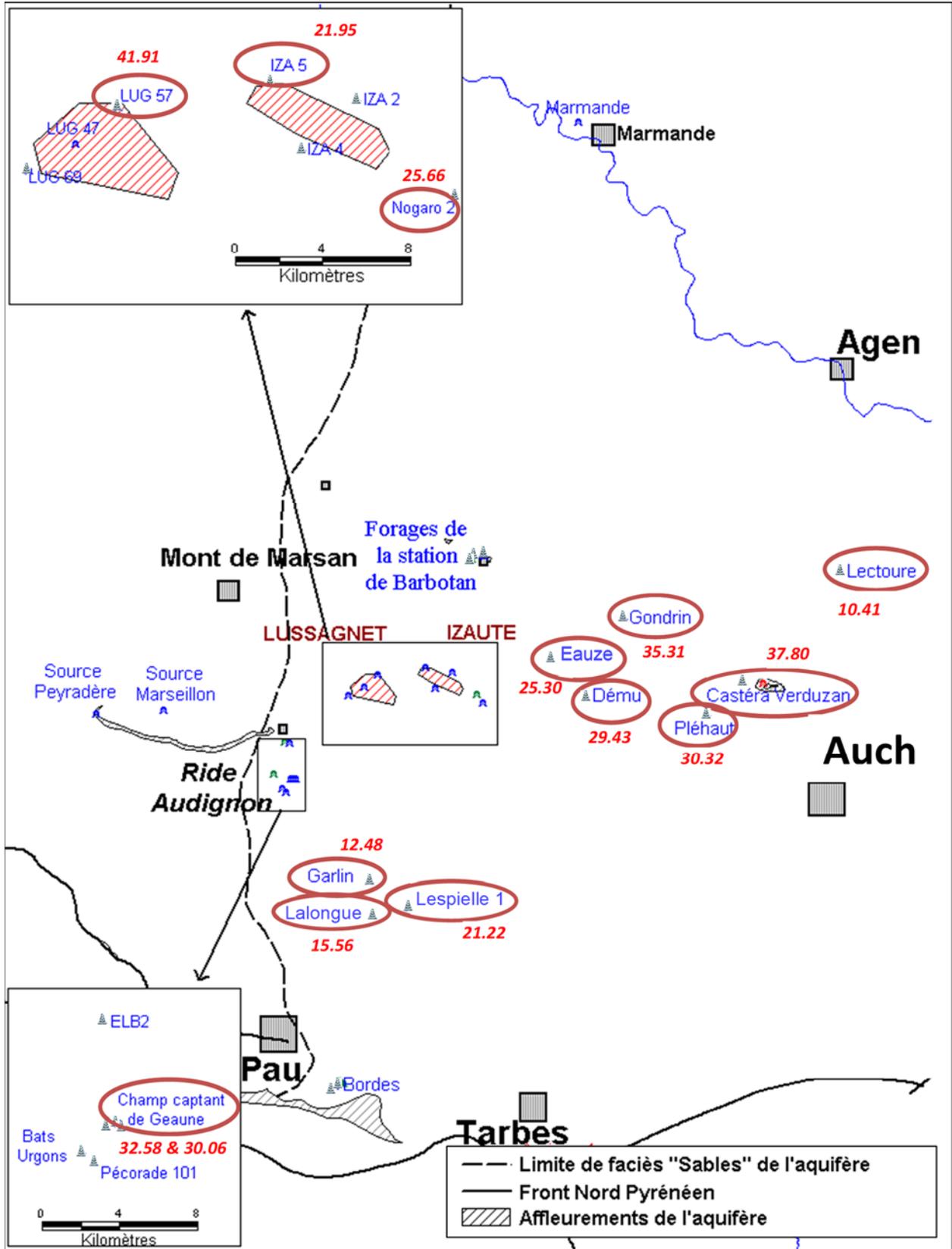


Illustration 79 - Carte du rapport  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  (exprimé en  $10^{-15}$  at/at) des eaux prélevées dans le cadre de la campagne de janvier 2017 (valeurs en rouge)

Nous avons tracé l'évolution de la teneur en chlore-36 (exprimée en atome par litre) en fonction de l'éloignement de ces affleurements (illustration 80). Aucune décroissance radioactive n'est observée. On peut noter deux tendances :

- une augmentation sensible du sud vers le nord le long d'un chemin d'écoulement entre Lalongue et Gondrin ;
- une stagnation de la teneur en chlore-36 en considérant un chemin d'écoulement entre Garlin-Lespielle et Gondrin.

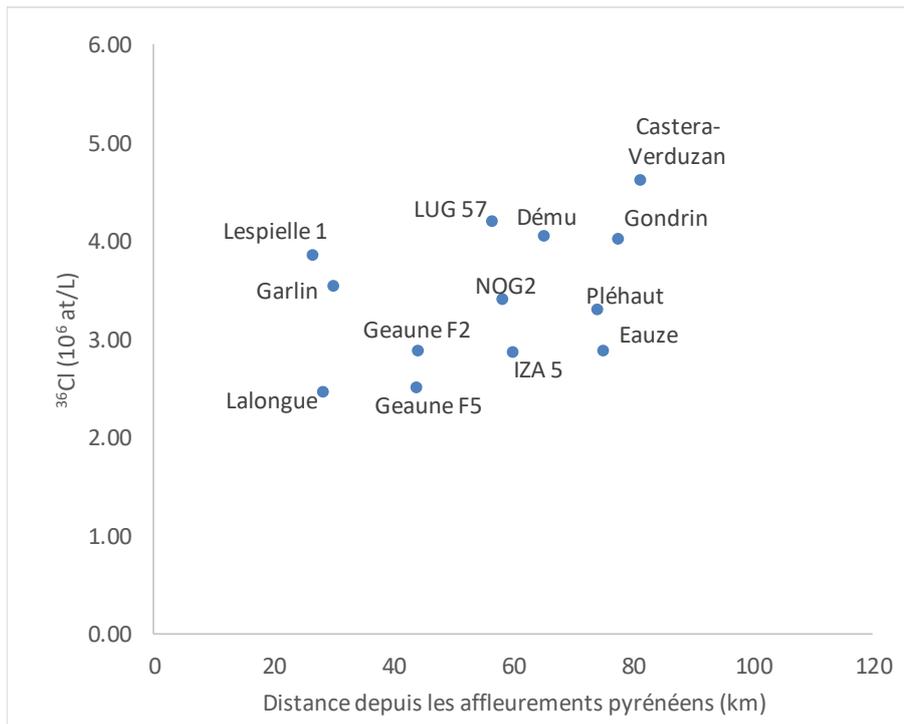


Illustration 80 - Evolution de la teneur en  $^{36}\text{Cl}$  en fonction de la distance aux zones d'affleurement sur les contreforts pyrénéens

Au vu de ces résultats, il semble donc que, le long d'une ligne d'écoulement (comme celles proposées par André, 2002), deux processus participent à l'évolution des teneurs en chlore-36, à savoir un enrichissement en chlore-36 des eaux qui aurait pour effet de faire augmenter le rapport isotopique et une dilution des eaux qui ferait baisser la concentration en chlore total.

D'autres corrélations ont été recherchées avec d'autres composés présents dans les eaux. Il est intéressant de noter que les eaux avec des rapports isotopiques  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  faibles correspondent aux eaux présentant des teneurs en carbone-13 parmi les plus faibles (illustration 81). La même tendance que celle observée pour le rapport en fonction de  $1/\text{Cl}$  est ici observée.

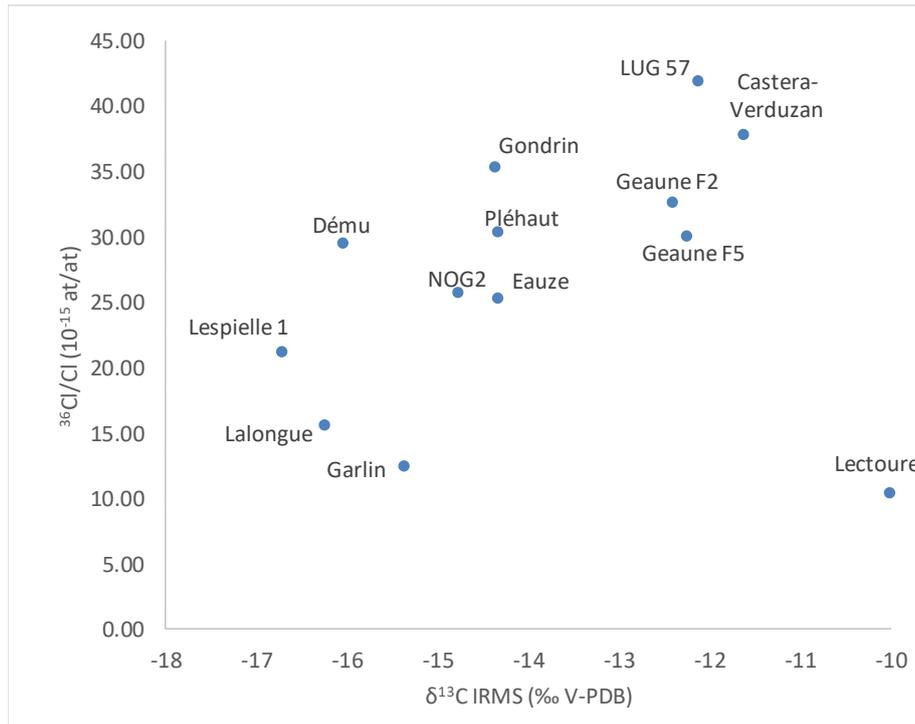


Illustration 81 - Evolution du rapport  $^{36}\text{Cl/Cl}$  en fonction de  $\delta^{13}\text{C}$

Les eaux du site de Castéra-Verduzan semblent enrichies en chlore-36. Ceci semble cohérent avec les hypothèses proposées dans le chapitre précédent qui montrait, à partir des mesures de carbone-14, la possible participation d'eaux plus récentes. Un rajeunissement des eaux de l'aquifère par des eaux plus récentes (enrichies en carbone-14 et en chlore-36) semble donc confirmé par les mesures de chlore-36.

Concernant le secteur de Geaune, les eaux présentent des teneurs en chlore total plus faibles que les eaux voisines ce qui pourrait indiquer un processus de dilution plus marqué dans ce secteur. D'après les mesures de carbone-14, il pourrait s'agir d'eaux plus récentes mais faiblement marquées en chlore-36.

#### 6.5.6. Corrélations avec la nature des horizons captés

Pour tenter de comprendre quelles pouvaient être les origines de ce facteur de dilution mis en évidence par les mesures de chlore-36, les formations captées ont été analysées. L'illustration 82 liste notamment les niveaux captés par les crépines. Ce tableau a été établi en fonction des nouvelles interprétations géologiques réalisées sur la zone d'étude dans le cadre du projet GAIA.

Les crépines sont majoritairement au droit de l'aquifère des Sables de Lussagnet, excepté à Nogaro 2, où les crépines captent les eaux des Sables de Baliros. Il est à remarquer que dans de nombreux cas, les forages n'ont pas été poussés au-delà des Sables de Lussagnet. Il est donc très difficile de connaître la nature des formations au mur des Sables, ce qui rend plus difficile l'interprétation et l'identification de possibles communications locales avec des horizons sous-jacents.

On remarquera que les eaux captées dans la partie nord sont très souvent en contact avec les sables de Baliros ou avec des formations Paléocène (Formation d'Arcet). Des interactions et des échanges entre ces horizons peuvent être supposés. On note cependant que les eaux de

Nogaro 2 ont des concentrations en chlore de l'ordre de 8 mg/L, ce qui les positionne dans une gamme haute de concentration en chlore. De plus, les eaux d'IZA 101, forage qui capte l'aquifère paléocène sous-jacent, font état d'une concentration en chlore de l'ordre de 6.5 à 7.5 mg/L. Il semble donc qu'une dilution par des eaux moins concentrées et plus profondes ne soit pas possible, dans l'état actuel de nos connaissances.

	Eponge Sup.	Aquifère 1		Aquifère 2		Eponge Inf.	Profondeur Crépine (m)
		Description	Prof. Toit-mur	Description	Prof. Toit-mur		
<b>IZA 5</b>	Form. Campagne	Sable Lussagnet	543-620	Sable Bairos	620-633	?	
<b>LUG 57</b>	Form. Tartas	Sable Lussagnet	945-1026	Sable Bairos	1026-1045	?	991-1003
<b>NOG2</b>	Form. Campagne	Sable Lussagnet	916-1026	Sable Bairos	1026-1088	Calcaire Lapêche	1031-1061
<b>Eauze</b>	Mol. Aquitaine	Sable Lussagnet	471-573	Sable Bairos	573-591	?	472-573
<b>Gondrin</b>	Form. Campagne	Sable Lussagnet	612-693			Paleo. Form. Arcet	602-690
<b>Castéra-Verduzan</b>	Mol. Agenais	Sable Lussagnet	190-224			Cret Sup (Maastrichien)	190-220
<b>Pléhaut</b>	Form. Campagne	Sable Lussagnet	478-529			Paleo. Form. Arcet	477-562
<b>Dému</b>	Form. Campagne	Sable Lussagnet	728-780	Sable Bairos	780-781.5	?	738-780
<b>Geaune F2</b>	Form. Brassempouy	Sable Lussagnet	366-487	?		?	402-477.5
<b>Geaune F5</b>	Form. Brassempouy	Sable Lussagnet	370-490	?		?	384-471
<b>Garlin</b>	Poud. Jurançon	Sable Lussagnet	498-533			Marnes Gan	492-540
<b>Lalougue</b>	Poud. Jurançon	Sable Lussagnet	251-318	Sable Bairos	318-331	?	256.3-312
<b>Lespielle 1</b>	Poud. Jurançon	Sable Lussagnet	281-415	?		?	299-409

*Illustration 82 - Nature des éponges supérieures, inférieures (lorsqu'elles ont été atteintes), descriptif et profondeur de l'aquifère et profondeur de la crépine pour l'ensemble des eaux échantillonnées*

Une autre hypothèse est la possible venue d'eaux depuis le toit du réservoir. Dans la thèse d'André (2002), l'hypothèse de transferts d'eau depuis les éponges avait été proposée. Pour vérifier cette idée, des tests de mise en solution d'échantillons de roche avaient été réalisés. Des échantillons de molasse et de sables (Lussagnet et Bairos) avaient été utilisés. Les résultats qui en étaient ressortis montraient que la mise en solution d'échantillons de molasse produisait des eaux très appauvries en chlore, avec des concentrations comprises entre 3 et 5 mg/L, alors que les Sables de Bairos généraient des concentrations de l'ordre de 4 à 6.5 mg/L. Un transfert d'eau et de matière de l'éponge supérieure vers l'aquifère pourrait donc expliquer ce processus de dilution.

## 6.6. SYNTHÈSE

La campagne de mesure menée en janvier 2017 avait pour objectif d'apporter un nouvel éclairage sur les datations acquises précédemment pour les eaux des Sables Infra-Molassiques. Pour cela, des analyses de carbone-14 ont été couplées à des mesures de chlore-36. Les nouvelles données de carbone-14 indiquent que les eaux sont sensiblement plus anciennes que ce qui avait été décrit jusqu'à présent, avec des temps de résidence compris entre 20 000 et 50 000 ans pour les plus anciennes. Les eaux les plus « jeunes » sont celles de Castéra-Verduzan, avec

probablement un rajeunissement dû à un mélange avec des eaux plus récentes. Le secteur de Geaune est assez singulier, car les âges apparents des eaux sont de l'ordre de 16 000 ans, ce qui pourrait indiquer des mélanges avec des eaux plus récentes. Mais, le contexte géologique et la profondeur des eaux captées rendent ce secteur géographique atypique par rapport aux autres eaux échantillonnées. Toutes les autres eaux analysées ont des teneurs en carbone-14 très faibles et très similaires, ce qui rend difficile une interprétation en termes de chemin d'écoulement uniquement basée sur ces valeurs.

Les données acquises avec le chlore-36 ne permettent pas d'affiner l'âge des eaux, puisque ces eaux ne sont pas assez « anciennes » pour que l'on ait une décroissance du chlore-36. Cependant, ces mesures permettent d'apporter un nouvel éclairage sur les potentiels échanges entre l'aquifère des Sables et les aquifères adjacents ou les épontes. En effet, ces mesures permettent de montrer des processus de dilution/enrichissement en chlore et chlore-36, qui pourraient être dus à des mélanges avec des eaux présentes dans les horizons proches de l'aquifère sablo-gréseux.



## 7. Conclusions

Ce rapport restitue cinq études hydrogéologiques ou hydrogéochimiques, conduites en 2017 et 2018, dans le cadre du programme scientifique GAIA. Il s'agit :

- de la poursuite de la constitution de la base de données des prélèvements dans les aquifères profonds ;
- de l'acquisition de données en vue de l'établissement de cartes piézométriques des Sables Infra-Molassiques, au travers de campagnes de mesures et de collectes de données ;
- de l'évaluation de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou dans les Petites Pyrénées ;
- d'une évaluation des effets de la thermique et de la minéralisation sur la piézométrie ;
- d'une étude de l'âge des eaux souterraines dans les aquifères profonds au travers de la mise en œuvre d'outils isotopiques.

Chacune de ces études constitue une brique de connaissance destinée à venir alimenter, à terme, la construction et le calage du modèle hydrodynamique des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain.

Concernant la base des prélèvements, la collecte de données annuelles s'est poursuivie pour les années récentes (jusqu'à 2017), tandis que des prélèvements mensuels ont été collectés afin de permettre une ventilation des volumes prélevés à un pas de temps plus fin.

Les données piézométriques collectées ou mesurées sur le terrain, entre septembre 2017 et avril 2018, permettront d'établir des cartes piézométriques des Sables Infra-Molassiques. Cette période de temps particulièrement étendue reflète la volonté de rendre compte de la dynamique de propagation de la pression, issue des cycles de stockage et de déstockage du gaz à Lussagnet et Izaute (amplitudes et durées des fluctuations), en établissant des cartes piézométriques mensuelles pour l'ensemble de la période.

Les investigations conduites dans les poudingues de Palassou ont permis de proposer une première caractérisation de différents faciès rencontrés au sein de cette formation. Cette caractérisation a été conduite sous la forme d'essais de perméabilité, réalisés dans des sondages peu profonds. Complétant les données acquises en 2016 sur les argiles à graviers, ce deuxième volet de l'étude de la recharge (indirecte) des SIM permet de mieux cerner les possibilités de recharge de l'aquifère sablo-gréseux dans une de ses parties les plus amont.

L'effet de la température et de la minéralisation sur la piézométrie est connu des hydrogéologues : différentes lois mathématiques permettent d'en rendre compte. La difficulté porte en réalité sur les hypothèses à prendre en compte dans l'application de ces lois. Ainsi et en particulier, il s'agit de tenter de préciser quelle dynamique de retour à l'équilibre est rencontrée dans un ouvrage qui vient d'être sollicité par un pompage. Si le retour à l'équilibre de la température est assez rapide et rejoint le gradient géothermique, la bibliographie est peu fournie relativement à la minéralisation, dont on observe qu'elle peut présenter une stratification marquée au sein de la colonne d'eau.

Les datations au carbone-14 effectuées sur les eaux, prélevées dans plusieurs forages profonds, en janvier 2017, indiquent que celles-ci sont pour la plupart sensiblement plus anciennes que ce qui avait été décrit jusqu'à présent, avec des temps de résidence compris entre 20 000 et 50 000 ans pour les plus anciennes. Des eaux singulièrement plus « jeunes » sont rencontrées

à Castéra-Verduzan et présentent, relativement aux données antérieures, un rajeunissement probablement dû à un mélange avec des eaux plus récentes que celles rencontrées dans les aquifères profonds. La baisse de la piézométrie au voisinage de la structure anticlinale pourrait être un facteur explicatif de cette situation.

Enfin, les données acquises avec le chlore-36 ne permettent pas d'affiner l'âge des eaux, puisque ces eaux ne sont pas assez « anciennes » pour que l'on ait une décroissance du chlore-36. Cependant, ces mesures permettent d'apporter un nouvel éclairage sur les potentiels échanges entre l'aquifère des Sables et les aquifères adjacents ou les épontes. En effet, ces mesures permettent de montrer des processus de dilution/enrichissement en chlore et chlore-36 qui pourraient être dus à des mélanges avec des eaux présentes dans les horizons proches de l'aquifère sablo-gréseux.

En sus de la capitalisation des données de prélèvements et de l'élaboration des cartes piézométriques, les investigations et études hydrogéologiques et hydrogéochimiques se poursuivent en 2019 au travers notamment de l'étude de la cyclicité des sulfates dans les SIM au voisinage de Nogaro, de la restitution des investigations conduites dans des forages profonds convertis en piézomètres ou encore par l'étude d'un certain nombre d'exutoires terrestres des aquifères profonds.

En parallèle, les travaux géologiques se poursuivent afin de finaliser la modélisation géologique qui servira de socle à l'établissement du modèle hydrogéologique des nappes profondes.

## 8. Bibliographie

### Rapports du projet GAIA

Gal F., Barrière J., André L., Wuilleumier A. (2019 – à paraître) – Projet GAIA. Investigations sur les forages profonds de Polastron, Saint-André et Lacquy : caractérisation, diagraphies de production, prélèvements sélectifs et analyses.

Manceau JC, Thiéry D., Seguin JJ., Wuilleumier A. (2018) – Projet GAIA – Travaux préliminaires à la modélisation hydrogéologique : prise en compte des effets diphasiques et thermiques. Rapport BRGM/RP- 67307-FR.

Saplaïroles M., Bardeau M., Chauvet C., André L., Wuilleumier A. (2017) – Synthèse hydrogéologique et recharge des aquifères éocènes et paléocènes sur la bordure sud-orientale du Bassin aquitain et sur le piémont pyrénéen. Rapport BRGM/RP-65024-FR.

Seguin J.J., avec la collaboration de Wuilleumier A. (2018) – Projet GAIA – Année 3 – Exploitation des cycles d'injections et de soutirages de gaz aux sites de Lussagnet et Izaute pour déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des Sables infra-molassiques. Rapport d'étape. BRGM/RP-67369-FR.

Wuilleumier A., André L., Cabaret O., Abou Akar A., Bardeau M., Mazurier C., Sasseville P-L. (2015). Projet GAIA – Année 1. Collecte des données hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Rapport final. BRGM/RP-64850-FR.

Wuilleumier A., Cabaret O., Saltel M., avec la collaboration de Brossard S., Thicoipé P. (2017) – Projet GAIA. Année 3. Avancement du volet hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-66849-FR.

### Chapitres relatifs aux prélèvements et à l'établissement de cartes piézométriques

Bel F, Sourisseau B. (1988) - Nappe Infra-Molassique dans les régions Midi-Pyrénées et sud Aquitaine. Etat des connaissances et surveillance piézométrique (mise à jour de décembre 1987). Rapport 88-SGN-208-MPY.

Bel F. (1993) - Aquifère des Sables Infra-Molassiques en Midi-Pyrénées - Etat des connaissances à fin décembre 1992. Rapport R 36883 MPY 4S 93.

Benhammouda S., Ricard J., Schoen R., Seguin J.J, Sourisseau and B. (1999) - Surveillance des systèmes aquifères des Sables Infra-Molassiques et Paléocène en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées - Etat des connaissances et suivi piézométrique à fin 1998. Rapport RR-40790-FR.

Calligée (2018) – Expertise géologique et hydrogéologique de la perte hydraulique sur le ruisseau de la Coulègne et des effondrements induits. Cezan et Lavardens (Gers). Rapport T18-32011A.

Richard C., Nguyen V.C. (1961) – Relation entre la résistivité d'une eau et son taux de minéralisation. *L'eau*, 1, 22-24.

Roche J. (1981) - La nappe Infra-Molassique dans la région Midi-Pyrénées. Mise à jour des connaissances au 01/10/1981. Rapport 81-SGN-737-MPY.

Rodier J., Legube B., Merlet N. (2016) - Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer - Contrôle et interprétation, 10<sup>ème</sup> édition. Editions Dunod, 1759 pages.

Rowe A.-M., Chou J.-C.-S. (1970). Pressure-Volume-Temperature-Concentration relation of aqueous NaCl solutions. *Journal of Chemical and Engineering*. 15(1), 61-66.

### **Chapitre relatif à la perméabilité des poudingues de Palassou**

Bilotte M, Cosson J, Crochet B, Peybernes B, Roche J, Taillefer F, Tambareau Y, Ternet Y, Villate J., 1988. Notice explicative de la feuille Lavelanet (1076) à 1/50 000. Orléans : BRGM, 63 p.

Calvet R. (2003). Le sol. Propriétés et fonctions. Tome 2. Phénomènes physiques et chimiques. Edition France Agricole

Cavaillé A., Appert C., Dumon E., Guilhaudis R., Michel P., Paris J-P., 1974. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Fousseret (1033). Orléans : BRGM. Notice explicative par Cavaillé A., Paris JP., 1974, 25 p.

Cavaillé A., 1976. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Mirepoix (1058). Orléans : BRGM. Notice explicative par Cavaillé A., 1976, 17 p.

Cavaillé A., Paris J-P., 1976. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Pamiers (1057). Orléans : BRGM. Notice explicative par Cavaillé A., Paris J-P., Tambareau Y., Villate J., 1976, 23 p.

Chossat J.C. (2005). La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Choix des méthodes. Editions TEC&DOC

Cosson J., Paris J-P., Lelubre M., Roux L., Soula J-C., Ferré B., Guchereau J-Y., Barrouquère G., Mangin A., Souquet P., Peybernes B., Bilotte M., Ciszak R., Buis M., Taillefer F., 1986. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Foix (1075). Orléans : BRGM.

Cosson J., Souquet P., Peybernes B., Bilotte M., Bousquet JP., Ciszak R., Marty M., Tambarreau Y., Villatte J., Crochet B., Taillefer F., 1984. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Lavelanet (1076). Orléans : BRGM

Crochet B. (1991) - Molasses syntectoniques du versant nord des Pyrénées : la série de Palassou. Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Editions du BRGM

Goron L. (1927). L'évolution du réseau hydrographique et du relief dans les Petites Pyrénées. In: *Revue de géographie alpine*, tome 15, n°4, 1927. pp. 473-532.

Guessab D. (1970). Alimentation des Aquifères Eocène et Crétacé supérieur par les affleurements des Petites Pyrénées. Bordeaux 3, Bordeaux.

Lamachère J.M. (1971). Mesure "in situ" de la perméabilité d'un sol non saturé. Etude bibliographique. Rapport BRGM 71 SGN 279 HYD

Paris JP., Appert G., Bugnicourt D., Carbonnier A., Dumon E., Gorce P., de Jekhowski B., Michel P., Nougarede G., Ricateau R., Saint-Martin L., Thibaut P., Thyssen B., 1971. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Saint-Gaudens (1055). Orléans : BRGM. Notice explicative par Paris JP., 1971, 23 p.

Pelissier-Hermitte G. (1970). Etude de l'alimentation des aquifères éocènes et adjacents, Région Béarn-Bigorre. Thèse.

Rey J., Soula J-C., Ternet Y., Casteras M., Peybernès B., Bilotte M., Taillefer F., Roche J., 1986. Notice explicative de la feuille Foix (1075) à 1/50 000. Orléans : BRGM, 82 p.

Reynolds D., Elrick D. (1985). In situ measurements of field-saturated conductivity, sorptivity and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph Permeameter. Soil Sci. Souquet P., Rey J., Peybernès B., Ségura F., Humbert M-A., Cavaillé A., Ternet Y., 1977. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Le Mas-d'Azil (1056). Orléans : BRGM.

Souquet P., Rey J., Peybernès B., Bilotte M, Cosson J, Cavaillé A., Roche J-H., Bambier A., (1977). Notice explicative de la feuille Le Mas-d'Azil (1056) à 1/50 000. Orléans : BRGM, 39 p.

Soilmoisture Equipment Corp. (2012). Operating instructions Guelph permeameter.

Terletskata M.N. (1954). Détermination de la perméabilité dans les terrains secs. n°2, Construction hydroélectrique.

### **Chapitre relatif aux effets de la température et de la minéralisation sur la piézométrie**

Berthold S., Börner F. (2008) - Detection of free vertical convection and double-diffusion in groundwater monitoring wells with geophysical borehole measurements. *Environmental Geology*, 54(7), 1547-1566.

Bullard, E.C. (1947) - The Time Necessary for a Bore Hole to Attain Temperature Equilibrium. *Geophysical Journal*, 5(s5), pp. 127-130.

David A. (2010) - Synthèse et valorisation des connaissances sur les aquifères profonds du Tertiaire et du Crétacé du Sud du bassin Adour-Garonne. Rapport final. BRGM/RP-57867-FR, 82 p., 29 fig., 15 tab., 10 annexes.

De Montety V. (2008) - Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque - Cas de la Camargue (delta du Rhône, France). Thèse Hydrologie. Université d'Avignon <tel-00336417>

Douez O. (2007) - Réponse d'un système aquifère multicouche aux variations paléoclimatiques et aux sollicitations anthropiques - Approche par modélisation couplée hydrodynamique, thermique et géochimique. Thèse, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.

Gravier J.-F. (1986). Propriétés des fluides de gisements. Publications de l'Institut français du pétrole. Paris Ed. Technip.

Fabris H., Roche J. (1978) – Etude du gradient géothermique au droit de la nappe infra-molassique dans la région Midi-Pyrénées. Mesures thermométriques dans des forages profonds. 78-SGN-243-MPY.

Fetter (1994) - Applied Hydrogeology (4<sup>th</sup> Edition).

Hamm V., Bazargan Sabet B. (2010) - Modelling of fluid flow and heat transfer to assess the geothermal potential of a flooded coal mine in Lorraine, France. *Geothermics*, 39, 177–186.

Kawecki M.W. (1995) - Correction for Temperature Effect in the Recovery of a Pumped Well. *Groundwater*, 33(6), 917–926.

- Kell G.S, (1975) - Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.deg. to 150.deg. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. *Journal of Chemical & Engineering Data* 1975 20 (1), 97-105
- Kundu P.K., Cohen I.M. (1990) - *Fluid Mechanics (Second Edition)*, San Diego, California: Academic Press.
- Love A.J., Simmons C.T., Nield D.A. (2007) – Double diffusive convection in groundwater wells. *Water resources Research*, 43, W08428.
- Luszczynski N.J. (1961) - Head and Flow of Ground Water of Variable Density. *Journal of Geophysical Research*, 66(12), 4247–4256.
- Malcuit E. (2008) - Approche couplée hydrogéologique et géochimique isotopique des Sables Infra-Molassiques du Bassin Adour-Garonne. Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie. UPMC.
- Negrel P., Roy S., Petelet-Giraud E., Brenot A., Millot R., Dutartre P., Fournier I. (2008) - Les outils de diagraphie chimique pour la caractérisation des masses d'eau. *Revue Techniques Sciences Méthodes*, 11, 26-49.
- Oberlander P.L. (1989) - Fluid density and gravitational variations in deep boreholes and their effect on fluid potential. *Ground Water*, 27(3), 341-350.
- Osif T.L. (1988) - The Effects of Salt, Gas, Temperature, and Pressure on the Compressibility of Water. *SPE Reservoir Engineering*. SPE-13174-PA.
- Oxburgh E.R, Richardson S.W. (1972) - Equilibrium bore hole temperatures from observation of thermal transients during drilling. *Earth and Planetary Science Letters*, 14(1), 47-49.
- Pedron N., Dupuy A., Marchet P. (2015) – Les aquifères du bassin Adour-Garonne. *Géosciences, la revue du BRGM pour une Terre durable*, mai 2015, n°19 « La Garonne, jeux et enjeux géologiques », 128 pages.
- Post V.E.A., Kooi H., Simmons C. (2007) - Using Hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses. *Ground Water*, 45(6), 664–671.
- Post V.E.A., Von Asmuth J.R. (2013) - Review: Hydraulic head measurements - new technologies, classic pitfalls. *Hydrogeology Journal*, 21: 737–750.
- Reichart G. (2015) - Modélisation thermo-hydrodynamique d'un réservoir minier profond ennoyé - Le cas du Bassin Houiller Lorrain. Thèse Université de Lorraine. Juin 2015.
- Richard C., Cu N.V. (1961). Relation entre la résistivité d'une eau et son taux de minéralisation. *L'eau*, 1, 22-24.
- Rowe A.-M., Chou J.-C.-S. (1970). Pressure-Volume-Temperature-Concentration relation of aqueous NaCl solutions. *Journal of Chemical and Engineering*. 15(1), 61-66.
- Sammel E.A. (1968) – Convective flow and its effect on temperature logging oin small-diameter wells. *Geophysics*, 33(6), 1004-1012.

Seguin J.J. (2000) – Quelques éléments théoriques et pratiques sur les effets densitaires dans les aquifères. Application au cas de l'aquifère thermal de Dax.

Seguin J.J (2003). Outil de gestion des aquifères du Sud du Bassin Adour-Garonne - Année 4. Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. BRGM/RP-52041-FR, 80 p.

Solodov I.N., Malkovsky V.I., Pek A.A., Benson S.M. (2002) - New evidence for the combined influence of vapor condensation and thermal convection on groundwater monitoring wells. *Environmental Geology*, 42, 145–150.

Suarez Arriaga M.C., Samaniego F.V. (1999). A practical solution for the transient radial-vertical heat conduction in geothermal wells. In PROCEEDINGS, Twenty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 25-27, 1999. Turner J. S. (1973) - Buoyancy effects in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge, England.

Vroblesky D.A., Casey C.C., Lowery M.A. (2006) – Influence of in-well convection on well sampling. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5247, 13 p.

Wolkersdorfer C. (2008). Water management at abandoned flooded underground mines: fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment. Springer-Verlag, Heidelberg, 465 p.

Zare-Reisabadi M. (2015) - Estimation of true formation temperature from well logs for basin modeling in Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 125, 13–22.

Zschocke A. (2005) - Correction of non-equilibrated temperature logs and implications for geothermal investigations. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2, 364-371.

Zschocke A. (2007) - Isolating Advective Signatures in Temperature Logs. Dissertation / PhD Thesis. Datensatz-ID: 52283. Germany.

### **Chapitre relatif à l'âge des eaux souterraines**

André L. (2002). Geochemical contribution to the understanding of deep groundwater flows. Application to the Infra-Molassic Sands Aquifer in Aquitaine Basin, France. PhD thesis - University of Bordeaux 3.

André L., Franceschi M., Pouchan P., Atteia O. (2005). Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer. *J. Hydrol.*, 305, 40-62.

Bentley H.W., Phillips F.M., Davis S.N. (1986). Chlorine-36 in the terrestrial environment. In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (Fritz P., Fontes J.-C., Eds), Elsevier, Amsterdam (1986).

Blavoux B., Dray M., Fehri A., Olive P., Groning M., Sonntag C., Hauquin J.P., Pelissier G., Pouchan P. (1993).- Paleoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases.- *Proceedings of International Symposium « Isotopes techniques in the study of past and current environmental changes in the atmosphere »*. IAEA Vienna, 293-305.

Blavoux B. (1995). Apports des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale. *La Houille Blanche*, N°2/3, 51-58.

- Clark I., Fritz P. (1997). *Environmental Isotopes in hydrogeology*, New York : Lewis Publishers, 1997, 328 p.
- Craigh H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Dansgaard W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436–468.
- Davis S.N., Moysey S., Cecil L.D., Zreda M. (2003). Chlorine-36 in groundwater of the United States: empirical data, *Hydrogeol. J.*, 11, 217–227.
- Douez O. (2007). Réponse d'un système aquifère multicouche aux variations paléoclimatiques et aux sollicitations anthropiques - Approche par modélisation couplée hydrodynamique, thermique et géochimique. *Hydrologie*. Université Michel de Montaigne - Bordeaux III. Français. <tel-00198733v2>
- Fleischer R.L. (1980). Isotopic disequilibrium of uranium: alpha-recoil damage and preferential solution effects. *Science*, 207, 979-981.
- Fontes J.-Ch., Garnier J.-M. (1979). Determination of the initial <sup>14</sup>C activity of total dissolved carbon: a review of existing models and a new approach, *Wat. Res. Res.*, 15, 399-413.
- Genty D., Combourieu-Nebout N., Peyron O., Blamart D., Wainer K., Mansuri F., Ghaleb B., Isabello L., Dormoy I., von Grafenstein U., Bonelli S., Landais A., Brauer A. (2010). Isotopic characterization of rapid climatic events during OIS3 and OIS4 in Villars Cave stalagmites (SW-France) and correlation with Atlantic and Mediterranean pollen records. *Quaternary Science Reviews*, 29, 2799-2820.
- Genty D. (2012). Grotte de Villars (Dordogne) : suivi environnemental et reconstitutions paléoclimatiques à partir des spéléothèmes. *In: "Quaternaire continental d'Aquitaine: un point sur les travaux récents" - Excursion AFEQ – ASF ; 30 mai - 01 juin 2012, p. 101-108.*
- IAEA (2013). *Isotope methods for dating old groundwater* - Vienna : International Atomic Energy Agency, 2013. ISBN 978–92–0–137210–9
- Innocent C., Négrel Ph. (2008). Constraining the residence time of groundwaters using short-lived U isotopes: the Trias aquifer (Paris Basin, France) and the Mid-Eocene aquifer (Aquitain Basin, France). *In Groundwater Conference, Paris 2008, 172-173.*
- Innocent C., Négrel Ph. (2008a). Constraining the residence time of groundwaters using short-lived U isotopes: the Trias aquifer (Paris Basin, France) and the Mid-Eocene aquifer (Aquitain Basin, France). *In Groundwater Conference, Paris 2008, 172-173.*
- Innocent C., Négrel Ph. (2008b). U-series constraints on aquifer groundwater residence time: the Adour-Garonne district case (southwestern France). *In GES8 - Geochemistry of the Earth's Surface - Middlesex - Angleterre - 18-22/08/2008. Mineralogical Magazine*, 72, 321-324.
- Johnston V.E., McDermott F. (2008). The distribution of meteoric Cl-36 in precipitation across Europe in spring 2007. *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 154–164.
- Millot R., Petelet-Giraud E., Guerrot C., Négrel P. (2010). Multi-isotopic composition ( $\delta^7\text{Li}$ – $\delta^{11}\text{B}$ – $\delta\text{D}$ – $\delta^{18}\text{O}$ ) of rainwaters in France: Origin and spatio-temporal characterization. *Applied Geochemistry*, 25, 1510–1524.

Négrel Ph., Brenot A., Petelet-Giraud E., Millot R., Roy S., Dutartre P., Fournier I. (2008a). Interconnexions et hétérogénéités des masses d'eau en Adour-Garonne. Approche multi-isotopique et contraintes géochimiques, in RST Nancy 2008 - Nancy - France - 21-24/04/2008.

Négrel Ph., Petelet-Giraud E., Brenot A., Millot R., Innocent C. (2008b). Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour-Garonne : interconnexions et hétérogénéités – CARISMEAU. Rapport final. Tome 1 : Les outils isotopiques appliqués à la gestion des ressources en eau. Exemple de la masse d'eau des sables infra-molassiques. Rapport BRGM/RP-56291-FR, 192 p., 45 ill.

Osmond J.K., Cowart J.B. (1976). The theory and uses of natural uranium isotopic variations in hydrology. *Atomic Energy Reviews*, 14, 621-679.

Parkhurst D.L., Appelo, C.A.J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p., available only at <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43>.

Pearson F.J., Hanshaw B.B. (1970). Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating In *Isotope Hydrology 1970*, IAEA Symposium 129, Mars 1970, Vienne, pp. 271-286.

Phillips F.M. (2000). Chlorine-36. In: *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* (Cook P.G., Herczeg A.L., Eds), Kluwer Academic Press, Boston, M A.

Phillips F.M. (2013). Chapter 6. Chlorine-36 dating of old groundwater. In *Isotope methods for dating old groundwater - Vienna: International Atomic Energy Agency*, 2013. 376 p. STI/PUB/1587 ISBN 978-92-0-137210-9.

Plummer M.A. (1996). Secular variation of cosmogenic nuclide production from chlorine-36 in fossil pack rat middens, MSc Thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology.

Saltel M., Rebeix R., Thomas B., Franceschi M., Lavielle B., Bertran P (2019). Paleoclimate variations and impact on groundwater recharge in multi-layer aquifer systems using a multi-tracer approach (northern Aquitaine basin, France). *Hydrogeology Journal*, 27(4), 1439-1457.

Takahashi H., Handa, H., Minami, M., Aramaki T., Nakamura, T. (2015). Secular change of stable carbon isotopic ratio in groundwater samples during their storage in laboratory, Japan Geoscience Union Meeting 2015.

Tamers M.A. (1975). The validity of radiocarbon dates on groundwater. *Geophysical Survey*, 2, 217-239.

Vogel J.C. (1970). Carbon-14 dating of groundwater In *Isotope Hydrology 1970*, IAEA Symposium 129, mars 1970, Vienne, 225-239



# Annexe 1

## Correspondance entre les anciens et nouveaux codes BSS des ouvrages de la base des volumes

Ancien Code BSS	Nouveau Code BSS	Ancien Code BSS	Nouveau Code BSS	Ancien Code BSS	Nouveau Code BSS
10575X0014/HY	BSS002LNVC	09771X0193/F	BSS002FKSK	09773X0098/F	BSS002FLJF
09764X0048/F	BSS002FJKT	09536X0008/F	BSS002EFZJ	09783X0022/F	BSS002FMBS
09261X0057/F2	BSS002CWBW	09774X0026/F1	BSS002FLNV	09783X0002/FACR3	BSS002FMAX
09782X0016/F3	BSS002FLZZ	09536X0030/F	BSS002EGAG	09783X0032/F	BSS002FMCA
09782X0006/P1	BSS002FLZP	09784X0020/F	BSS002FMDE	09783X0033/F	BSS002FMCB
09782X0024/F1	BSS002FMAH	09784X0025/EF2	BSS002FMDD	10121X0013/F	BSS002HYFN
09782X0025/F2	BSS002FMAJ	09784X0029/CHICOY	BSS002FMDF	09528X0026/F	BSS002EFSB
09782X0022/P2	BSS002FMAF	09784X0036/ALIENO	BSS002FMDW	09528X0002/F	BSS002EFRB
09516X0193/F2	BSS002EEEV	09784X0018/F	BSS002FMDC	09773X0008/F	BSS002FLHP
09516X0046/F1	BSS002EDYS	09784X0024/EF1	BSS002FMDJ	09774X0031/F	BSS002FLPA
09782X0010/SOURCE	BSS002FLZT	09782X0011/F2	BSS002FLZU	09767X0073/F5	BSS002FKEQ
10752X0024/HY	BSS002MDNL	09782X0012/F2TER	BSS002FLZV	09767X0010/F1	BSS002FKCG
10575X0020/HY	BSS002LNVH	09782X0013/F4	BSS002FLZW	09767X0033/F2	BSS002FKDF
10752X0067/HY	10752X0067	09783X0019/F	BSS002FMBQ	09767X0037/F3	BSS002FKDK
10575X0019/HY	BSS002LNVG	09783X0023/F	BSS002FMBT	09767X0075/F4	BSS002FKES
10576X0025/HY	BSS002LNXU	09784X0037/F	BSS002FMDX	09788X0004/F2	BSS002FMFR
10576X0024/HY	BSS002LNXT	09784X0035/F	BSS002FMDV	09788X0011/F3	BSS002FMFY
09838B0203/F	BSS002FTAL	09784X0022/F	BSS002FMDG	09788X0003/F1	BSS002FMFQ
09838A0421/F	BSS002FSSJ	09784X0021/F	BSS002FMDH	10761X0093/HY	BSS002MEYU
10306X0036/F1	BSS002KBJJ	10568X0034/HY	BSS002LMWD	09506X0213/AVENU2	BSS002EBML
10306X0033/F2	BSS002KBJF	09773X0006/F	BSS002FLHM	09506X0006/AVENUE	BSS002EBDN
10306X0034/F3	BSS002KBJG	09507X0031/FBUC2	BSS002EBPK	09506X0007/LAHIRES	BSS002EBDP
10306X0035/F4	BSS002KBJH	09788X0015/F	BSS002FMGC	09506X0010/DARR0Z	BSS002EBDS
09784X0028/F13	BSS002FMDN	09788X0069/F5	BSS002FMGG	09506X0054/MONT-1	BSS002EBFL
10052X0006/F1	BSS002HQKT	09788X0014/PCE101	BSS002FMGB	09506X0055/MONT-2	BSS002EBFM
09014X0013/F	BSS002CACN	09533X0016/F	BSS002EFWR	09506X0053/T5	BSS002EBFK
09784X0010/F3	BSS002FMCU	09506X0060/F	BSS002EBFS	09763X0143/F	BSS002FJBR
09545X0022/SOURCE	BSS002EGES	09586X0008/F	BSS002ENEH	09763X0141/F	BSS002FJBP
09545X0007/F	BSS002EGEB	09587X0003/F	BSS002ENFB	09261X0010/N2	BSS002CVZY
09545X0019/F	BSS002EGEP	09587X0002/F	BSS002ENFA	09261X0008/F1	BSS002CVZW
09545X0001/F	BSS002EGDV	09587X0029/F	BSS002ENGD	09261X0123/F3	BSS002CWDW
09545X0017/F	BSS002EGEM	09857X0104/F	BSS002GFZW	09781X0006/F	BSS002FLYN
09268X0045/F	BSS002CXNP	09782X0005/F2	BSS002FLZN	09781X0005/F	BSS002FLYM
09268X0048/F	BSS002CXNS	09782X0009/F1	BSS002FLZS	09782X0019/F	BSS002FMAC
09268X0035/F	BSS002CXND	09782X0008/F3	BSS002FLZR	09782X0020/F	BSS002FMAD
09268X0064/F	BSS002CXPJ	09782X0021/F4	BSS002FMAE	09763X0145/F	BSS002FJBT
09268X0065/F	BSS002CXPK	09782X0027/F	BSS002FMAL	09763X0198/F	BSS002FJIDY
09268X0047/F	BSS002CXNR	09526X0210/F	BSS002EFMD	09763X0189/F	BSS002FJDP
09268X0049/F	BSS002CXNT	10052X0037/F	BSS002HQLZ	09763X0242/F	BSS002FJFU
09268X0062/F	BSS002CXPG	10071X0012/F	BSS002HRHS	09545X0018/F	BSS002EGEN
09268X0063/F	BSS002CXPH	09287X0023/F	BSS002CYDM	09768X0039/F	BSS002FKGZ
09268X0059/F	BSS002CXPD	10053X0002/F1	BSS002HQMM	09768X0059/F2	BSS002FKHQ
09268X0061/F	BSS002CXPF	09774X0029/F	BSS002FLNY	09771X0163/SPDX1	BSS002FKRD
09268X0029/F	BSS002CXMX	09774X0065/F	BSS002FLPB	09764X0082/F	BSS002FJLZ
09268X0031/F	BSS002CXMZ	09774X0024/HY	BSS002FLNT	09783X0017/F	BSS002FMBN
09764X0034/GDX1	BSS002FJKE	09774X0025/F1	BSS002FLNU	09783X0018/F1	BSS002FMBP
09771X0035/BAIGNO	BSS002FKKW	09774X0027/F2	BSS002FLNW	09783X0025/F2	BSS002FMBV
09771X0076/F2BIS	BSS002FKMP	09781X0007/F	BSS002FLYP	09763X0048/SOURCE	BSS002FHZH
09771X0108/F2	BSS002FKNX	09781X0009/F	BSS002FLYR	09763X0078/F2	BSS002FJAP
09771X0111/F	BSS002FKPA	09781X0020/F	BSS002FLZC	09763X0079/F3	BSS002FJAQ
09771X0123/F4	BSS002FKPN	09781X0015/P219	BSS002FLYX	09763X0243/F	BSS002FJFV
09771X0015/POSTE	BSS002FKKA	09781X0013/F	BSS002FLYV	09763X0245/F	BSS002FJFX
09771X0124/F2	BSS002FKPP	09781X0008/F	BSS002FLYQ	09763X0072/F	BSS002FJAH
09771X0021/ESPLAN	BSS002FKKG	09781X0011/F	BSS002FLYT	09763X0199/F	BSS002FJIDZ
09771X0290/F	BSS002FKTT	09513X0021/GMM1	BSS002ECXW	09763X0090/F	BSS002FJBB
09771X0089/ELVINA	BSS002FKNC	09513X0033/GMM2	BSS002ECYJ	09763X0200/F	BSS002FJEA
09771X0200/F	BSS002FKSR	09773X0099/F	BSS002FLJG	09763X0086/F4	BSS002FJAX
10057X0003/LESP-2	BSS002HQRV	09764X0053/F2	BSS002FJKY	10754X0079/HY	BSS002MDZF
09795X0219/F4	BSS002FMSS	09824X0002/F	BSS002FNVS		



## Annexe 2

### Ouvrages écartés de la base des prélèvements en raison de leur non-influence directe sur les aquifères

Indice BSS	Ancien code BSS	Nature	Département	Commune	LIEU_DIT	X_REF06	Y_REF06	Z_Sol
BSS002EGDY	09545X0004/HY	SOURCE	32	CASTERA-VERDUZAN	PETITE FONTAINE	493289	6303964	110
BSS002EGDZ	09545X0005/HY	SOURCE	32	CASTERA-VERDUZAN	GRANDE-FONTAINE	493289	6303964	110
BSS002FKMX	09771X0084/CAOUTO	SOURCE	40	DAX	LA CAOUTOTE	373016	6298687	7
BSS002FLNZ	09774X0030/S	SOURCE	40	BASTENNES	ARRIMBLAR	394028	6291042	32

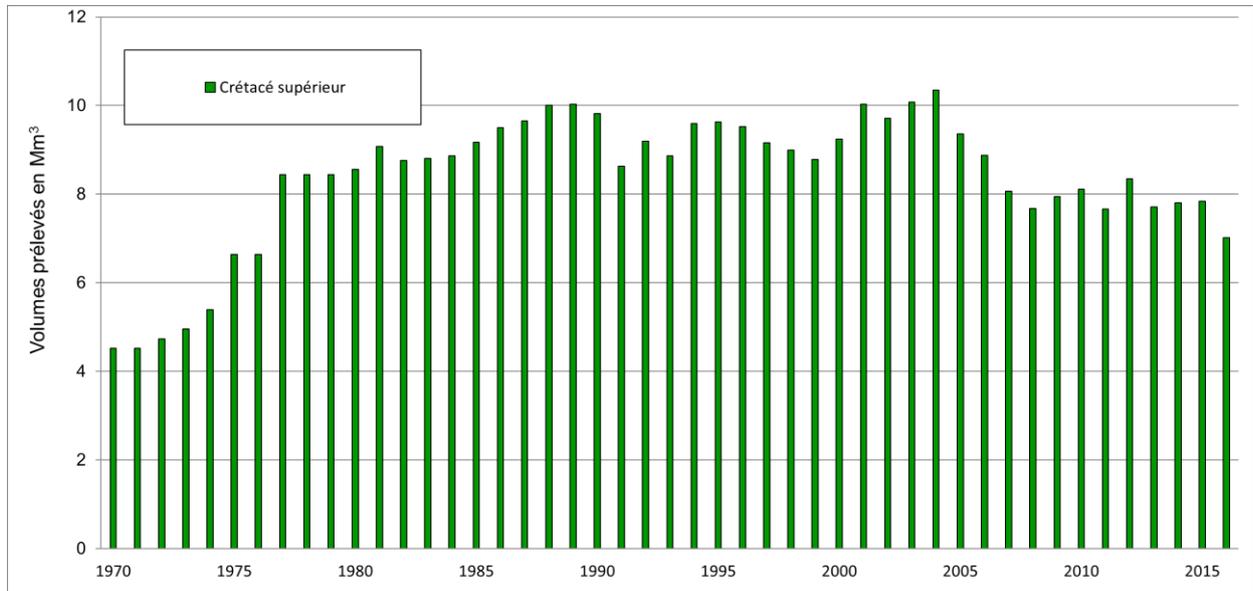
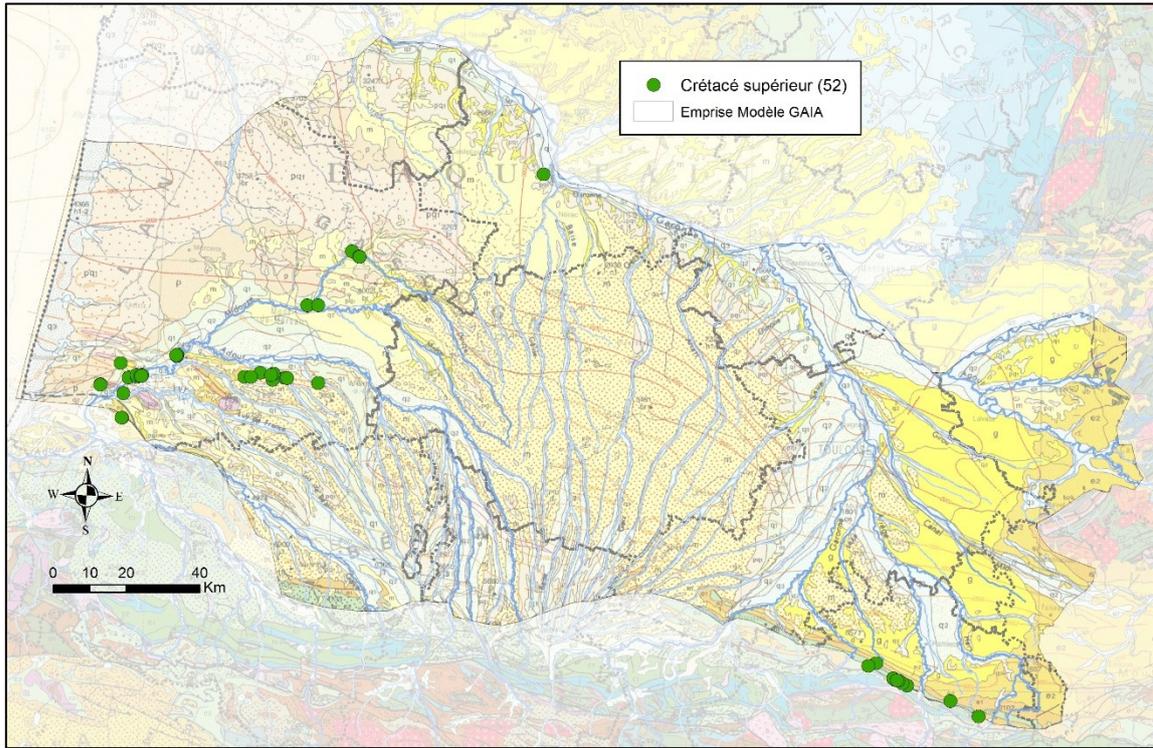


## **Annexe 3**

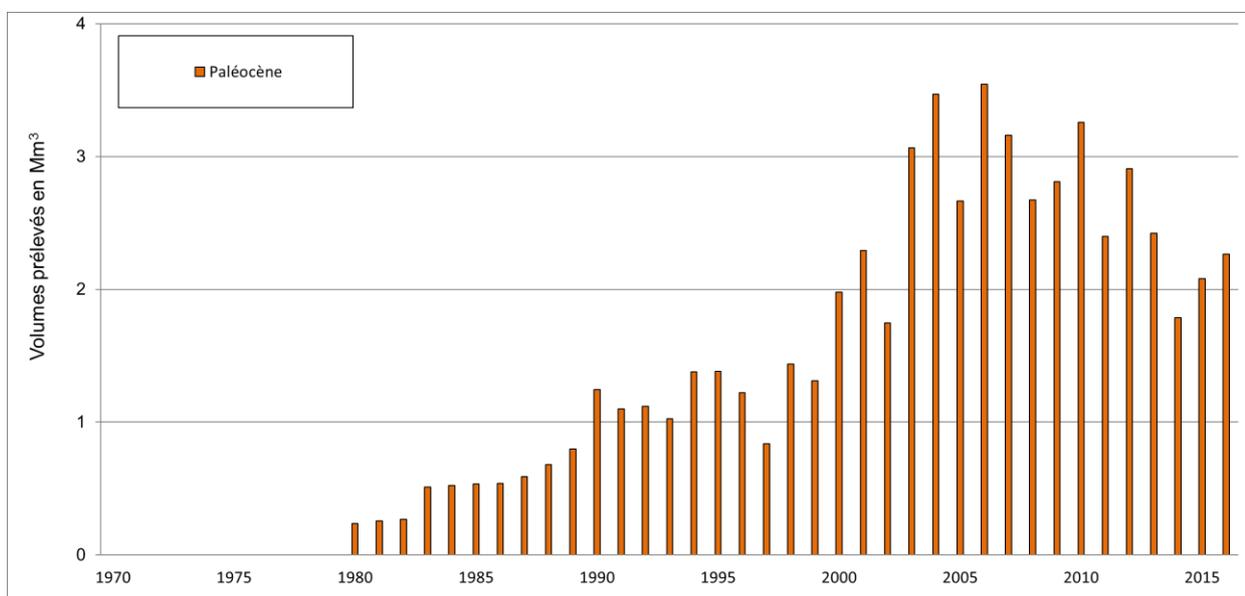
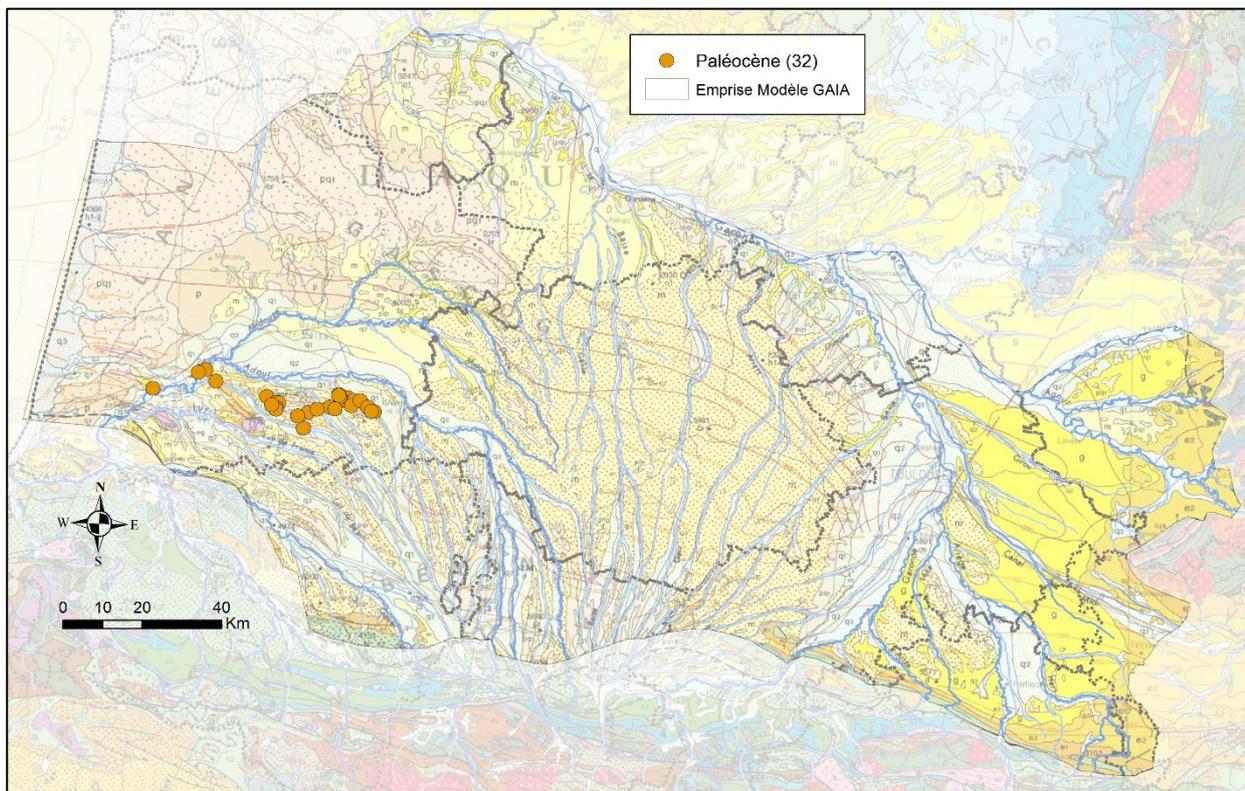
# **Répartition par aquifère des ouvrages de la base des volumes GAÏA & chroniques des prélèvements associés**



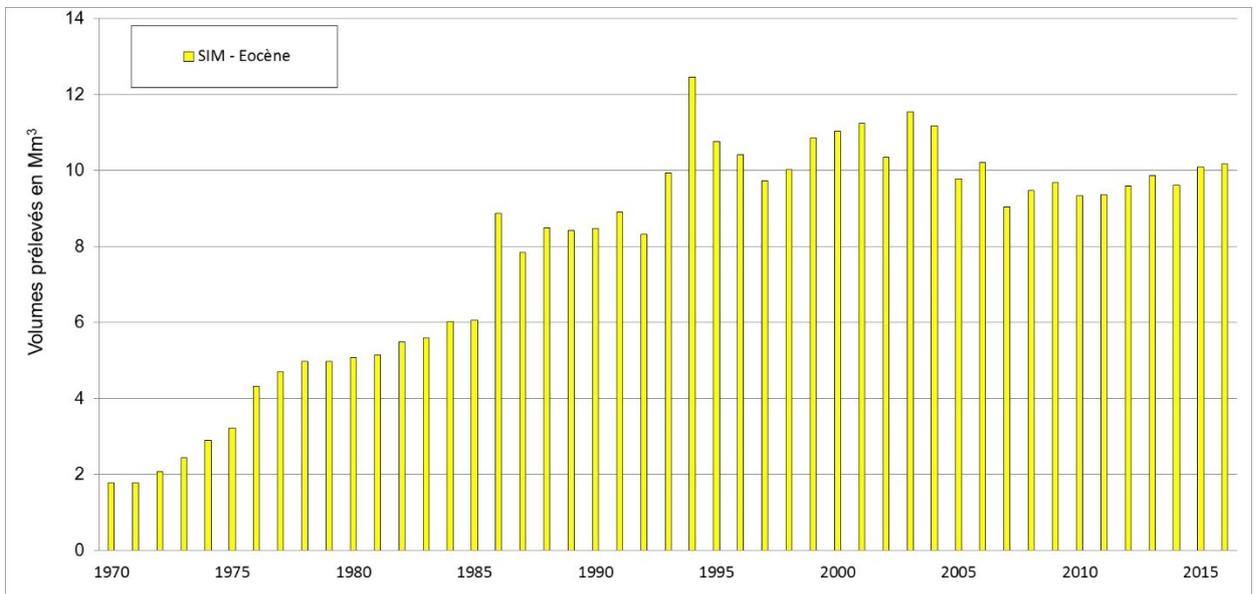
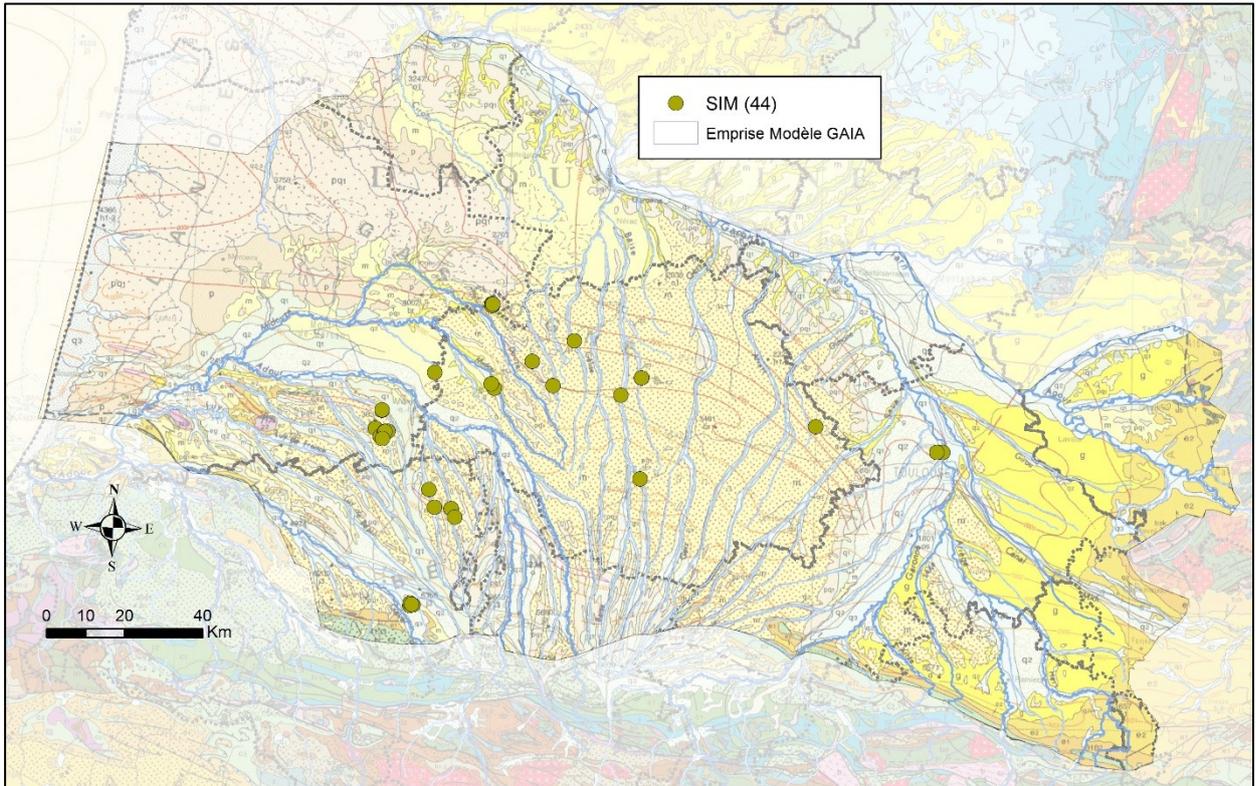
### A. Ouvrages et volumes prélevés dans le Crétacé supérieur



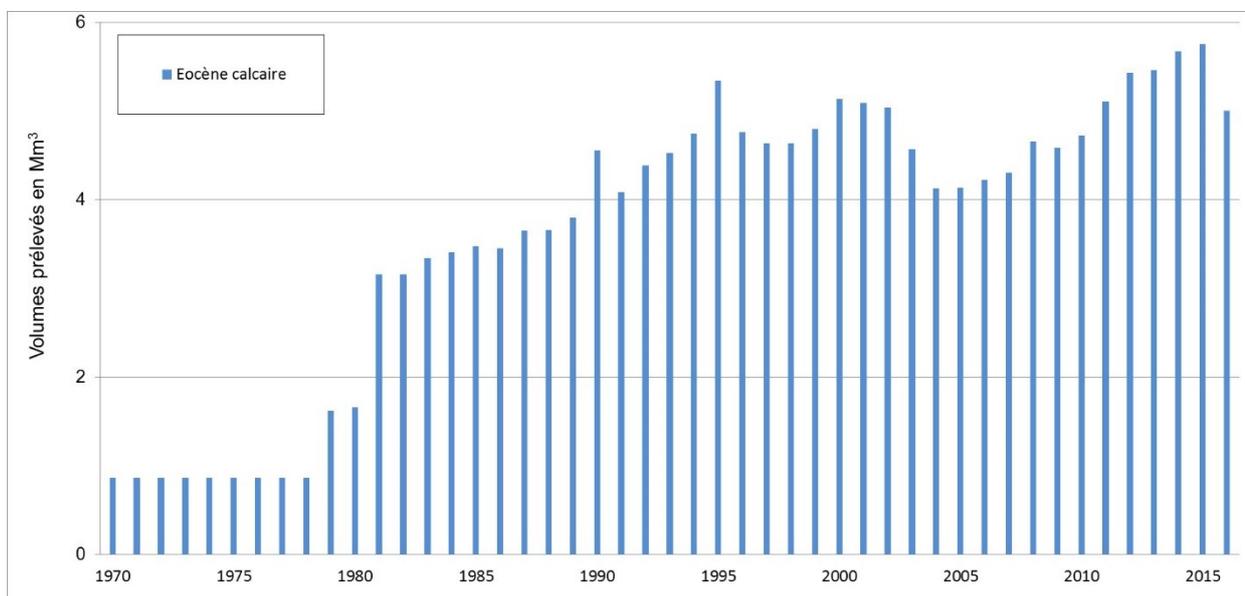
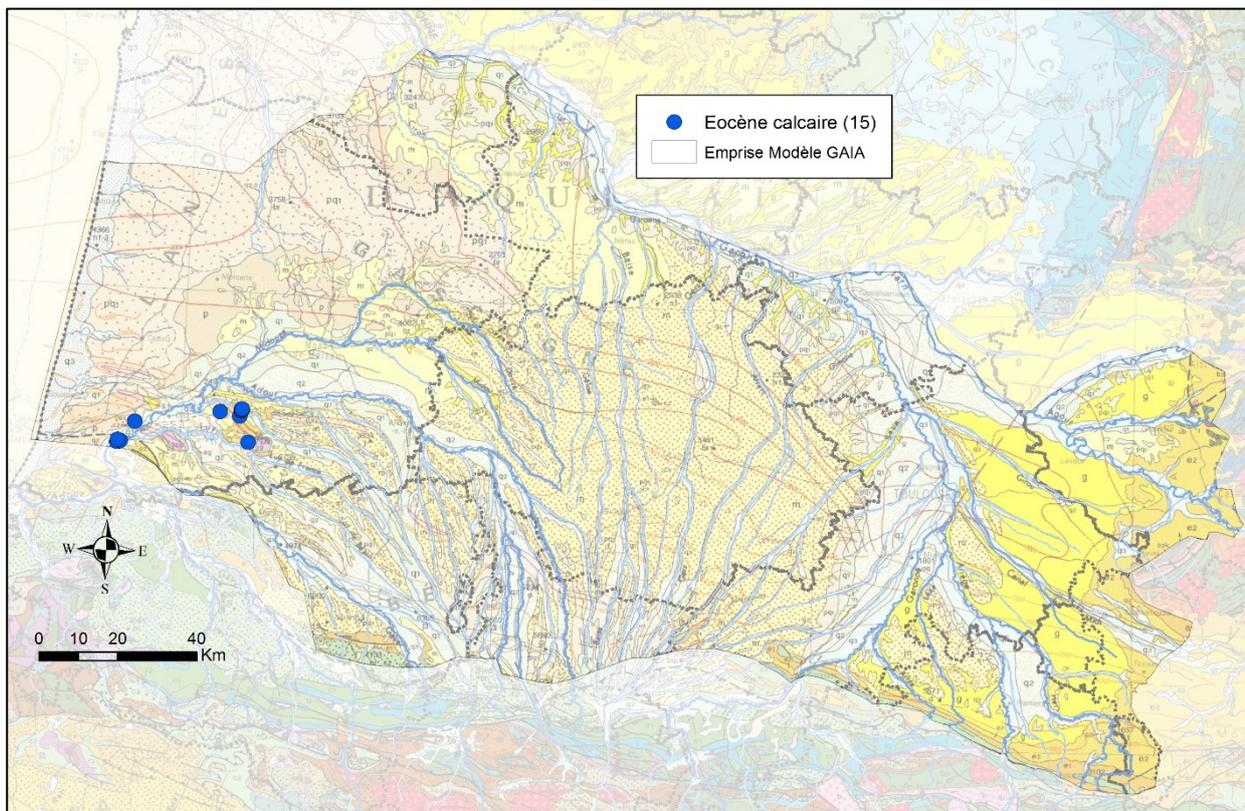
### B. Ouvrages et volumes prélevés dans le Paléocène



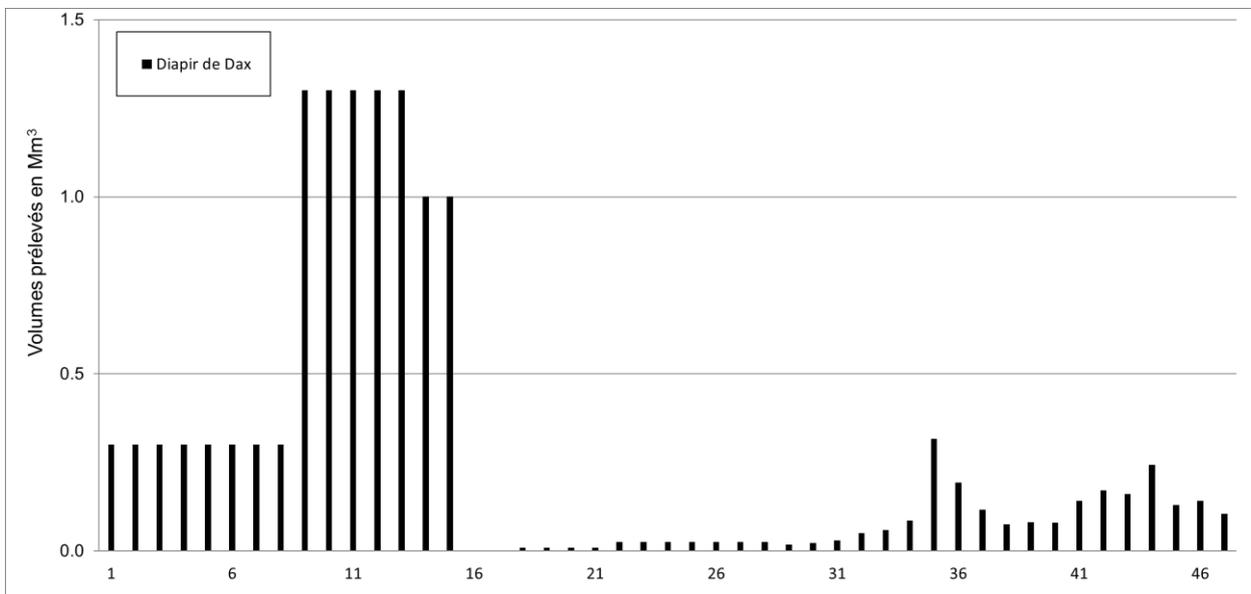
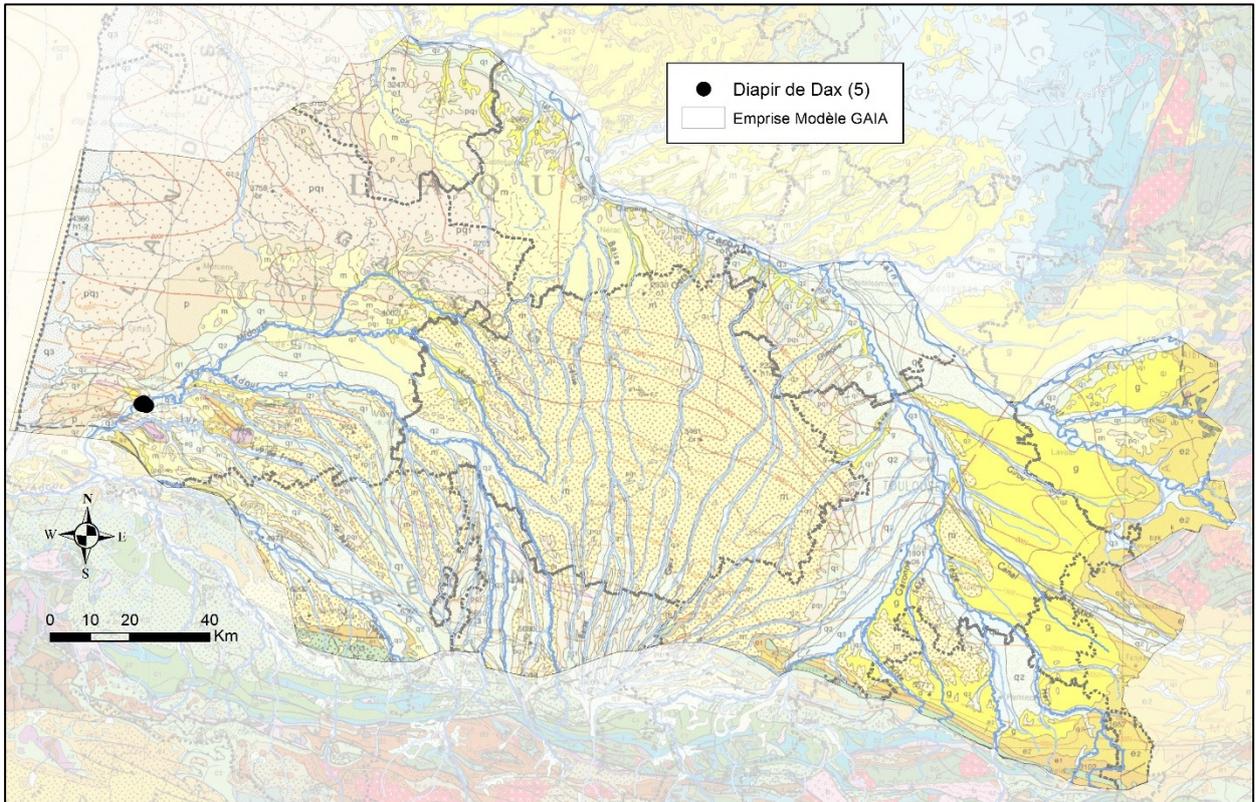
### C. Ouvrages et volumes prélevés dans les Sables Infra-Molassiques



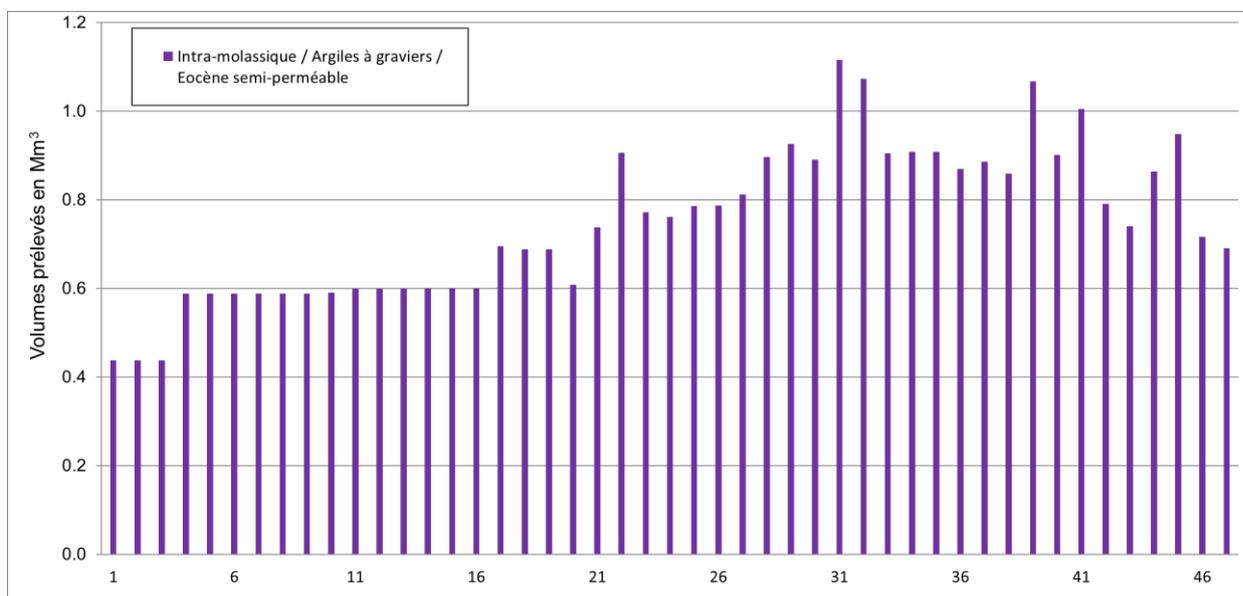
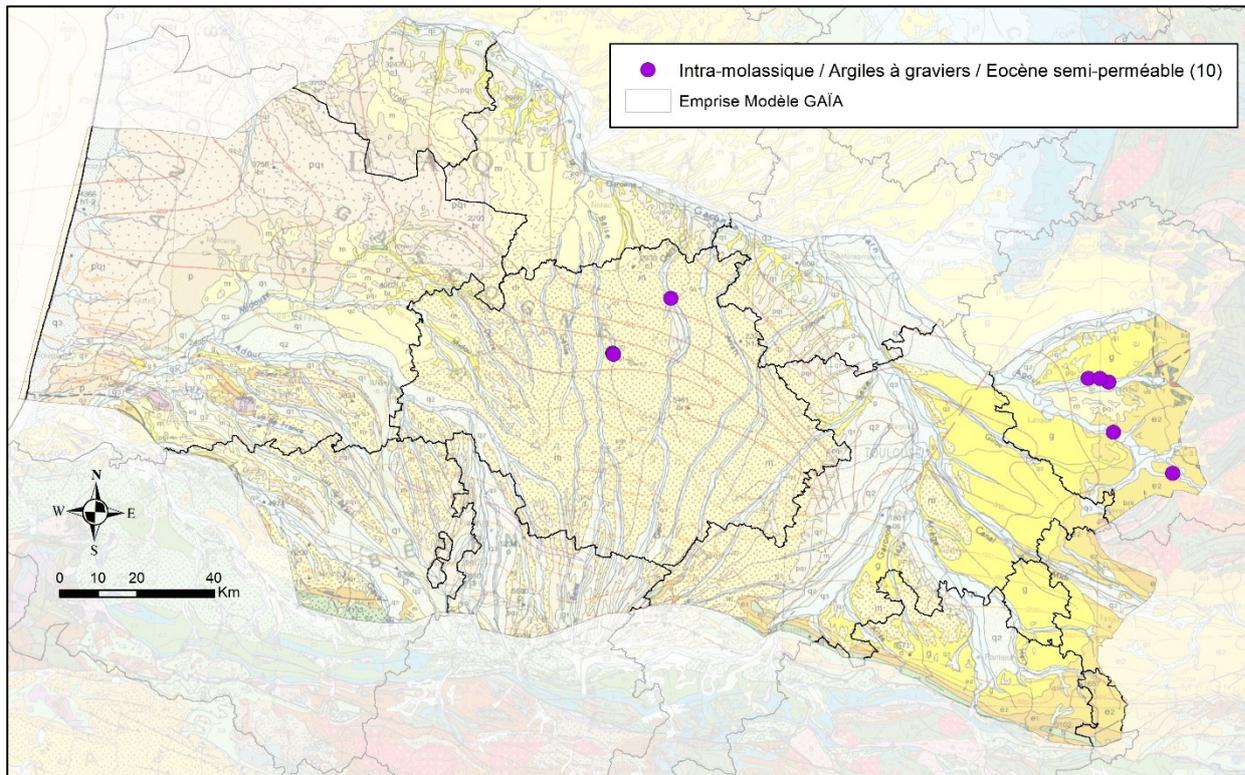
### D. Ouvrages et volumes prélevés dans l'Éocène calcaire



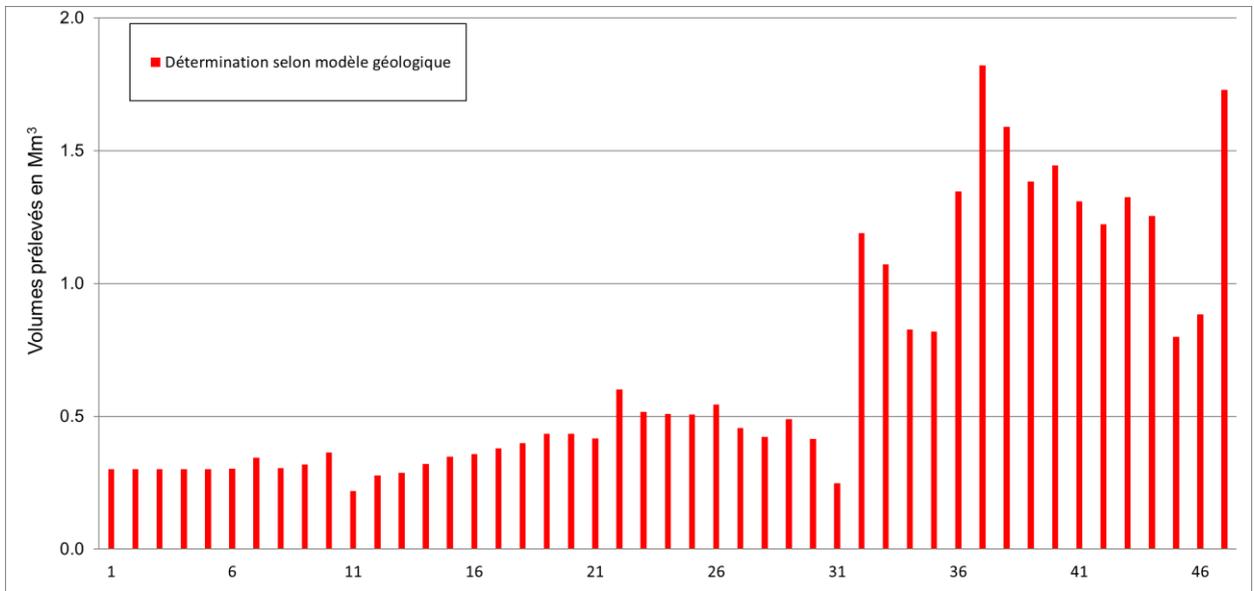
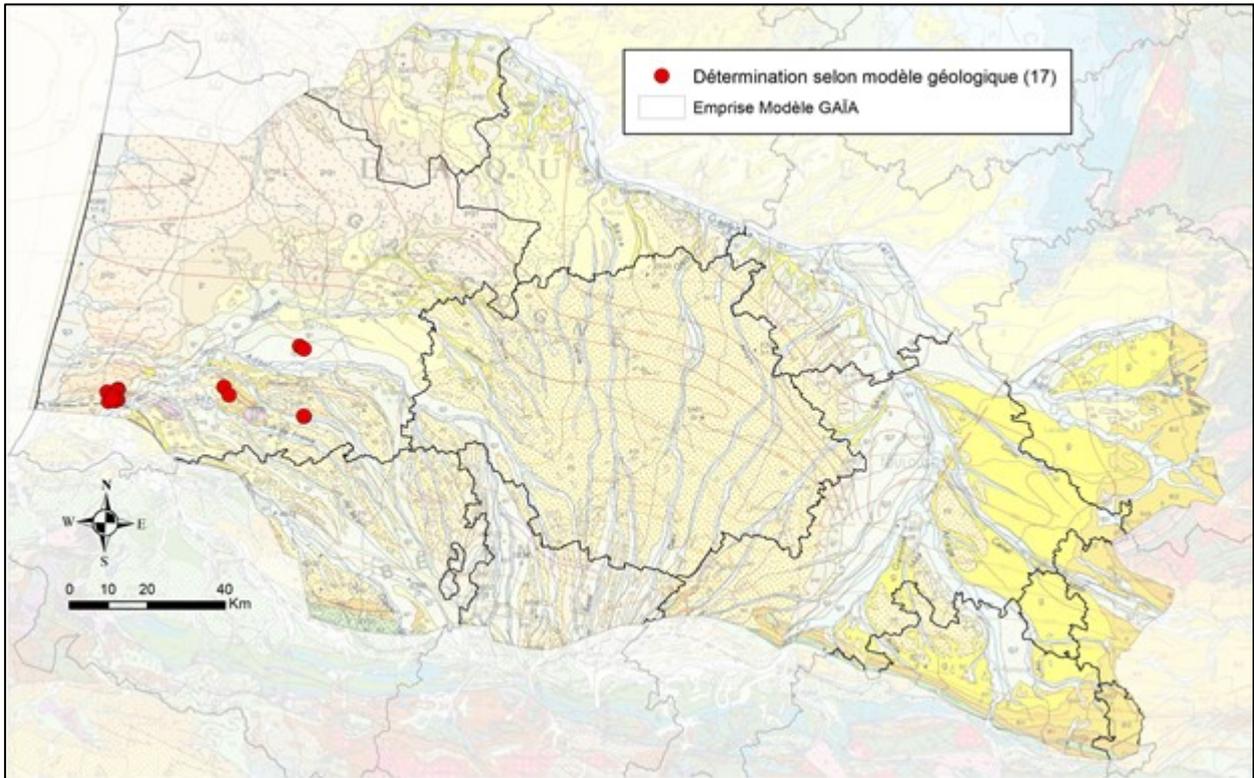
### E. Ouvrages et volumes prélevés dans les ouvrages du Diapir de Dax



F. Ouvrages et volumes prélevés dans les ouvrages captant des formations intra-massiques, les argiles à graviers ou l'Éocène semi-perméable



G. Ouvrages et volumes prélevés dans les ouvrages dont l'aquifère reste à déterminer en s'appuyant sur le modèle géologique





## **Annexe 4**

# **Récapitulatif du nombre de volumes mensuels disponibles par année des 125 ouvrages à usage non agricole**







## **Annexe 5**

### **Liste des 119 ouvrages présélectionnés pour l'établissement des cartes piézométriques mensuelles**



Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique.

INDICE_BSS	DPT	Désignation	X_L93	Y_L93	Prof. (m)	Aquifère capté d'après les premières validation géologiques	Accessibilité de l'ouvrage et des données piézométriques
09266X0004	40	LACQUY 101 à LACQUY	437385	6323348	1230	Sables de Lussagnet	ADES
09268X0035	32	FORAGE DE BARBOTAN-LES-BAINS "TAUREAU" à CAZAUBON	455847	6321584	69	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0037	32	LE MOULUY-LAITERIE à CAZAUBON	456251	6321980	93	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0048	32	STATION THERMALE DE BARBOTAN NOUVEAU GRAND GEYSER "G2" à CAZAUBON	455646	6321456	199	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0050	32	STATION THERMALE DE BARBOTAN - F3 à CAZAUBON	455548	6321717	60	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0059	32	THERMES DE BARBOTAN - BARBOTAN 102 - ST-PIERRE 1 B102 à CAZAUBON	455673	6321201	423	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0061	32	THERMES DE BARBOTAN-BARBOTAN 103 ST PIERRE 2 B103 à CAZAUBON	456673	6321210	425	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0062	32	THERMES BARBOTAN - LOTUS 1 à CAZAUBON	455597	6321637	103	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0063	32	THERMES BARBOTAN - LOTUS 2 à CAZAUBON	455587	6321627	177	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0064	32	BARBOTAN LES BAINS F.4 à CAZAUBON	455579	6321707	45	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09268X0065	32	BARBOTAN LES BAINS F.5 à CAZAUBON	455572	6321709	-	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09526X0049	40	LUSSAGNET GAZ 46 (LUG 46) à LUSSAGNET	438646	6303396	772	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09526X0010	32	LUG57 - Puits de Contrôle à LE HOUGA	440917	6304051	1050	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09527X0017	32	IZA 4 à MAGNAN	449357	6302092	796	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09527X0018	32	IZA 5 à LAULUZAN	447986	6305106	633	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09528X0019	32	IZA 2 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	451880	6304368	1079	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09528X0020	32	IZA 3 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	453010	6302216	774	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09536X0008	32	DEMU à DEMU	471245	6300602	782	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09536X0030	32	BERNDE - F3 à EALIZE	465887	6306850	591	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09541X0021	32	BEAUCOIRE à BEAUCOIRE	490195	6307404	769	Sables de Lussagnet	ADES
09545X0017	32	FORAGE AEP N. 2 - F2 à CASTERA-VERDUZAN	493877	6302648	230	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09546X0022	32	LE MASCA à JEGUN	496874	6302215	58	Sables de Lussagnet	ADES
09784X0010	40	LE BRAC à CASTELNAU-TURSAN	425777	6289617	372	Sables de Lussagnet	ADES
09788X0014	40	PECORADE 101 à GEAUNE	427569	6286964	554	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09788X0015	40	BATS URGON - MOULIN DES PERES à GEAUNE	426982	6287554	476	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
09838A0421	31	PUITS DU RITOURET à BLAGNAC	569479	6283411	1637	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
10052X0006	64	GARLIN - LE PRINCE à BUROSSE-MENDOUSSE	439510	6273937	650	Sables de Lussagnet	Données transmises par TIGF
10052X0037	64	LASSEPE à LALONGUE	440902	6269418	322	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
10053X0002	64	LESPIELLE 1 à LESPIELLE	445151	6268966	415	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
10057X0003	64	LESPIELLE 2 à SIMACOURBE	446049	6266713	510	Sables de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
10082X0001	32	POLASTRON 101 à POLASTRON	528283	6271467	2751	Sables de Lussagnet	ADES
10098A0004	31	MURET 104 à EALINES	568116	6262833	1410	Sables de Lussagnet	ADES
10326X0009	65	CASTELNAU MAGNOAC à CIZOS	496881	6244110	4156	Sables de Lussagnet	ADES
09788X0004	40	LARRIOUCLA / GEAUNE 2 à PECORADE	428205	6288970	487	Sables de Lussagnet	BRGM AQI / ADES
09788X0011	40	DUBASQUE / GEAUNE 3 à PECORADE	428551	6288886	482	Sables de Lussagnet	BRGM AQI
09788X0069	40	GEAUNE 5 à GEAUNE	427918	6288132	490	Sables de Lussagnet	BRGM AQI
09795X0219	40	MARCUSSE / GEAUNE 4 à SORBETS	428943	6288882	535	Sables de Lussagnet	BRGM AQI
10071X0012	32	LAMAZERE 1 - GLA 1 à LAMAZERE	493488	6276564	1750	Sables de Lussagnet	BRGM AQI
09268X0045	32	BARBOTAN-LES-THERMES - GEYSER 1 (G1) à CAZAUBON	455609	6321601	120	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09268X0047	32	BARBOTAN LES BAINS F.1 à CAZAUBON	455767	6321585	58	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09526X0011	40	LUSSAGNET GAZ 9 (LUG 9) à LUSSAGNET	442262	6301724	758	Sables de Lussagnet	Ouvrage sans mesure en raison du risque gaz (ouvrage en alternance en eau et en gaz)
09526X0014	40	LUSSAGNET GAZ 12 (LUG 12) à LUSSAGNET	441119	6301581	756	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09528X0024	32	IZAUTE 12 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	451486	6303334	710	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09545X0007	32	FONTAINE DE COULOM - F4 à CASTERA-VERDUZAN	493877	6302648	213	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09788X0003	40	GEAUNE PECORADE 1 à PECORADE	428220	6288842	423	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09814X0002	32	AUCH 2 (AC) à MONTAUT-LES-CRENEAUX	512695	6289378	3487	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09838B0203	31	PUITS DU RAMIER, UTILISE POUR LA PISCINE à BLAGNAC	570980	6283388	1494	Sables de Lussagnet	Ouvrage rebouché
09545X0018	32	PLEHAUT à SAINT-JEAN-POUTGE	488613	6298146	565	Sables de Lussagnet et Danien	Données transmises par Exploitant
09824X0002	32	St CRICQ à THOUX	538466	6289992	1035	Sables de Lussagnet et Danien	ADES
09526X0225	32	LUSSAGNET GAZ 68 (LUG 68) à LE HOUGA	442059	6300399	895	Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites	Données transmises par TIGF
09528X0002	32	NOGARO 1 à NOGARO	455400	6301133	928	Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites	Données transmises par TIGF
09528X0026	32	NOGARO 2 à NOGARO	456219	6299923	1098	Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites	Données transmises par TIGF
09526X0010	40	LUSSAGNET GAZ 8 (LUG 8) à LUSSAGNET	439860	6303724	675	Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites	Ouvrage rebouché
10057X0001	64	LEMBEYE1 à SIMACOURBE	446044	6266758	3316	Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites	Données transmises par Exploitant
09268X0049	32	BARBOTAN LES BAINS F.2 à CAZAUBON	455648	6321686	70	Grès à Nummulites ?	Données transmises par Exploitant
09268X0055	32	BARBOTAN LES THERMES FORAGE PROFOND DE L'UBY à CAZAUBON	454859	6320774	596	Grès à Nummulites ?	Données transmises par Exploitant
10306X0033	64	LES BORDES ANGAIS 2 à BORDES	435373	6244263	101	Grès à Nummulites	Données transmises par Exploitant
10306X0034	64	LES BORDES ANGAIS 3 à BORDES	434888	6244561	106	Grès à Nummulites	Données transmises par Exploitant / ADES
10306X0035	64	LES BORDES ANGAIS 4 à BORDES	435039	6244449	101	Grès à Nummulites	Données transmises par Exploitant
10306X0036	64	LES BORDES ANGAIS 1 à BORDES	434331	6244129	85	Grès à Nummulites	Données transmises par Exploitant
09014X0013	47	MARCHEPIN à BUZET-SUR-BAISE	483458	6353974	500	Grès à Nummulites et Turonien	ADES
09784X0031	40	ELBO2 à EUGÉNIE-LES-BAINS	428128	6294272	117	Grès à Nummulites, Calcaire paléocène?	Données transmises par TIGF
09526X0089	40	LUSSAGNET GAZ 69 (LUG 69) à CAZERES-SUR-L'ADOUR	438758	6301114	935	Niveau sableux en base molasse + Sable de Lussagnet et Grès à Nummulites	Données transmises par TIGF
09287X0023	32	MOULIN DE REPASSAC à LECTOURE	508198	6318489	1021	Zone peu perméable - équivalent temps du sable de Lussagnet	Données transmises par Exploitant

Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique.

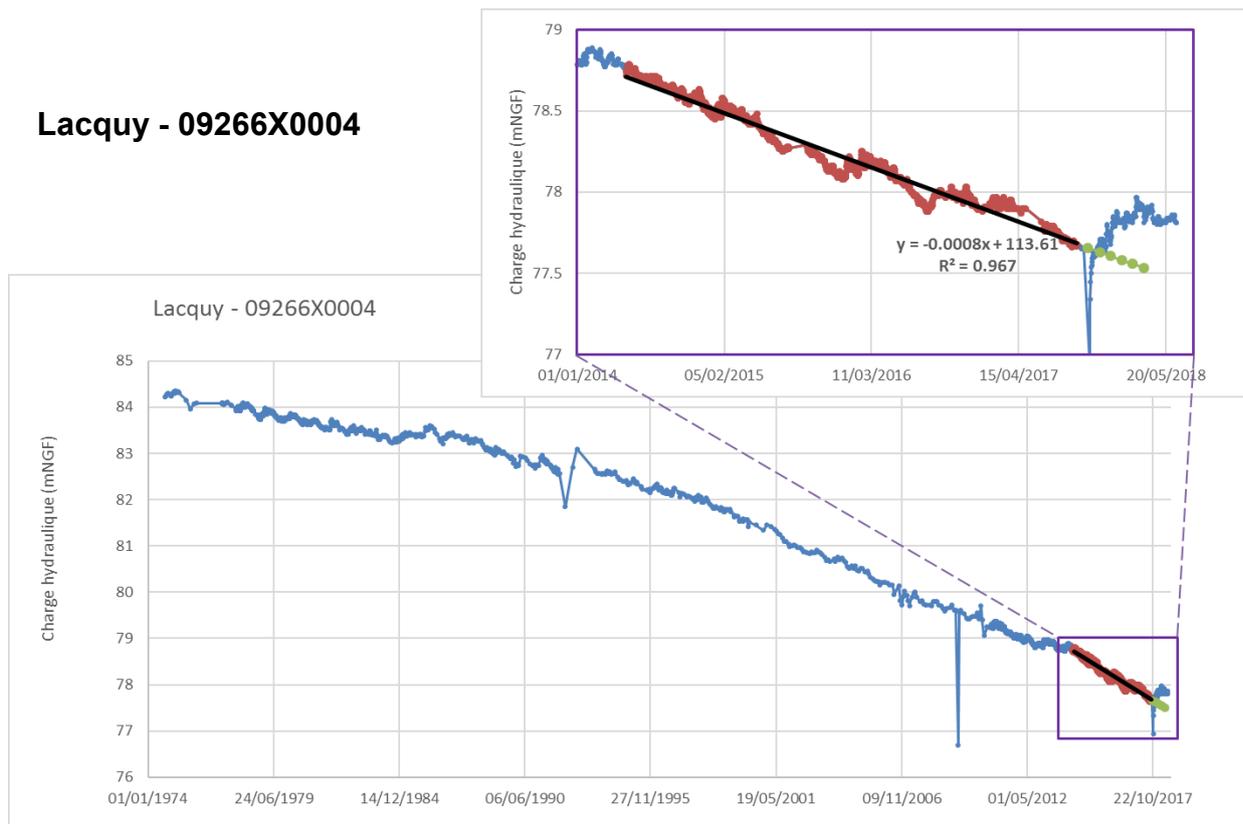
INDICE_BSS	DPT	Désignation	X_L93	Y_L93	Prof. (m)	Aquifère capté d'après les premières validation géologiques	Accessibilité de l'ouvrage et des données piézométriques
09293X0123	82	AUVILLAR à SAINT-MICHEL	533877	6330884	579	Zone peu perméable - équivalent temps du sable de Lussagnet	ADES
09533X0016	32	GONDRAIN à GONDRAIN	476702	6312152	728	Zone peu perméable - équivalent temps du sable de Lussagnet	Données transmises par Exploitant
09866X0074	81	VALDURENQUE à VALDURENQUE	644131	6273942	129	Argiles à graviers	ADES
10122X0055	81	LABRUGUIÈRE à LABRUGUIÈRE	642192	6272488	177	Argiles à graviers	ADES
09857X0104	81	STATION DE POMPAGE à GUITALENS-L'ALBAREDE	622992	6283542	471	Argiles à graviers	BRGM MPY
09545X0019	32	ETABLISSEMENT THERMAL -CV1 à CASTERA-VERDUZAN	493269	6303959	64	Formations molassiques?	Données transmises par Exploitant
09784X0025	40	ETABLISSEMENT THERMAL (EF2) à EUGÉNIE-LES-BAINS	427434	6294302	90	Formations molassiques?	Données transmises par Exploitant
09586X0008	81	FORAGE DE L'USINE KP1 à GRAULHET	616238	6297553	325	Formations molassiques	BRGM MPY
09587X0002	81	FORAGE ETABLISSEMENT WEISHARDT (3) à GRAULHET	621549	6296649	550	Formations molassiques	BRGM MPY
09587X0029	81	FORAGE DE L'USINE DE REY à GRAULHET	619293	6297661	334	Formations molassiques	BRGM MPY / ADES
09545X0001	32	ETABLISSEMENT THERMAL F1 à CASTERA-VERDUZAN	493269	6303954	51	Formations molassiques?	Ouvrage rebouché
09587X0001	81	ET. WEISHARDT (N° 1) à GRAULHET	621465	6296773	474	Formations molassiques?	Ouvrage inaccessible
09587X0003	81	FORAGE ETABLISSEMENT WEISHARDT (2) à GRAULHET	621546	6296666	270	Formations molassiques	Ouvrage inaccessible
09784X0019	40	ELB01 à EUGÉNIE-LES-BAINS	427993	6294229	93	Formations molassiques	Ouvrage rebouché
10315X0069	65	FORAGE GEOTHERMIQUE DE TARBES (TAGTH.1) à TARBES	460170	6240415	1855	Formations molassiques ???	Ouvrage rebouché
09783X0018	40	TAULADE 1 à SARRAZIET	418219	6294992	110	à déterminer	ADES
09783X0022	40	BAHUS JUZANX à MONTSOUÉ	419772	6297387	67	à déterminer	Conseil Départemental des Landes
09781X0005	40	ABBAYE DE MAYLIS à SAINT-AUBIN	403207	6295452	118	à déterminer	BRGM AQI
09783X0002	40	LABARTHE à MONTSOUÉ	419196	6298596	75	à déterminer	BRGM AQI
09783X0017	40	CD 52 à SARRAZIET	416906	6295462	160	à déterminer	BRGM AQI
09783X0023	40	MENJOUET à FARGUES	419659	6298264	72	à déterminer	BRGM AQI
09783X0032	40	LES BARTHES DU BAHUS à MONTSOUÉ	419469	6297913	70	à déterminer	BRGM AQI
09783X0033	40	LABARTHE à MONTSOUÉ	419195	6298356	120	à déterminer	BRGM AQI
09784X0030	40	CHICOY/FRECO à EUGÉNIE-LES-BAINS	426374	6295769	120	à déterminer	BRGM AQI
09784X0035	40	LE PERRÉ à FARGUES	421924	6296632	140	à déterminer	BRGM AQI
09783X0016	40	FABIAN à SARRAZIET	419146	6296282	142	à déterminer	Ouvrage rebouché
09783X0025	40	TAULADE 2 à SARRAZIET	418220	6294999	107	à déterminer	Pas de tube guide-sonde et recouvert d'une plaque.
09784X0034	40	LASMOULÈRES à EUGÉNIE-LES-BAINS	426811	6295277	67	à déterminer	Ouvrage rebouché
09784X0037	40	COUSSO à FARGUES	421759	6297665	136	à déterminer	Ouvrage inaccessible
09784X0039	40	MAISON ROUGE 1 (MR1) à EUGÉNIE-LES-BAINS	427715	6294497	-	à déterminer	Ouvrage inaccessible
09784X0040	40	MAISON ROUGE 2 (MR2) à EUGÉNIE-LES-BAINS	427733	6294482	-	à déterminer	Ouvrage inaccessible
09784X0024	40	ETABLISSEMENT THERMAL (EF1) à EUGÉNIE-LES-BAINS	427408	6294337	88	Calcaire Oligocène, Plateforme calcaire bartonnienne et calcaire paléocène?	Données transmises par Exploitant
10121X0013	81	FORAGE DE MASCARENS à NAVES	638128	6272822	302	Calcaires de Castres et argiles à graviers	Ouvrage rebouché
09784X0036	40	FORAGE AQUA ALIENOR à EUGÉNIE-LES-BAINS	428187	6294238	132	Calcaires de Lapêche (Marnes et calcaires de l'Eocène inférieur à moyen)	Données transmises par Exploitant
09527X0021	32	IZAUTE 101 à LAUJUZAN	450043	6303736	752	Danien?	Données transmises par TIGF
09784X0029	40	CHICOY à EUGÉNIE-LES-BAINS	426593	6295514	84	Flysch et calcaires intercalés du Paléocène et de l'Yprésien inf.	ADES
10078X0001	32	PUYMAURIN à MONBARDON	514801	6256862	3821.8	Flysch et calcaires intercalés du Paléocène et de l'Yprésien inf.	ADES
09784X0020	40	MOULIN DE BOUGNÈRES à EUGÉNIE-LES-BAINS	426764	6295198	67	Flysch et calcaires intercalés du Paléocène et de l'Yprésien inf.	BRGM AQI
09784X0011	40	STE FRANÇAISE - EAUX THERMALES à EUGÉNIE-LES-BAINS	427414	6294292	272	Marnes et calcaires de l'Eocène inférieur à moyen ?	Ouvrage rebouché
09784X0018	40	CHRISTINE-MARIE à EUGÉNIE-LES-BAINS	427418	6294328	260	Marnes et calcaires de l'Eocène inférieur à moyen et Plateforme carbonatée du Danien/Sélandien?	Données transmises par Exploitant
10336X0002	31	SAINT-ANDRÉ à SAINT-ANDRÉ	524490	6245706	4202	Plateforme carbonatée du Danien/Sélandien?	ADES
09782X0019	40	LANNEBOURDES à SAINTE-COLOMBE	411431	6294079	105	Paléocène	BRGM AQI / Points complémentaires sur la structure d'Audignon
09784X0021	40	GOUILLARD à FARGUES	422403	6295790	144	Paléocène	
09784X0022	40	GARDELI à FARGUES	422904	6297087	101	Paléocène	
09784X0028	40	LA VIOLETTE à BUANES	424576	6297060	58	Paléocène	
09782X0027	40	CASSOURET à HORSARRIEU	408754	6293154	601	Danien, Maastrichtien, Yprésien inf.	
09783X0038	40	PONT DU BARON - BET OUEST à SARRAZIET	418049	6296057	45	Paléocène	
09782X0020	40	LARTIGUE / LAGRABETTE à SAINTE-COLOMBE	413748	6294868	91	Paléocène	
09782X0011	40	DAOURAT à EYRES-MONCUBE	404054	6296549	126	Campanien + Céno-Turonien	
09782X0012	40	DAOURAT à EYRES-MONCUBE	412866	6298032	58	Turonien	
09781X0006	40	LAGORCE à SAINT-AUBIN	401783	6298290	60	Crétacé supérieur	
09781X0008	40	LAHEOURÈRE à MONTAUT	406089	6299378	101	Crétacé supérieur	
09781X0007	40	SARTOU à SAINT-AUBIN	400939	6297997	80	Paléocène	
09781X0009	40	ST GERMAIN (MOULIN) à MAYLIS	403250	6296711	80	Paléocène	
09781X0020	40	LAGOUAUGUE à MAYLIS	404054	6296549	48	Paléocène	

## **Annexe 6**

### **Piézométries reconstituées d'après la tendance initiale et calcul des écarts avec les mesures enregistrées dans les forages de Lacquy et Saint- Cricq**

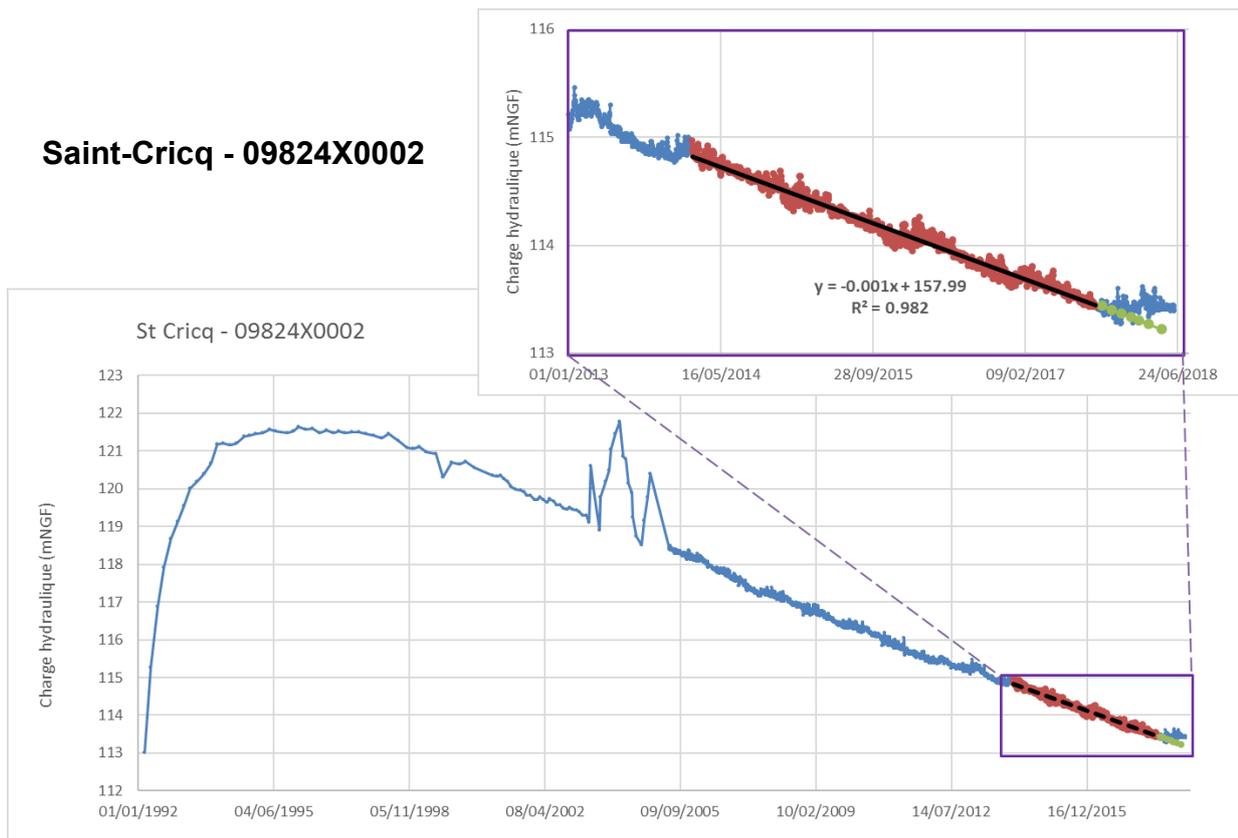


### Lacquy - 09266X0004



DATES	PIEZOMETRIE MESUREE (MNGF)	PIEZOMETRIE ESTIMEE D'APRES TENDANCE (MNGF)	ECART (M)
21/09/2017	77.68	Pas de changement de dynamique	
19/10/2017	-	77.66	-
22/11/2017	77.7	77.63	0.07
22/12/2017	77.71	77.61	0.10
22/01/2018	77.81	77.58	0.23
19/02/2018	77.83	77.56	0.27
22/03/2018	77.81	77.53	0.28
03/05/2018	77.82	77.50	0.32

### Saint-Cricq - 09824X0002



DATES	PIEZOMETRIE MESUREE (MNGF)	PIEZOMETRIE ESTIMEE D'APRES TENDANCE (MNGF)	ECART (M)
21/09/2017	113.47	Pas de changement de dynamique	
19/10/2017	113.49	113.44	0.05
22/11/2017	113.45	113.40	0.05
22/12/2017	113.28	113.37	-0.09
22/01/2018	113.38	113.33	0.05
19/02/2018	113.42	113.30	0.12
22/03/2018	113.35	113.27	0.08
03/05/2018	113.43	113.22	0.21

## **Annexe 7**

### **Tableau des mesures piézométriques corrigées des effets de température et/ou de densité (selon la minéralisation totale)**



Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéo-chimique.

INDICE BSS	Nom et commune	Type de valeur piézométrique (mNGF)	Sept. 2017	Oct. 2017	Nov. 2017	Déc. 2017	Janv. 2018	Fév. 2018	Mars 2018	Avril 2018	Correction température	Correction salinité
09788X0004	LARRIOUCLA / GEAUNE 2 à PECORADE	Mesurée Corrigée	107.71 106.18	110.09 108.56	112.75 111.21	109.46 107.93	105.47 103.95	99.64 98.13	90.68 89.19	80.20 78.73	32 °C	
09788X0011	DUBASQUE / GEAUNE 3 à PECORADE	Mesurée Corrigée	108.71 107.29	110.57 109.15	111.89 111.56	109.45 109.12	105.41 105.08	99.44 99.11	89.68 89.35		31,5 °C	
09795X00219	MARCUSSE / GEAUNE 4 à SORBETS	Mesurée Corrigée	108.84 106.73	111.33 109.21	112.81 110.69	110.06 107.94		99.49 87.51	89.57 78.93	80.96 x	35 °C	
09788X0069	GEAUNE 5 à GEAUNE	Mesurée Corrigée							90.44 88.45	81.68 79.72	34 °C	
09788X0014	PECORADE 101 à GEAUNE	Mesurée Corrigée	106.50 106.05	109.18 108.73	110.80 110.34	108.81 108.35	104.56 104.10	98.72 98.27			Pas de donnée disponible : 34 °C retenue (par analogie avec forages proches)	
09788X0015	BATS URGON - MOULIN DES PERES à GEAUNE	Mesurée Corrigée	108.70 108.23	111.43 110.96	113.22 112.75	111.25 110.78	107.04 106.57	101.23 100.76	92.41 91.93		33,8 °C	
10071X0012	LAMAZERE 1 - GLA 1 à LAMAZERE	Mesurée Corrigée	104.04 104.98	104.89 105.84	106.09 107.04	106.82 107.77	107.62 108.58	107.85 108.81	107.44 108.40	105.93 106.88	50 °C	
09287X0023	MOULIN DE REPASSAC à LECTOURE	Mesurée Corrigée	5.59 1.52	5.56 1.49	5.52 1.45	5.48 1.41	5.44 1.37	5.41 1.34	5.37 1.30	5.32 1.25	42 °C	2107 mg/l
09838A0421	PUITS DU RITOURET à BIAGNAC	Mesurée Corrigée	121.41 110.90	55 °C	1230 mg/l							
09266X0004	LACQUY 101 à LACQUY	Mesurée Corrigée	77.68 76.71	77.66 76.68	77.63 76.66	77.61 76.63	77.58 76.61	77.56 76.58	77.53 76.56	77.50 76.53	47,3 °C en fond de forage (Diagraphie 12/2017)	1000 mg/l
09268X0035	FORAGE DE "TAUREAU" à CAZUBON	Mesurée Corrigée	95.47 95.37	97.57 97.46	99.22 99.12	101.57 101.45	102.52 102.41	101.87 101.76	98.76 98.66	93.42 93.33	34,8 °C	
09268X0048	NOUVEAU GRAND GEYSER "G2" à CAZUBON	Mesurée Corrigée	99.80 99.42	98.26 97.88	101.31 100.93	103.34 102.95	101.74 101.35	97.44 97.05	93.60 93.23		37 °C	
09268X0055	UBY à CAZUBON	Mesurée Corrigée	123.85 123.39	125.65 125.18	125.15 124.68	113.35 112.88	103.95 103.47	93.60 93.12	75.05 74.55	65.65 65.15	34,8 °C	
09268X0059	BARBOTAN 102 - ST-PIERRE 1 B102 à CAZUBON	Mesurée Corrigée	101.50 99.23	103.00 100.73	103.41 101.14	105.00 102.72	103.90 101.62	102.10 99.82	97.10 94.84	92.95 90.72	38,4 °C	
09268X0061	BARBOTAN 103 ST PIERRE 2 B103 à CAZUBON	Mesurée Corrigée	99.59 97.35	101.79 99.54	101.94 99.69	103.30 101.05	102.20 99.95	100.39 98.15	95.19 92.97	91.10 88.89	38,2 °C	
10098A0004	MURET 104 à EAUNES	Mesurée Corrigée	160.52 156.69	160.56 156.73	160.53 156.70	160.36 156.53	160.47 156.64	160.53 156.70	160.57 156.74	160.53 156.70	56°C d'après gradient géothermique moyen	
09293X0123	AUVILLAR à SAINT-MICHEL	Mesurée Corrigée	16.87 17.48	16.89 17.50	16.84 17.45	16.74 17.36	16.89 17.50	16.89 17.50	16.88 17.49	16.90 17.51	35,5 °C	3450 mg/l (donnée de résistivité et de résidu sec)
09784X0010	LE BRAC à CASTELNAU-TURSAN	Mesurée Corrigée	107.01 106.78	110.82 110.59	111.58 111.35	109.71 109.48	106.25 106.02	100.85 100.62	92.50 92.27	83.39 83.16	29,1 °C	
09541X0021	BEAUCAIRE à BEAUCAIRE	Mesurée Corrigée	4.45 4.75	4.44 4.74	4.38 4.68	4.21 4.51	4.29 4.59	4.31 4.61	4.24 4.54	4.24 4.54	Pas de donnée disponible : Température retenue : 34 °C (gradient géothermique)	1470 mg/l
09824X0002	St CRICQ à THOUX	Mesurée Corrigée	113.47 111.72	113.44 111.69	113.40 111.65	113.37 111.61	113.33 111.58	113.30 111.55	113.27 111.51	113.22 111.47	46 °C	
09526X0049	LUSSAGNET GAZ 46 (LUG 46) à LUSSAGNET	Mesurée Corrigée	162.67 161.97	155.24 154.53	138.89 138.17	105.20 104.45	81.60 80.84	27.79 27.00	-8.63 -9.43	20.45 19.66	Pas de donnée disponible : la température du 09526X00210 (forage le plus proche disposant de données) correspond au gradient géothermique. On reprend ce gradient géothermique. Température retenue : 38 °C	
09526X00210	LUGS7 - PUITS DE CONTRÔLE à LE HOUGA	Mesurée Corrigée	151.31 151.06	147.60 147.35	133.30 133.02	103.43 103.09	82.19 81.81	34.04 33.57	10.49 9.99	36.59 36.13	46,2 °C	
09526X00225	LUSSAGNET GAZ 68 (LUG 68) à LE HOUGA	Mesurée Corrigée	147.25 145.95	141.90 140.59	125.42 124.10	103.79 102.46	78.86 77.53	42.09 40.75	23.28 21.94	44.49 43.15	Pas de donnée disponible : la température du 09526X00210 (forage le plus proche disposant de données) correspond au gradient géothermique. On reprend ce gradient géothermique pour évaluer la correction de température. Température retenue : 43 °C	
09526X00089	LUSSAGNET GAZ 69 (LUG 69) à CAZERES-SUR-L'ADOUR	Mesurée Corrigée	147.25 145.99	136.90 135.63	123.65 122.37	97.80 96.50	80.10 80.79	47.97 46.65	26.02 24.69	44.25 42.92		
09527X0017	IZA 4 à MAGNAN	Mesurée Corrigée	150.10 150.23	152.65 152.78	123.53 123.61	95.83 95.85	79.23 79.23	44.50 44.44	15.72 15.61	40.27 40.20	40 °C	
09527X0018	IZA 5 à LAULIZAN	Mesurée Corrigée	150.52 149.87	153.07 152.42	124.02 123.36	103.13 102.46	78.42 77.73	40.75 40.06	11.07 10.38	36.00 35.31	36,8 °C	
09528X0019	IZA 2 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	Mesurée Corrigée	147.33 147.90	150.90 151.48	122.29 122.79	95.96 96.39	79.01 79.39	47.88 48.18	20.06 20.29	42.23 42.52	41,4 °C	
09528X0020	IZA 3 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	Mesurée Corrigée	144.75 144.14	148.20 147.59	125.45 124.82	101.98 101.33	86.76 86.10	59.82 59.14	33.92 33.23	47.91 47.23	Pas de donnée disponible : Prise en compte du gradient géothermique. Température retenue : 37 °C	
09528X0002	NOGARO 1 à NOGARO	Mesurée Corrigée	137.21 134.96	139.56 137.32	127.72 125.48	108.08 105.84	96.05 93.82	72.79 70.56	49.41 47.19	42.47 46.62	48,8 °C	
09528X0026	NOGARO 2 à NOGARO	Mesurée Corrigée	142.16 131.58	143.27 132.70	134.24 123.72	117.30 106.89	102.90 92.60	80.79 70.64	57.41 47.43	53.36 47.95	51,2 °C	
09536X0008	DEMU à DEMU	Mesurée Corrigée	123.54 114.76	125.99 117.18	127.14 118.32	122.70 113.93	117.02 108.30	109.91 101.27	97.93 89.41	86.03 77.63	54,6 °C	
09536X0030	BÉRNEDE - F3 à EAUZE	Mesurée Corrigée	122.65 120.01	127.40 124.75	126.49 123.84	113.62 111.01	103.23 100.66	90.37 87.84	67.47 65.03	58.76 56.35	37 °C	
09545X0017	FORAGE AEP N. 2 - F2 à CASTERA-VERDUZAN	Mesurée Corrigée	113.22 112.48	113.72 112.98	113.62 112.88	113.51 112.77	113.26 112.52	113.38 112.64	113.30 112.56	113.19 112.45	30,5 °C	
10052X0006	GARLIN - LE PRINCE à BURASSE-MENDOUSSE	Mesurée Corrigée	106.24 104.69	110.30 108.76	113.45 111.90	113.57 112.02	111.00 109.45	106.67 105.13	100.08 98.55	89.91 88.39	31 °C	
09533X0016	GONDRIN à GONDRIN	Mesurée Corrigée	11.08 9.87	42,2 °C								
09545X0018	PLEHAUT à SAINT-JEAN-POUTGE	Mesurée Corrigée	99.01 98.02	100.26 99.27	101.16 100.17	101.71 100.72	102.68 101.69	102.10 101.11	101.50 100.51	99.34 98.35	28,1 °C	
10057X0003	LESPIELLE 2 à SIMACOURBE	Mesurée Corrigée	116.30 115.08	117.36 116.14	118.84 117.62	120.11 118.88	121.73 120.51	122.28 121.05	120.80 119.57	118.35 117.14	30 °C	
10082X0001	POLASTRON 101 à POLASTRON	Mesurée Corrigée	114.01 122.17	113.96 122.13	113.91 122.07	113.86 122.02	113.81 121.97	113.76 121.93	113.72 121.88	113.65 121.81	42,4 °C en fond de forage (Diagraphie 10/2017)	1420 mg/l
10078X0001	PUYMAURIN à MONBARDON	Mesurée Corrigée	168.96 168.05	168.91 167.99	168.87 167.96	168.85 167.94	168.87 167.96	168.85 167.94	168.89 167.98	168.82 167.90	40°C d'après gradient géothermique moyen	
09014X0013	MARCHEPIN à BUZET-SUR-BAISE	Mesurée Corrigée	-1.84 -2.01	-2.17 -2.34	-2.84 -3.01	-2.59 -2.76	-2.27 -2.44	-2.58 -2.75	-2.34 -2.51	-2.66 -2.83	28°C	
10326X0009	CASTELNAU MAGNOAC à CIZOS	Mesurée Corrigée	127.17 126.45	127.12 126.41	127.07 126.36	127.03 126.31	126.98 126.27	126.94 126.23	126.89 126.18	126.83 126.12	38°C d'après gradient géothermique moyen	
09784X0029	CHICOY à EUGÈNE-LES-BAINS	Mesurée Corrigée	65.82 65.77	66.16 66.12	66.23 66.19	66.37 66.33	67.04 67.00	67.35 67.30	67.37 67.33	67.66 67.62	37,8 °C	820 mg/l
09784X0020	MOULIN DE BOUGNÈRES à EUGÈNE-LES-BAINS	Mesurée Corrigée	66.01 65.93	66.35 66.27	66.42 66.34	66.56 66.48	67.38 67.30	67.64 67.56	67.63 67.55	67.97 67.89	35,2 °C	895 mg/l
09545X0019	ETABLISSEMENT THERMAL - CV1 à CASTERA-VERDUZAN	Mesurée Corrigée	105.16 105.11	104.97 104.92	104.96 104.90	104.96 104.90	105.60 105.55	106.70 106.65	106.73 106.68	106.71 106.65	898 mg/l	
09784X0018	CHRISTINE-MARIE à EUGÈNE-LES-BAINS	Mesurée Corrigée	66.93 65.36	67.43 65.86	67.43 65.86				68.03 66.45	68.20 66.62	42,5 °C	850 mg/l
09527X0021	IZAUTE 101 à LAULIZAN	Mesurée Corrigée	97.56 96.57	97.63 96.64	97.97 96.98	98.31 97.32	98.52 97.53	98.66 97.67	98.69 97.70	x	40 °C	
10057X0001	LEMBEVEY à SIMACOURBE	Mesurée Corrigée	133.83 133.67	133.71 133.55	133.55 133.39	133.47 133.31	133.84 133.68	134.03 133.87	134.28 134.12	134.33 134.17	Pas de donnée disponible : Prise en compte du gradient géothermique. Température retenue : 29 °C	



## **Annexe 8**

### **Tableau des données acquises lors des campagnes de reconnaissances hydrogéologiques de terrain de la formation des poudingues de Palassou**



NUM PROJET	INDICE NATIONAL	DATE	NATURE	APPELLATION	DEPT	COMMUNE	LAT	LONG	Z.GPS	CARTE GEOL	Unité Paléozo	Membre Paléozo	COND µS/cm	pH	TEMP	DEBIT l/s	PROF (m)	NP/PM (m)	RM/So (m)	COMMENTAIRES
PP01	S.O.	18/10/2017	Affluement	Bordure Route D11	ARIEGE	Loubers	43.05394	1.58423	410	1057 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Formations de Forques et de la Forêt de Lérin	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveaux de poudingues intercalés au sein de dépôts argilo-sableux. Affluement extrêmement altéré au niveau des éléments constituant le poudingue (quartzite, gneiss, marbre, mica, micaux).
PP02	1057BX023HY	18/10/2017	Source	Source de Labia	ARIEGE	Loubers	43.05351	1.58216	588	1007 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Formations de Forques et de la Forêt de Lérin	460	7.86	13.6	0.28	/	/	/	Actes cartés AFP de la source de Labia, abaissement depuis les hauteurs de Labia. Prof. d'une ressource d'eau éminemment saine. Sources essentiellement exploitées pour un usage agricole (élevage d'une abeille de cros). Source potabile issue de circulations d'eau au sein des niveaux de poudingues amont le versant de la colline Le Pech. Présence d'autres sources à proximité dont une située en contrebas de la ligne de crête. Agriculteur ayant extrait des blocs de taille centimétrique à métrique au niveau des terrains de la ligne de crête.
PP03	S.O.	18/10/2017	Prise de vue	Courmet	ARIEGE	Loubers	43.05184	1.55927	580	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Dur-Roumengo-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du sud vers le hameau de Pontederri au premier plan et vers la route D11 au loin, mettant en évidence des paysages avec des pentes modérées et des talwegs aux versants plus abruptes probablement à la faveur des niveaux de poudingues amont les pentes.
PP04	S.O.	18/10/2017	Affluement	Marnier	ARIEGE	Loubers	43.05081	1.58412	574	1037 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Formations de Forques et de la Forêt de Lérin	/	/	/	/	/	/	/	Entournement de 3m de diamètre et environ 3m de hauteur, survenu au milieu d'un ruisseau, en bordure par l'agriculteur. Terrain argilo-sableux, affluement de poudingues en relation avec des circulations d'eau, voire des phénomènes de dissolution de la matrice carbonatée des poudingues existants potentiellement plus en profondeur.
PP05	S.O.	18/10/2017	Prise de vue	Carroute	ARIEGE	Loubers	43.04345	1.5581	521	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Dur-Roumengo-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue depuis les abords de la route D11 en direction du nord (N15°) vers les paysages de Pontederri. Prise de vue en direction du ruisseau (vers l'ouest) au milieu d'un ruisseau, mettant en évidence des pentes plus abruptes semblant correspondre aux niveaux de poudingues.
PP06	S.O.	18/10/2017	Affluement	Bordure Route D11	ARIEGE	Loubers	43.04547	1.55761	505	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Dur-Roumengo-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affluement d'environ 0,5 m de hauteur en bordure de route. Niveaux gréseux en alternance avec niveaux de poudingues à matrice gréseuse. Improbable altération sableuse.
PP07	S.O.	18/10/2017	Prise de vue	La Matte	ARIEGE	Loubers	43.04872	1.54332	467	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Couches de Fomy-Imbrassas	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du nord (N15°) vers la crête surplombant le village de Labia avec présence de niveaux de poudingues.
PP08	1057BX028HY	18/10/2017	Source	Source de Fanlet	ARIEGE	Loubers	43.04984	1.53825	455	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Couches de Fomy-Imbrassas	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	/	/	/	Cartage de la source de Fanlet par l'agriculteur. Niveaux de 50 cm de hauteur de la source de Fanlet. Forcée de partie inférieure de la source de Fanlet. Forcée de partie supérieure de la source de Fanlet (garage des toitures) aux abords immédiats du poudingue. Absence d'affluements.
PP09	S.O.	18/10/2017	Affluement	La Matte	ARIEGE	Loubers	43.04438	1.53357	411	1057 - PAMIERS	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction de calcaires gréseux appaissant en affluement discontinu dans un paysage maillé.
PP10	S.O.	18/10/2017	Prise de vue	Féchet	ARIEGE	Montbel	42.9831	1.97836	528	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction au N vers le talweg de la source captée mesurée au point PP11. Secteur sans affluement apparent présentant un paysage vallonné. Présence d'une dalle de grès subsaffleurant dans une parcelle en prairie avec un sol argilo-limoneux.
PP11	1076X0104HY	18/10/2017	Source	Source de Cantirate	ARIEGE	Montbel	42.98457	1.97531	493	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	N.M.	7.33	14.2	N.M.	/	/	/	Mesures physico-chimiques au niveau d'une source captée située en bord de talweg à priori pour alimentation en eau de bannet. Tuyau forcé en direction de l'axe du talweg. Source présentant un très faible débit.
PP12	S.O.	18/10/2017	Affluement	Thalweg de Cantirate	ARIEGE	Montbel	42.98456	1.97542	493	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues d'environ 3 à 4 m de hauteur en bord de talweg saisonniers et de niveaux de grès différentiels.
PP13	S.O.	18/10/2017	Prise de vue	Lac de Montbel	ARIEGE	Montbel	42.97996	1.9708	401	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Couches de Lérin-Lagrade	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue sur les bords du lac de Montbel à niveau extrêmement bas. Morphologie d'ensemble des abords du lac en dépression limitant des terrains marécageux en présence.
PP14	S.O.	18/10/2017	Source	Source de Bellos	ARIEGE	Bellos	43.01229	1.93248	402	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	A. sec	/	/	/	Recherche d'une source positionnée sur l'IGN en continuité du bord de Bellos. Source non visible à priori située sous une dalle de béton. Forcé prenant naissance des écoulements de la source à sec.
PP15	S.O.	18/10/2017	Affluement	Falaises Rive droite du Touyre	ARIEGE	Bellos	43.01059	1.91658	368	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues indurés en bord de talweg à sec. Affluement de niveaux gréseux et de niveaux de poudingues plus grossiers. Affluement situé sur la rive droite du Touyre. Versants présentant de nombreux blocs détachés de poudingues.
PP16	S.O.	18/10/2017	Affluement	Falaises Rive droite du Touyre	ARIEGE	Bellos	43.01151	1.91713	375	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues de 3 à 7 m de hauteur situés environ à 30-40 m au dessus du Touyre en rive droite. Matrice gréseuse-sableuse. Poudingues composés de blocs de grès à matrice sableuse et de blocs de calcaires (restes de bancs de taille centimétrique à décimétrique).
PP17	S.O.	18/10/2017	Prise de vue	Les Mounassas	ARIEGE	Bellos	43.0001	1.92258	418	1076 - LAVELANET	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue depuis un vaste plateau surplombant la vallée escarpée au Touyre en direction du N-E vers le talweg du point PP15. Parcelle en bordure de chemin d'infirmité pour la réalisation des essais de perméabilité.
PP18	S.O.	18/10/2017	Affluement	Bordure Route Châteaux de Quelle	ARIEGE	Saint-Quentin-la-Tour	43.02814	1.91408	388	1058 - MIREPOIX	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveaux de poudingues très indurés d'environ 1 m de hauteur et fracturés. Fractures verticales découpant l'affluement en blocs plus ou moins cubiques. Matrice carbonatée à grains grossiers. Poudingues composés de très nombreux éléments (majoritairement des calcaires) de taille centimétrique. Affluement surmonté d'un plateau boisé dont la surface apparaît numérisée.
PP19	S.O.	18/10/2017	Affluement	Bordure Route D7 - Plaine de Notre Dame	ARIEGE	Ligardie	43.04468	1.93246	331	1058 - MIREPOIX	S.O.	S.O.	/	/	/	/	/	/	/	Affluement d'environ 4 à 5 m de hauteur de calcaires gréseux de tertiaire grise se déchant en bancs (stratères sub-horizontales) probablement altifiés aux formations marines du Luberon inf. Atranch argileux en surface.

NUM PROJET	INDICE NATIONAL	DATE	NATURE	APPELLATION	DEPT	COMMUNE	LAT	LONG	Z.GPS	CARTE GEOL	Unité Plessacou	Membre Plessacou	COND µS/cm	pH	TEMP	DEBIT l/s	PROF (m)	NPRM (m)	RMsol (m)	COMMENTAIRES
PP20	S.O.	23/10/2017	Affluement	Cap du Plat	ARIEGE	Ventillac	42.98137	1.73812	568	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Recherche de zone d'infiltrations pour effectuer des essais de perméabilité. Surface plate correspondant à une prairie située en bordure de chemin susceptible d'être favorable
PP21	S.O.	23/10/2017	Affluement	Cap du Plat	ARIEGE	Ventillac	42.98035	1.73833	544	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement (en bordure de chemin) de niveaux de poudingues intercalés au sein de dépôts argilo-sableux. Présence de blocs de quartzites et de galets de quartzites. Importance traces d'oxydation. Affluement allié avec nombreux blocs se détachant de la matrice.
PP22	S.O.	23/10/2017	Affluement	Cap du Plat	ARIEGE	Ventillac	42.98017	1.73866	541	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveaux de poudingues allié avec de nombreux blocs se détachant de la matrice. Éléments constituant le poudingue très largement allié. Intercalation de dépôts argileux de faible teneur
PP24	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bordure Route D10	ARIEGE	Ventillac	42.98394	1.74372	492	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveaux de poudingues (d'environ 2m de hauteur) très indurés à très nombreux éléments de taille cm à dm de nature diverse (calcaires métamorphisés, quartzites) à ciment grés-carbonaté. Affluement se prolongeant environ 50 m de longueur le long de la route
PP25	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bordure Route D13	ARIEGE	Ventillac	42.98372	1.72322	490	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveau de hauteur surmontés de niveaux de poudingues à nombreux éléments de taille centimétrique d'environ 1m de hauteur. Affluement découpé par plusieurs fractures verticales
PP26	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bordure Route D13	ARIEGE	Ventillac	42.98345	1.7228	492	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement sur deux à trois mètres du point d'échappement. PP25 se poursuit sur 10 m la source. Niveau de poudingue composé des éléments de taille centimétrique à centimétrique par rapport au point. PP25. Affluement également très haut
PP27	10754X0061HY	23/10/2017	Source	Source de Nagaille	ARIEGE	Ventillac	42.9923	1.72198	491	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	A rec	/	/	/	Source à sec allée à mi-pente d'un champ cultivé correspondant probablement à un écoulement superficiel
PP28	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bordure Route D13	ARIEGE	Ventillac	42.98897	1.71623	507	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveaux de poudingues très indurés (d'environ 3,0 m de hauteur) à nombreux éléments de taille centimétrique à décimétrique et se poursuivant sur environ une centaine de mètres en bordure de route.
PP29	10754X0054HY	23/10/2017	Source	Source de Le Boisquet	ARIEGE	Ventillac	42.98495	1.73043	469	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	460	7.16	15.2	N.M	/	/	/	Captage AEP à priori abandonné du hameau de Bousquet. DRAIN alimentant une vasque avec un système de trop-plein. Présence d'un ruisseau à quelques mètres de distance du captage, situé en contrebas
PP30	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bordure Route D713	ARIEGE	Ventillac	43.0014	1.7051	556	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement (telles de roches) avec un niveau grésieux (d'environ 0,5 m de hauteur) surmonté de dépôts mineurs de teneur ocre à intercalation de niveaux indurés grés-carbonatés de teneur ocre
PP31	S.O.	23/10/2017	Prise de vue	Col de Cante-Couyeul	ARIEGE	Ventillac	43.0023	1.70389	564	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction de l'est vers la petite vallée du ruisseau de Galin (hameau Saint-Martin) avec un paysage de colline aux pentes modérées dont les versants sont armés de talus plus ou moins grésieux ?
PP32	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bordure Route D713	ARIEGE	Ventillac	43.00215	1.70147	553	1075 - FOIX	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de niveaux de poudingues (d'environ 0,5 m de hauteur) à nombreux éléments de taille centimétrique surmontés de niveaux grésieux de couleur rose se dépliant en plaquette
PP33	10754X0076HY	23/10/2017	Source	Source du col de la Choulaude	ARIEGE	Ventillac	42.98584	1.74184	519	1075 - FOIX	1 <sup>re</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	N.M	N.M	N.M	N.M	/	/	/	Captage AEP de la source du col de la Choulaude issue de circulations d'eau au sein d'un horizon de poudingue d'après renseignements fournis par avis HA. Mesures physico-chimiques et de débit non réalisées en raison de la fermeture du captage. Parcelle en prairie (pacage de chevaux) aux abords immédiats. Absence d'affluements. Parcelle en bordure de route d'intérêt pour la réalisation d'essais de perméabilité
PP34	N.D.	23/10/2017	Source	Source de l'abreuvoir du col de la Choulaude	ARIEGE	Ventillac	42.98533	1.74204	513	1075 - FOIX	1 <sup>re</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	544	7.88	14.1	0.05	/	/	/	Abreuvoir pour chevaux alimentés soit par trop-plein du captage AEP du col de la Choulaude (entre à moins de 50 m en contrebas), soit par source souterraine dans un contact similaire au captage AEP ?
PP35	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bord de route D10 - Col de la Choulaude	ARIEGE	Ventillac	42.98495	1.74577	507	1075 - FOIX	1 <sup>re</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues (d'environ 2 à 3 m de hauteur en bordure de route. Matrice carbonatée. Présence de très nombreux éléments de taille centimétrique et de nature calcaire majoritaire (calcaires métamorphisés). Niveaux de poudingues tassés avec de nombreux blocs détalés.
PP36	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bord de route D10 - Col de la Choulaude	ARIEGE	Ventillac	42.9845	1.74435	515	1075 - FOIX	1 <sup>re</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Niveaux de poudingues surmontés de niveaux grés-carbonatés indurés à grains grossiers. Niveaux grésieux disséminés à l'affluement en direction du point PP35 avec uniquement présence de niveaux de poudingues
PP37	N.D.	23/10/2017	Source	Lavoir de Ueurae	ARIEGE	Lueurae	42.98408	1.76052	365	1075 - FOIX	S.O.	S.O.	654	7.22	13.9	0.03	/	/	/	Mesures physico-chimiques au niveau d'un lavoir alimenté par une source issue à priori des formations marines de l'éocène inférieur (Marnes à Nummulites et Turbellites de l'herdon moyen ?). Absence d'affluements en amont immédiat du lavoir
PP38	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bord de route D12 - Gauric	ARIEGE	Dun	43.011	1.79779	357	1078 - LAVELANET	2 <sup>nd</sup> unité	Couches de Pomy-Limbassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues (d'environ 3 à 4 m de hauteur en bordure de route. Matrice carbonatée à grains grossiers. Présence de très nombreux éléments de taille variable (comminatoire et crin) et de nature majoritaire calcaire métamorphosée. Niveaux de poudingues allié avec de nombreux blocs de quartzites, voire des pans entiers de poudingues (résolution de surplomb). Niveaux de poudingues surmontant niveaux grés-carbonatés de teneur ocre.
PP38	S.O.	23/10/2017	Prise de vue	Bord de route D13 - le Pied de la Saie	ARIEGE	Dun	43.04655	1.7888	312	1057 - POMPIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Vira-Paralletes	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction de l'ouest vers le Pied de la Saie en live droite de la vallée du Douctouye dont les versants sont armés de niveaux de poudingues plus ou moins éboulés

NUM PROJET	INDICE NATIONAL	DATE	NATURE	APPELLATION	DEPT	COMMUNE	LAT	LONG	Z GPS	CARTE GEOL	Unité Paléozo	Membre Paléozo	COND µS/cm	pH	TEMP °K	DEBIT l/s	PROF (m)	NIP/BN (m)	RMSO (m)	COMMENTAIRES
PP40	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bord de route D528	ARIEGE	Predettes	42.8896	1.82282	488	1076 - LAVELANET	1 <sup>re</sup> unité	Couche de Lérans-Lagarde	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de talus de route de nappes argileuses de pente forte à grise. Présence d'une paroielle en pente en bordure de route d'attente pour la réalisation d'essais de perméabilité. Ruissseau de Mazzard prenant naissance dans les formations de l'unité 1 situées en contrebas à environ 700 m de distance à sec.
PP41	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bourg	ARIEGE	Predettes	42.96013	1.81922	513	1076 - LAVELANET	1 <sup>re</sup> unité	Couche de Lérans-Lagarde	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de conglomérats très indurés en bancs peu épais (environ 50cm de hauteur). Matrice carbonatée. Présence de nombreux éléments de bulle en majorité de nature diverses (calcaires et quartiles majoritaires).
PP42	A creber	23/10/2017	Puits	Ecluse de Predettes	ARIEGE	Predettes	42.8914	1.81759	500	1076 - LAVELANET	1 <sup>re</sup> unité	Gés et Poudingues de Tainre-Saint-Quemlin	1334	7.42	14.7	4.85	0.71	0.25	Mesures physico-chimiques au niveau d'un puits couvrant à partir de buses (diamètre 1,5 m) situés en bordure de parcelles agricoles cultivées en maïs. Présence d'une éolienne servant par le passé à acheminer l'eau du puits vers un réservoir situé plus haut dans le village. Valeur de conductivité très élevée témoignant probablement de la contamination des eaux par les nitrates.	
PP43	S.O.	23/10/2017	Affluement	Armas	ARIEGE	Limassac	43.0145	1.84128	394	1076 - LAVELANET	2 <sup>re</sup> unité	Couche de Pomy-Limassac	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues fracturés (fractures verticales) d'environ 2 à 3 m de hauteur en contrebas de la route. Matrice carbonatée à grains grossiers de teneur grise. Présence de nombreux éléments de taille variable (en majorité de nature majoritaire calcaire calcaire métrorphiques). Observation de traces d'altération s'apparentant à la kaolinitisation.
PP44	S.O.	23/10/2017	Cours d'eau	Ruissseau de Courme Longue	ARIEGE	La Bastide-de-Bousignac	43.05203	1.85029	320	1068 - MIREPOIX	S.O.	S.O.	/	/	/	A sec	/	/	/	Ruissseau de Courme Longue à sec avec présence sporadique de vasques d'eau. Faible écoulement en période de fort débit (PP46). Ruissseau s'écoulant à priori sur versants alluviaux.
PP45	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bord de route D7b - Montcastron	ARIEGE	La Bastide-de-Bousignac	43.05193	1.84985	332	1068 - MIREPOIX	2 <sup>re</sup> unité	Poudingue de Durroumeigoux-Caudéval	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues à très forte concentration d'éléments grossiers (cm) d'environ 4 à 5 m de hauteur, se poursuivant longitudinalement sur environ une centaine de mètres en bordure de route. Alternance de niveaux de poudingues et de niveaux grès-carbonatés à grains grossiers d'environ 50 cm d'épaisseur. Niveaux de poudingues fortement altérés et fracturés (craquelé de surface). Niveau grès-carbonatés également fracturés et décolorés en surface. Observation de traces d'altération s'apparentant à la kaolinitisation. Matrices indurées de teneur rose avec écaillage d'un substratum par érosion différentielle.
PP46	S.O.	23/10/2017	Cours d'eau	Ruissseau de Courme Longue	ARIEGE	Besset	43.05841	1.84745	319	1068 - MIREPOIX	S.O.	S.O.	/	/	/	A sec	/	/	/	Ruissseau de Courme Longue à sec avec présence sporadique de vasques d'eau. Ruissseau fortement encaissé dans les alluvions. Observation d'un grano-classement formant des séquences de facies d'alluvions sur 3 à 4 m de hauteur depuis le lit du ruissseau.
PP47	S.O.	23/10/2017	Affluement	Bord de route D13 - Cazail	ARIEGE	Dun	43.05473	1.83787	386	1068 - MIREPOIX	2 <sup>re</sup> unité	Poudingue de Durroumeigoux-Caudéval	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de marnes indurées de teneur rose-rose se délitant en plaquettes. Présence de niveaux de poudingues d'environ 0,5 à 1 m de hauteur d'extension relative intercalés au sein des marnes. Morphologie générale au versant en marche d'escaliers.
PP48	S.O.	23/10/2017	Prise de vue	Bord de route D12 - Côte de Fergat	ARIEGE	Vira	43.04714	1.78218	308	1067 - PAMBERS	3 <sup>me</sup> unité	Poudingue de Viraparalletes	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du NNE vers la colline de Le Coumel en rive droite de Douctouyre dont les versants sont armés de niveaux de poudingues plus ou moins épais (morphologie de terrasses successives).
PP49	S.O.	24/10/2017	Affluement	Chemin de Vira rive droite au Douctouyre	ARIEGE	Vira	43.04891	1.7828	307	1067 - PAMBERS	3 <sup>me</sup> unité	Poudingue de Viraparalletes	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de poudingues d'environ 3 à 4 m de hauteur. Matrice carbonatée et de nature majoritairement calcaire. Niveaux présentant une très importante concentration de galets et de graviers. Affluement atterr et fracturé avec de nombreux blocs détachés, voire des pans entiers de poudingues (craquelé de surplomb).
PP50	S.O.	24/10/2017	Affluement	Chemin de Vira rive droite au Douctouyre	ARIEGE	Vira	43.05093	1.78151	309	1067 - PAMBERS	3 <sup>me</sup> unité	Poudingue de Viraparalletes	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de calcaires argileux d'environ 1m de hauteur de teneur rose se délitant horizontalement en bancs. Calcaires argileux surmontés des niveaux de conglomérats.
PP51	S.O.	24/10/2017	Prise de vue	Chemin de Vira rive droite au Douctouyre	ARIEGE	Vira	43.04841	1.78421	314	1067 - PAMBERS	3 <sup>me</sup> unité	Poudingue de Viraparalletes	/	/	/	/	/	/	/	2 prises de vue depuis le bord de route : 1) en direction du SW, perpendiculairement à la vallée du Douctouyre, vers les versants situés en rive gauche avec présence de falaises de poudingues armant les sommets 2) sur la morphologie des versants de la colline Le Coumel en rive droite présentant des successions de niveaux de poudingues et de niveaux moins indurés (nappes ou calcaires argileux ?).
PP52	S.O.	24/10/2017	Prise de vue	Eglise de Vira	ARIEGE	Vira	43.05015	1.75552	316	1067 - PAMBERS	3 <sup>me</sup> unité	Poudingue de Viraparalletes	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction de l'E vers la colline de Le Coumel en rive droite du Douctouyre dont les versants sont armés de niveaux de poudingues plus ou moins épais alternant probablement avec des niveaux plus nombreux (morphologie de terrasses successives).
PP53	S.O.	24/10/2017	Prise de vue	Bord de route D48	ARIEGE	Caizan	43.02059	1.7355	454	1067 - PAMBERS	2 <sup>re</sup> unité	Poudingue de Durroumeigoux-Caudéval	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du N vers la vallée de Caizan avec présence de pans et d'affleurements de versants dont les sommets sont armés par les niveaux de poudingues. Présence de grottes indiquées sur l'IGN dans ces formations.
PP54	S.O.	24/10/2017	Affluement	Col de Caizan	ARIEGE	Caizan	43.0303	1.73319	466	1067 - PAMBERS	2 <sup>re</sup> unité	Poudingue de Durroumeigoux-Caudéval	/	/	/	/	/	/	/	Affluement de marnes indurées de teneur rose. Présence d'une veste surplombant le versant du NNE. Niveau de poudingues observés en bordure de route en descendant vers Mallicou.

NUM PROJET	INDICE NATIONAL	DATE	NATURE	APPELLATION	DEPT	COMMUNE	LAT	LONG	Z GPS	CARTE GEOL	Unité Paléozo	Membre Paléozo	COND µS/cm	PH	TEMP	DEBIT l/s	PROF (m)	NP/IRM (m)	RM/soi (m)	COMMENTAIRES
PP55	S.O.	24/10/2017	Affleurement	Bord de route D48	ARIEGE	Malléon	43.03145	1.72524	436	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues d'environ 1 m de hauteur. Matrice carbonatée. Présence de nombreux éléments de taille variable (cm et de nature majoritairement calcaire). Affleurement présentant un aplomb témoignant de l'érosion affectant la formation en surface. Présence d'un ruisseau à sec. Saule en contrebas de l'affleurement.
PP56	S.O.	24/10/2017	Affleurement	Bord de route D10 - Vallée du Cteu	ARIEGE	Malléon	43.03396	1.72156	416	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues d'environ 2 à 3 m de hauteur et se poursuivant sur environ 50 m de long en bordure de D10. Matrice carbonatée très indurée. Présence de nombreux éléments de taille variable sur le ruisseau. Ruisseau de Bayé situé en contrebas de tufs calcaires sur le sommet de l'affleurement.
PP57	S.O.	24/10/2017	Cours d'eau	Ruisseau de Bayé	ARIEGE	Ségura	43.02225	1.68409	445	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	588	/	13.8	<<	/	/	/	Mesures physico-chimiques au niveau du ruisseau de Bayé prenant naissance au sein de la série des poudingues de Durroumengoix-Caudoual. Faible débit. Présence de dépôts de tufs calcaires dans le lit du ruisseau, indicateur d'une concentration élevée en ions carbonates dissous dans l'eau.
PP58	S.O.	24/10/2017	Affleurement	Les Parois	ARIEGE	Ségura	43.02514	1.68279	438	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues d'environ 2 à 3 m de hauteur. Matrice carbonatée très indurée. Présence de nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature majoritairement calcaire. Observation de dépôts de tufs calcaires en surface. Ruisseau de Bayé situé en contrebas se séparant de ce niveau (à sec).
PP59	S.O.	24/10/2017	Affleurement	Clot d'Emmilière	ARIEGE	Ségura	43.02724	1.68206	397	1057 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues d'environ 2 m de hauteur. Matrice carbonatée très indurée. Présence de nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature majoritairement calcaire.
PP60	S.O.	24/10/2017	Affleurement	Bord de route D13 - Galy	ARIEGE	Dolou	43.02787	1.6548	380	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues faiblement verticales d'environ 2 à 3 m de hauteur. Matrice carbonatée très indurée. Présence de nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature majoritairement calcaire.
PP61	S.O.	24/10/2017	Affleurement	Bord de route D13 - Amont Cazals	ARIEGE	Guchès	43.01266	1.67313	412	1075 - FOIX	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues d'environ 2 m de hauteur. Matrice carbonatée très indurée. Présence de nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature majoritairement calcaire.
PP62	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Bord de route D919 - Sauvage	ARIEGE	Morespès	43.08776	1.46336	310	1057 - PAMIERS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durroumengoix-Caudoual	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement des poudingues de la série de Palihès d'environ 2 m de hauteur. Matrice gréséo-carbonatée. Nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature diverse (calcaires mélangés à la marne, schistes, quartz...). Présence sur la hauteur de l'affleurement de niveaux de calcaires argileux se déformant en bancs. Présence de niveaux de poudingues numérotés d'environ 50 cm de soit contenant de nombreux graviers.
PP63	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Bord de route D818 - Ambielles	ARIEGE	Palihès	43.3835	1.45466	306	1057 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement des poudingues de la série de Palihès d'environ 2 m de hauteur. Matrice gréséo-carbonatée. Nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature diverse (principalement calcaires). Affleurement alléé avec une matrice relativement meuble de siltite rougeâtre-ocre. Nombreux blocs détachés, voire des pans entiers de poudingues. A quelques mètres de distance de l'affleurement, surface plane enterrée d'environ 1 m de hauteur. Essai de perméabilité.
PP64	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Bord de route D919	ARIEGE	Palihès	43.08795	1.45301	298	1057 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement des poudingues de la série de Palihès d'environ 6 m de hauteur. Matrice gréséo-carbonatée ocre. Très nombreux éléments de taille variable (cm à dm) et de nature diverse. Présence de niveaux à blocs de grande dimension et présence de niveaux à sur-concentration d'éléments. Présence de niveaux de poudingues numérotés d'environ 50 cm de hauteur. Ruisseau Lèze s'écoulant en contrebas de la route au sein de la série de Palihès.
PP65	S.O.	25/10/2017	Prise de vue	le Gabachou	ARIEGE	Palihès	43.08442	1.44087	400	1057 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Site de prise de vue depuis le sommet de la colline de Maison Neuve : - en direction de ESE vers les collines encaissant la vallée de la Lèze - en direction du N-NE vers le châtelet de Palihès avec en arrière plan les collines massives oligocènes - en direction de N-NW vers les sommets des collines constituées de terrains de la série de la Côte Maison Neuve (gauche de la photo) et de ceux de Palihès et Long Pas (droite de la photo)
PP66	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Bord de route D119	ARIEGE	Palihès	43.08986	1.43666	323	1057 - PAMIERS	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement des poudingues de la série Maison-Neuve d'environ 3 m de hauteur. Matrice gréséo-carbonatée. Présence de nombreux éléments de taille variable (cm) et majoritairement irréguliers par des calcaires mélangés. Présence de bancs grésuo grossiers les uns au-dessus des autres. Présence de niveaux de poudingues numérotés d'environ 50 cm de hauteur. Affleurement alléé.
PP67	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Chemin du ruisseau de Toumias	ARIEGE	Palihès	43.1022	1.43605	316	1056 - LE MAS-D'AZIL	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement des poudingues de la série de Palihès - d'environ 5 à 6 m de hauteur. Matrice carbonatée. Affleurement présentant une très importante concentration de galles dont certains blocs de grande dimension (cm). Présence de nombreux spets de calcaires mélangés. Affleurement fracturé et alléé avec de nombreux blocs détachés de la matrice créant des excavations. Ruisseau de Toumias situé en contrebas du chemin à sec. Site d'arrêt pour la réalisation d'essais de perméabilité.
PP68	S.O.	25/10/2017	Prise de vue	Chagnin	ARIEGE	Palihès	43.10789	1.43100	355	1056 - LE MAS-D'AZIL	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue depuis les pelouses oligocènes en direction de E-NE vers les collines surmontant Palihès constituées des terrains de la série des poudingues de Viraparaulettes.
PP69	S.O.	25/10/2017	Prise de vue	Chemin de Long-Pas	ARIEGE	Palihès	43.11007	1.42818	446	1056 - LE MAS-D'AZIL	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Viraparaulettes	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du S-SW vers la dépression de Long-Pas caractéristique des terrains massifs en présence.

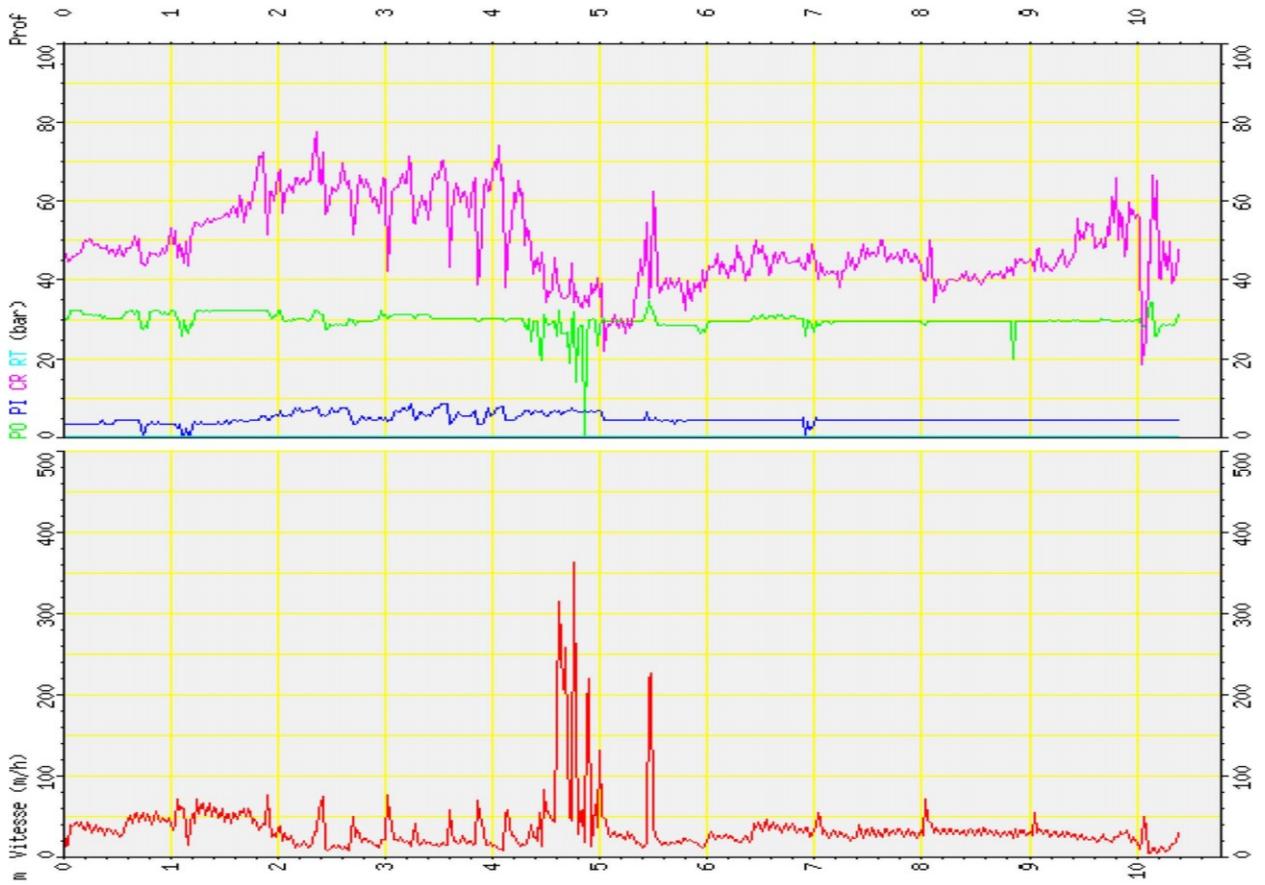
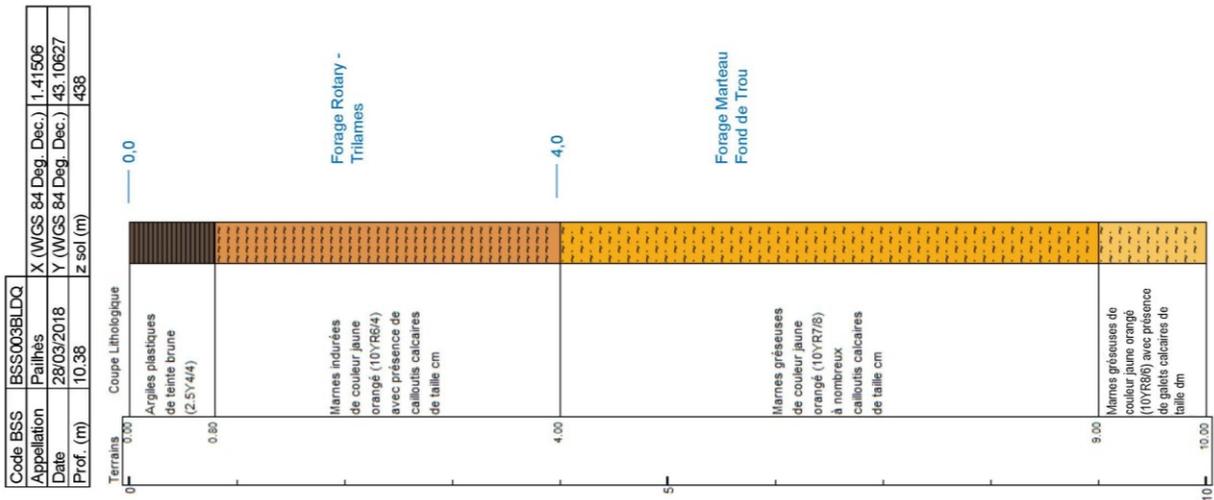
NUM PROJET	INDICE NATIONAL	DATE	NATURE	APPELLATION	DEPT	COMMUNE	LAT	LONG	Z GPS	CARTE GEOL	Unité Pallassou	Membre Pallassou	COND µS/cm	pH	TEMP	DEBIT l/s	PROF (m)	NP/IRM (m)	RM/Soi (m)	COMMENTAIRES
PP70	S.O.	25/10/2017	Prise de vue	Chemin de Long-Pas	ARIEGE	Pailhès	43.09801	1.42913	440	1056 - LE-MAS-D'AZIL	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Vira-Paraulières	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du SE avec au loin les paysages vallonnés de la série des Poudingues de Cote-Maison-Neuve (Unité 2). Observation au premier plan de bancs de calcaires intercalés au sein des terrains mameux créant des buttes dans les pentes herbeuses
PP71	S.O.	25/10/2017	Prise de vue		ARIEGE	Sabarot	43.1075	1.40791	422	1056 - LE-MAS-D'AZIL	3 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Vira-Paraulières	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du SE mettant en évidence le paysage vallonné induit par la série de Pallassou avec notamment les crêtes armées par les niveaux de poudingues ou de calcaires. Site orienté pour la réalisation d'essais de perméabilité
PP72	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Bord de route D26	ARIEGE	Sabarot	43.1039	1.40235	384	1056 - LE-MAS-D'AZIL	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durn-Roumngoux-Caudoval	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de bancs de calcaires d'environ 2m de hauteur au sein des terrains mameux environnants
PP73	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Chemin de Taparouch	ARIEGE	Sabarot	43.10146	1.40489	339	1056 - LE-MAS-D'AZIL	2 <sup>ème</sup> unité	Couches de Pomy-Limbrassac	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de bancs de calcaires faibles extension intervalés au sein de terrains argileux. Bancs apparaissant morcelés et altérés. Indication par le topographe de la ferme de la présence de sources en contrées de la route autrefois utilisée pour l'eau potable de la ferme Taparouch mais aussi de l'existence d'un puits construite au niveau de la ferme
PP74	S.O.	25/10/2017	Affleurement	La Serbolle	ARIEGE	Sabarot	43.09702	1.3966	315	1056 - LE-MAS-D'AZIL	1 <sup>ère</sup> unité	Couches de Lérans-Lagarde	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement des poudingues de la série de Lassardane d'environ 2 à 3 m de hauteur. Bancs se poursuivant longitudinalement sur plusieurs centaines de mètres et formant une crête au sein de la série mameuse. Matrice grésocarbonatée à grains grossiers. Niveaux présentant une très importante concentration de galets. Présence également de niveaux majoritairement gréseux
PP75	S.O.	25/10/2017	Prise de vue	Bord de route D119	ARIEGE	Sabarot	43.09521	1.39742	283	1056 - LE-MAS-D'AZIL	1 <sup>ère</sup> unité	Couches de Lérans-Lagarde	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du NW vers la crête de la Serbolle formée des poudingues de la série de Lassardane
PP76	S.O.	25/10/2017	Affleurement	Chemin de Goutte Longue	ARIEGE	Pailhès	43.09455	1.43436	362	1056 - LE-MAS-D'AZIL	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durn-Roumngoux-Caudoval	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de mames gréseuses indurées de couleur ocre. Contact témoin de phénomènes d'oxydation. Poudingues apparaissant altérés et friables. Matrice grésocarbonatée à grain grossier. Éléments de taille et de nature diverse. Affleurement d'environ 2 à 3 m de hauteur
PP77	S.O.	25/10/2017	Prise de vue	Goutte Longue	ARIEGE	Pailhès	43.09271	1.43134	425	1056 - LE-MAS-D'AZIL	2 <sup>ème</sup> unité	Couches de Pomy-Limbrassac	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue en direction du NW vers une vaste dépression correspondant aux terrains mameux de l'unité 2
PP78	S.O.	13/02/2018	Affleurement	Cassaret	HAUTE-GARONNE	Aurignac	43.21978	0.85508	311	1033 - LE-FOUSSERET	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de poudingues indifférenciés dans la série de Pallassou situés en bordure de route formant un talus d'environ 2m de hauteur sur une 50 <sup>ème</sup> de m de longueur. Affleurement fortement altéré en surface avec de nombreux blocs détachés. Matrice grésocarbonatée à grains grossiers de teinte grise. Niveaux présentant une très importante concentration d'éléments de taille variable (graviers à galets de taille décimétrique) et de nature calcaire majoritaire. Intercalation de niveaux gréseux faiblement indurés, saturent en sables
PP79	S.O.	13/02/2018	Affleurement	Bord de route D8 - Prou	HAUTE-GARONNE	Aurignac	43.20882	0.87191	387	1033 - LE-FOUSSERET	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de niveaux de poudingues indifférenciés dans la série de Pallassou situés en bordure de route formant un talus d'environ 3-4m de hauteur sur plus de 50m de longueur. Affleurement altéré en surface avec de nombreux blocs détachés. Matrice grésocarbonatée à grains grossiers de teinte ocre. Matrice apparaissant altérée (relativement sablonneuse) sur certaines zones et plus indurée (plus carbonatée) sur d'autres. Niveaux présentant une très importante concentration d'éléments de taille variable (graviers à galets de taille décimétrique) et de nature calcaire majoritaire. Intercalation de niveaux gréseux de teinte ocre faiblement indurés, particulièrement humide. Présence d'un surface plane sur le sommet de l'affleurement orienté pour la réalisation d'essais de perméabilité
PP80	S.O.	13/02/2018	Affleurement	le Quillet	HAUTE-GARONNE	Auzas	43.18262	0.90182	386	1055 - SAINT-GAUDENS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durn-Roumngoux-Caudoval	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de mames ocre-rouges très plastiques contenant de nombreux cailloux de calcaires situés en bordure de fossé de chemin forestier. Présence à quelques mètres de distance d'un niveau de poudingues fortement altérés d'environ 0,5m de hauteur. Galets de calcaires de taille cm détachés de la matrice dans un sol argileux de couleur brun-rouge. Absence d'affleurement en bordure du chemin forestier (ONF ?) de Saint-Rame. Présence de parcelles boisées
PP81	S.O.	13/02/2018	Affleurement	Bord de route D33 - Vallée du Rieurt	HAUTE-GARONNE	Laffite-Toupière	43.17607	0.91482	312	1055 - SAINT-GAUDENS	1 <sup>ère</sup> unité	Grès et Poudingues de Tabre-Saint-Quentin	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de conglomérats de la base de la série de Pallassou d'environ 3m de hauteur en bordure de route sur une zone galeuse de rochers de Rieurt. Affleurement de mames ocre-rouges. Matrice relativement meuble de nature argilo-gréseuse de teinte ocre-rouge. Présence de blocs de taille importante (1m) et majoritairement de galets de taille cm de nature calcaire. Niveaux conglomériques reposant sur des mames gréseuses de couleur ocre-rouge
PP82	S.O.	13/02/2018	Affleurement	Buboly	HAUTE-GARONNE	Marcoux	43.16539	0.93563	388	1055 - SAINT-GAUDENS	2 <sup>ème</sup> unité	Poudingue de Durn-Roumngoux-Caudoval	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de niveaux de poudingues du cœur du synclinal de Bouzin d'environ 3-4m de hauteur en bordure de route. Matrice grésocarbonatée à grains grossiers indurée. Présence de très nombreux éléments de taille cm et de nature calcaire. Unique affleurement observé en bordure de route reliant Marcoux-Pailhès-Prés-Bordes. Paysage de parcelles en prairie ou cultures ou boisées avec des vieux borniers à nombreux cailloux.

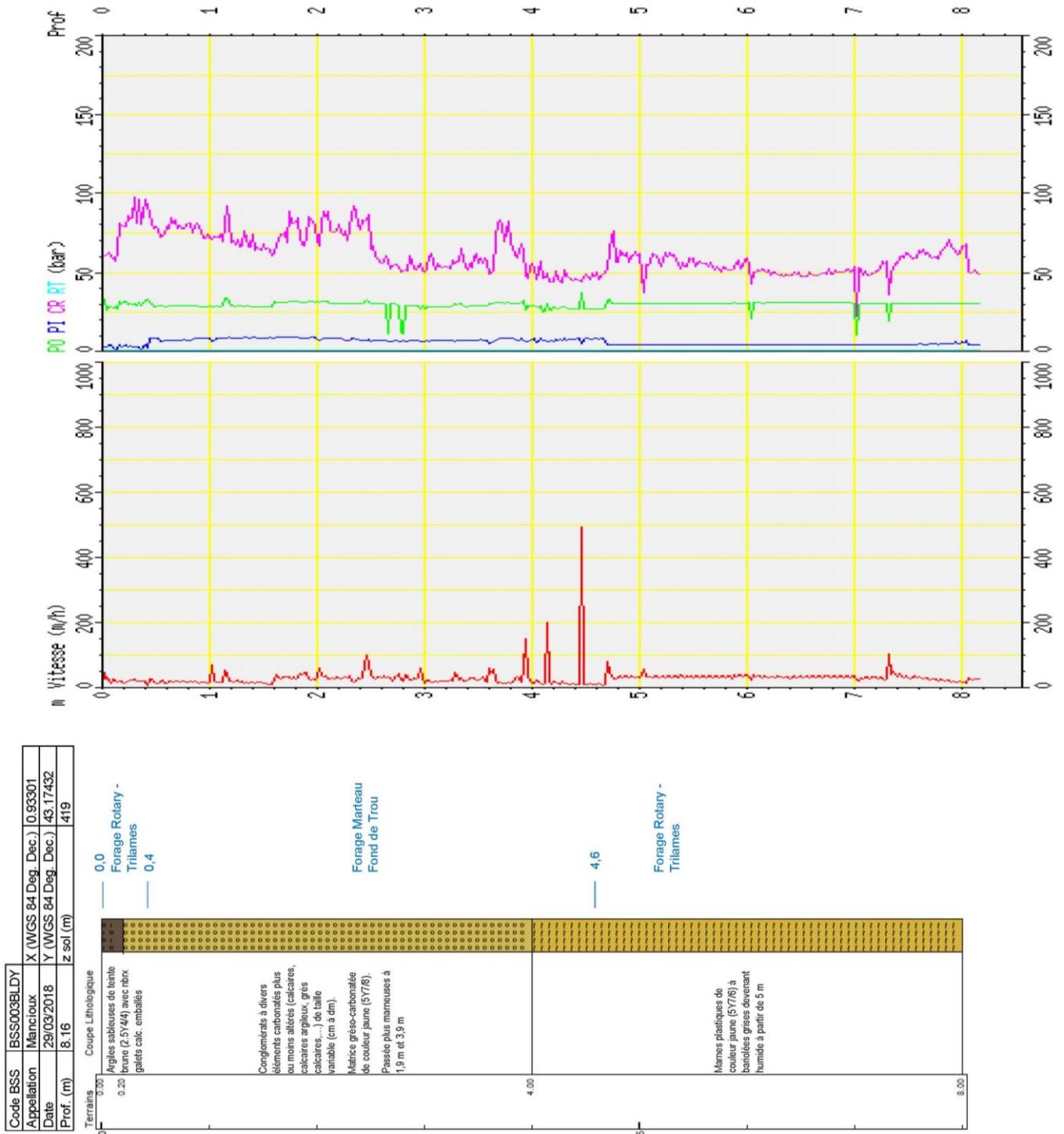
NUM PROJET	INDICE NATIONAL	DATE	NATURE	APPELLATION	DEPT	COMMUNE	LAT	LONG	Z GPS	CARTE GEOL	Unité Pallassou	Membre Pallassou	COND $\mu S/cm$	pH	TEMP	DEBIT l/s	PROF (m)	NP/RM (m)	RM/col (m)	COMMENTAIRES
PP83	S.O.	13/02/2018	Affleurement	Bord de route D82 - Vallée de la Garonne	HAUTE-GARONNE	Mauran	43.18332	1.04223	258	1055 - SAINT-GAUDENS	2 <sup>e</sup> unité	Couches de Pomy-Limbrassac	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme d'affleurement de niveaux mameux de teinte ocre-rouge et de bancs de grès à grains grossiers indurés de teinte ocre-rouge voire bariolés spectaculaire faïsse verticale et instable présentant de nombreux éboulements (par érosion préférentielle des niveaux mameux). Niveaux conglomérats apparaissant sous la forme de bancs très redressés et comprenant de très nombreux éléments de taille cm au sein d'une matrice grés-carbonatée à grains grossiers de teinte grise. Niveaux mame-grésux faiblement indurés de teinte ocre-rouge voire bariolés
PP84	S.O.	14/02/2018	Prise de vue	Pont de Mauran - Vallée de la Garonne	HAUTE-GARONNE	Mauran	43.18324	1.02872	251	1055 - SAINT-GAUDENS	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue depuis le pont de Mauran sur la Garonne en direction du SE vers les faïsses de poudingues constituant les berges de la Garonne en rive gauche. Niveaux mameux faiblement endobés avec des pans entiers de poudingues détachés
PP85	S.O.	14/02/2018	Prise de vue	las Goubias	HAUTE-GARONNE	Palaminy	43.18060	1.05891	242	1055 - SAINT-GAUDENS	2 <sup>e</sup> unité	Couches de Pomy-Limbrassac	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue depuis le chemin de Pesquès en direction du S-SV vers les collines Cantalose constituées de marnes dominantes à passage de bancs de poudingues
PP86	S.O.	14/02/2018	Affleurement	Bord de route D6 - Vallée du Volp	HAUTE-GARONNE	Le Plan	43.18835	1.11659	260	1056 - LE MAS-D'AZIL	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme de niveaux conglomérats d'environ 3m de hauteur situés en rive gauche de la rivière Volp. Niveaux conglomératiques à matrice fortement carbonatée et à éléments de taille cm uniquement de nature calcaire
PP87	S.O.	14/02/2018	Prise de vue	le Ploc	HAUTE-GARONNE	Cassagne	43.13283	0.99785	373	1055 - SAINT-GAUDENS	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Prise de vue sur un vaste plateau formé de parcelles en prairie ou en fitches. Aucun affleurement observé en bordure de chemin. Secteur d'intérêt pour la réalisation d'essais de perméabilité mais sans connaissance de la profondeur de la série
PP88	S.O.	14/02/2018	Affleurement	Bousigou	HAUTE-GARONNE	Cassagne	43.12084	0.99297	312	1055 - SAINT-GAUDENS	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme de niveaux grésux situés en talus de route en sortie du village. Niveaux grésux de teinte ocre-beige extrêmement altérés et friable en sables. Bancs grésux non continu mais apparaissant sous la forme de blocs non consolidés. Talus de route d'environ 3m de hauteur avec 2m de sol recouvrant le niveau grésux
PP89	N.D.	14/02/2018	Source	Les Pradex	HAUTE-GARONNE	Escouls	43.11756	1.04411	383	1055 - SAINT-GAUDENS	Indifférencié	Indifférencié	120	7.69	6.2	/	/	/	/	Mesures physico-chimiques au niveau d'une source recensée sur IGN apparaissant sous la forme d'écoulements diffus au niveau d'une ligne de collecte des eaux au sein d'une parcelle agricole en prairie. Ecoulements dominant naissance à une mouillère au niveau du point bas de la parcelle avec en sorte un ruisseau au débit important (plusieurs l/s). Mesures réalisées en période de pluie, influencées par les eaux de ruissellement du champ particulièrement importantes ce jour là. Valeur de conductivité relativement élevée témoignant probablement de pollutions par les nitrates. Jaugeage de la source intéressant en période d'étiage
PP90	S.O.	14/02/2018	Affleurement	Roche	ARIEGE	Cercizols	43.11976	1.05321	409	1055 - SAINT-GAUDENS	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme d'un niveau mameux situé en talus de route. Marnes de teinte blanchâtre à beige contenant de très nombreux cailloux de quartz et de quartzites de taille inférieure à 1cm. Présence d'un horizon de sol d'environ 1m de puissance
PP91	S.O.	14/02/2018	Affleurement	Charblanc	ARIEGE	Cercizols	43.12249	1.05519	388	1055 - SAINT-GAUDENS	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme d'un niveau mameux au niveau d'un talus de route. Marnes bariolées de teinte gris-blanc-beige contenant de très nombreux cailloux de calcaires et de quartz. Présence d'un niveau de conglomérats à matrice mame-grésuse non indurée. Conglomérats formés de galets de calcaires et de quartz de taille cm à dm. Présence d'un horizon de sol d'environ 1 à 2m de puissance
PP92	S.O.	14/02/2018	Affleurement	Château de Montbrun	ARIEGE	Montbrun-Bocage	43.12842	1.27018	285	1056 - LE MAS-D'AZIL	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de niveaux de poudingues indifférenciés dans la série de Pallassou situés au pied du château de Montbrun. Matrice grés-carbonatée à grains grossiers indurée de teinte rose-rouge. Conglomérats comprenant de très nombreux éléments de taille variable (graviers à galets) et de nature diverse (calcaires, quartz...)
PP93	S.O.	14/02/2018	Affleurement	Cassé	ARIEGE	Campagne-sur-Arize	43.11879	1.32185	328	1056 - LE MAS-D'AZIL	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme d'un niveau grésux en bordure de chemin d'environ 1 m de hauteur. Banc de grés à grains grossiers indurés de teinte beige-gris. Affleurement altéré en surface rindant la route riade. Absence d'affleurement en bordure de chemin (venant argomameux) dans un secteur vallonné avec des parcelles bosseuses ou en prairie
PP94	S.O.	06/04/2018	Affleurement	Bord de route D13 - Cazalet	ARIEGE	Bessé	43.0571	1.84379		1058 - MIREPOIX	2 <sup>e</sup> unité	Poudingue de Dur-Roumenguou-Cauderal	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de marnes indurées de teinte ocre-rosée se déchant en plaquettes. Site sélectionné pour la réalisation d'un essai de perméabilité au perméamètre de Guelph
PP95	S.O.	10/04/2018	Affleurement	Le Courtalet	ARIEGE	Pailhès	43.08002	1.44105	377	1057 - PAMIEERS	1 <sup>re</sup> unité	Couches de Lérans-Lagarde	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme de niveaux mameux très plastiques avec présence de cailloux de quartz. Marnes de teinte ocre à passées grés plus indurées. Site sélectionné pour la réalisation d'un essai de perméabilité au perméamètre de Guelph
PP96	S.O.	10/04/2018	Affleurement	Loudas	ARIEGE	Campagne-sur-Arize	43.12004	1.32710	328	1056 - LE MAS-D'AZIL	Indifférencié	Indifférencié	/	/	/	/	/	/	/	Affleurement de la série de Pallassou sous la forme de niveaux mame-sabloux de teinte ocre. Site sélectionné pour la réalisation d'un essai de perméabilité au perméamètre de Guelph

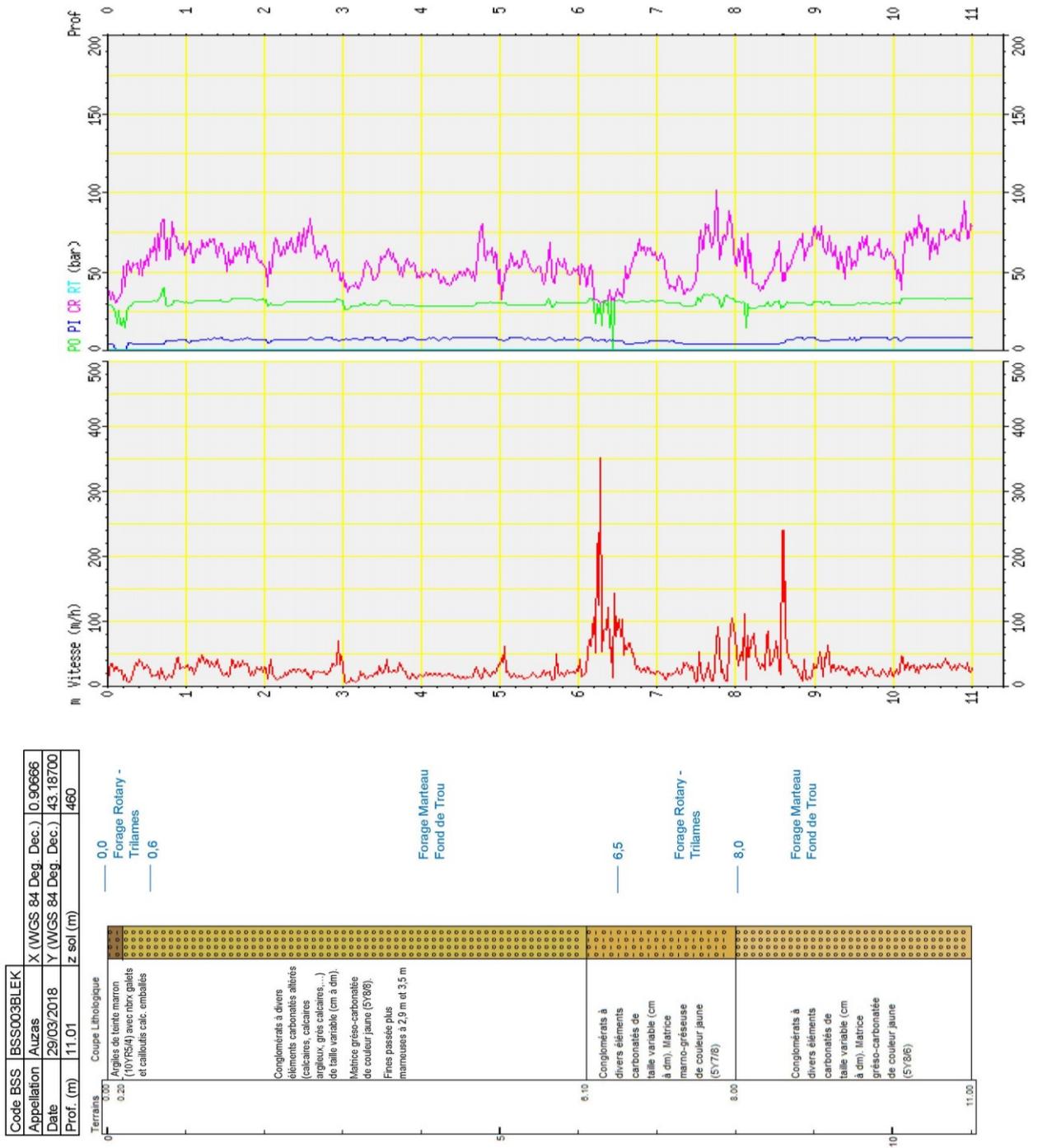
## **Annexe 9**

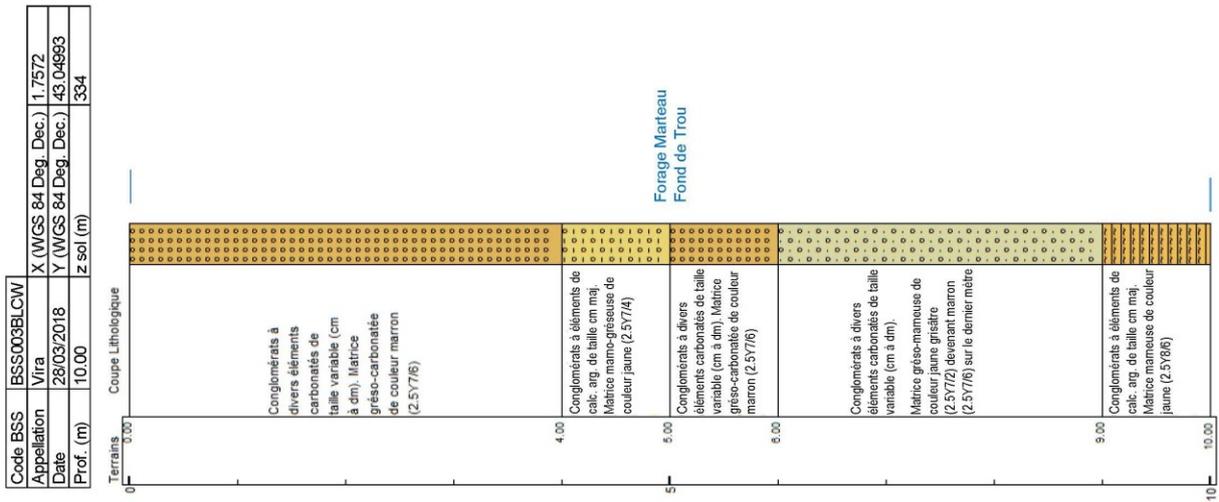
# **Levés géologiques et paramètres de forage des 7 sondages forés pour la mise en œuvre des essais de perméabilité de la formation des poudingues de Palassou**

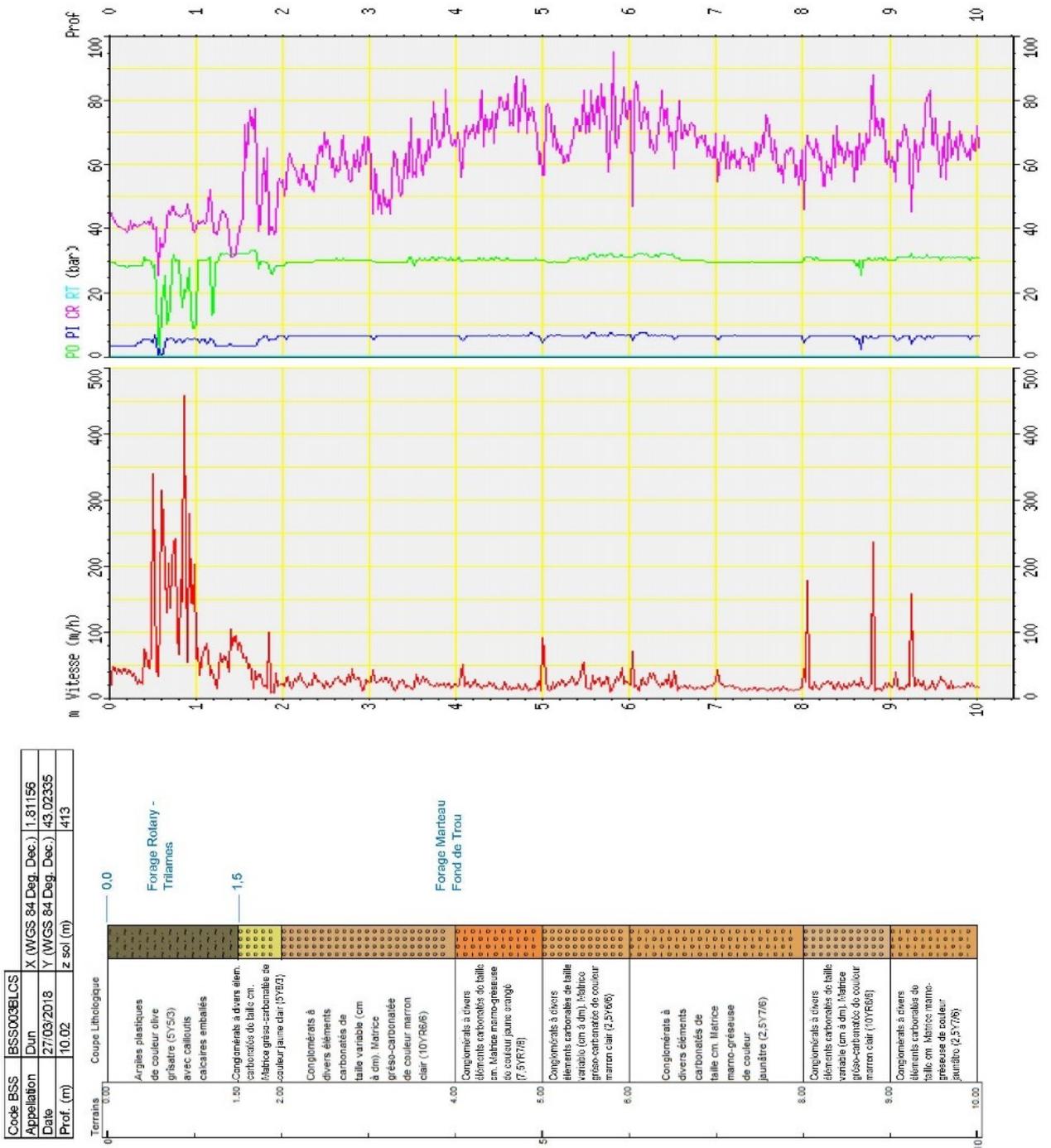


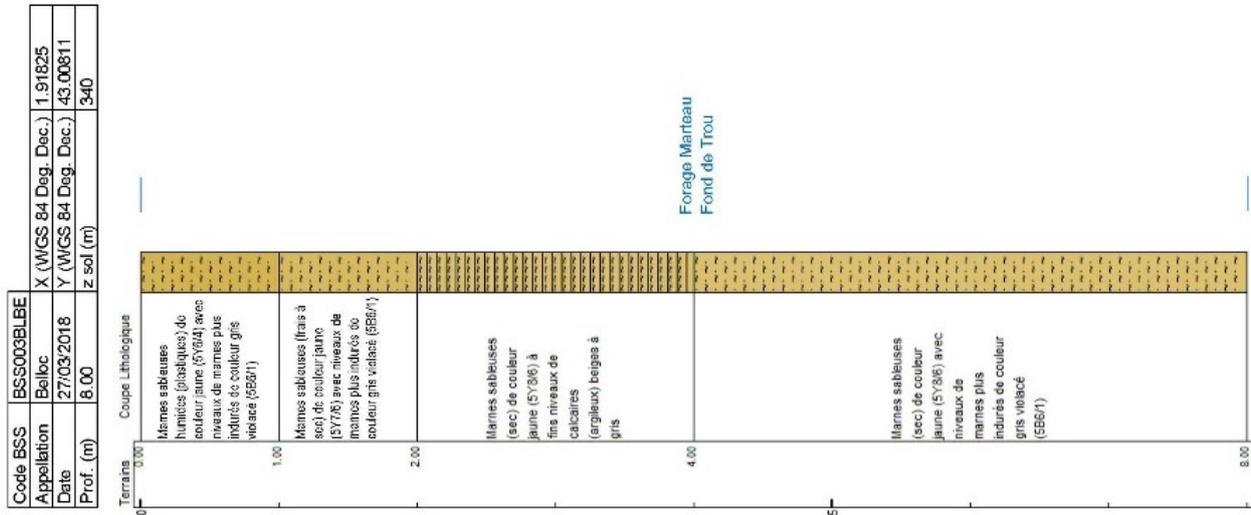




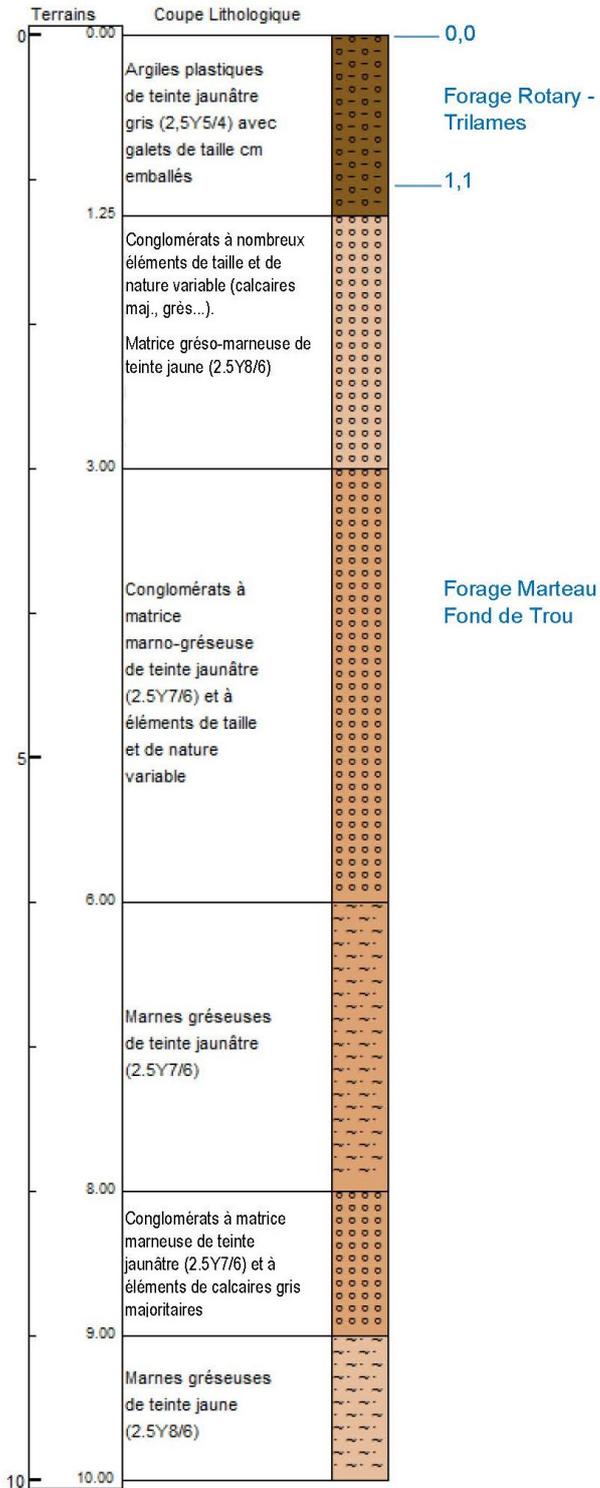








Code BSS	BSS003BLBY		
Appellation	Limbrassac	X (WGS 84 Deg. Dec.)	1,86240
Date	26/03/2018	Y (WGS 84 Deg. Dec.)	43,00489
Prof. (m)	10.00	z sol (m)	527





## **Annexe 10**

### **Fiches de synthèse de l'ensemble des sites de mesures de la perméabilité de la formation des poudingues de Palassou par la méthode du perméamètre de Guelph**



❖ **PT GAIA PA08**

➤ Reconnaissance préalable aux mesures d'infiltration

Carte géologique : 1076 (Lavelanet)

Formation géologique concernée :

- **e3c-5(a)** (1076) ou **e4-5(1)** (Harmonis. 09) : Couches de Léran – Marnes dominantes. Eocène inférieur (Ilerdien sup. à Lutétien). Formation de 150 à 200 m de puissance correspondant à une série de dépressions établies au pied des pechs. Marnes ocre au sein desquelles s'intercalent des décharges détritiques.

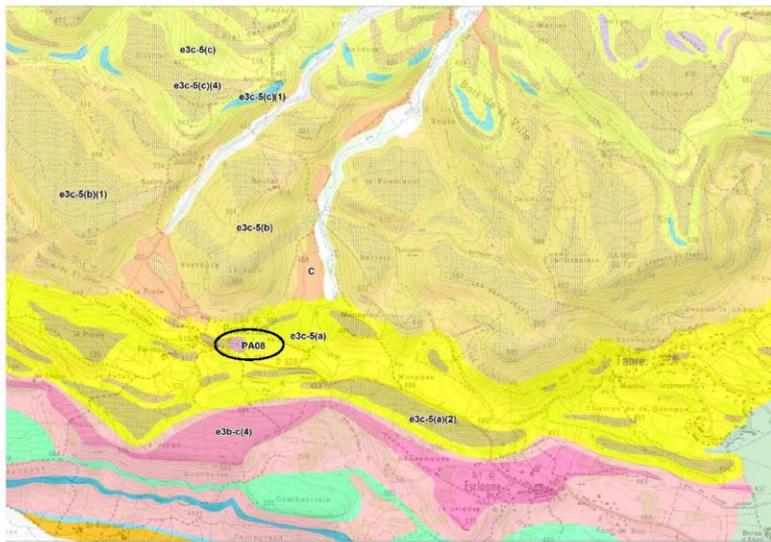


Figure 1 – Contexte géologique du site GAIA PA08 (carte géologique à 1/50000 de Lavelanet)

**Observations Octobre 2017** : Affleurement de talus de route de marnes argileuses de teinte ocre à grise. Ruisseau de Nazaut à sec prenant naissance dans les formations de l'unité 1 situé en contrebas à environ 700 m de distance.

**Sélection du site et intérêt de l'essai** : Site permettant de caractériser le faciès marneux des couches de Léran sur la feuille de Lavelanet.

**Contexte de mise en œuvre de l'essai** : Site de mesures sélectionné au niveau du talus de route nécessitant de réaliser un pré-trou à la pelle pour faciliter l'accès direct aux marnes. Faible épaisseur de sol, estimé à environ 50 cm.



Figure 2 – Photographies de l'affleurement du site GAIA PP08 (observations octobre 2017)

➤ Caractérisation pédologique de la formation

Numéro Projet	<b>GAIA PA08</b>
Opérateurs	MD
Date	06/04/2018
Condition Météo	Couvert

Nombre d'essai	3
Epaisseur Sol décaissé	20 à 40 cm
Profondeur Trou de tarière	42 à 45 cm
Occupation du sol	Friche
Position du site de mesure	Lisière de bosquet / Talus de route

Numéro Profil	Profondeur reconnue		Texture				Couleur matrice (Charte Munsell)
	Haut	Bas	A%	L%	S%	Geppa	
GAIA_PA08-1	20	45	< 30	> 55	< 15	LAS	5Y 7/8 (Jaune)

Compacité	Structure	Humidité	MO	Eléments grossiers			
				%T	Nature	Taille	Forme
Compact	Non déterminé	Frais	Présence	Très peu nombreux	Calcaire	Graviers	Arrondis

**Photographies**



➤ Mesures d'infiltration

<b>Numéro :</b>	<b>PA08</b>
<b>Date :</b>	<b>06/04/2018</b>
<b>Longitude X :</b>	<b>42.9896</b>
<b>Latitude Y :</b>	<b>1.8229</b>
<b>Météo :</b>	<b>Nuageux</b>

<b>Nombre Essai :</b>	<b>3</b>
<b>Kfs moyen (m/s)</b>	<b>2.13E-08</b>
<b>φm moyen (cm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>1.80E-06</b>
<b>Kfs min (m/s)</b>	<b>1.00E-08</b>
<b>Kfs max (m/s)</b>	<b>3.55E-08</b>
<b>α moyen (1/cm)</b>	<b>1.18E-02</b>

Avec :

Kfs : Conductivité hydraulique de champs à saturation

φm : Potentiel hydrique

<p>Essai 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Paramètres Essai 1</th> <th colspan="2">Résultats Essai 1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>45</td> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.00022 cm/s</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>20</td> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00050 cm/s</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> <td><b>Kfs = 1.83E-06 cm/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> <td><b>Kfs = 1.83E-08 m/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> <td><b>φm = 1.86E-06 cm<sup>2</sup>/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Paramètres Essai 1		Résultats Essai 1		Profondeur Trou (cm)	45	R1 (5 cm)	0.00022 cm/s	Profondeur Fouille (cm)	20	R2 (10 cm)	0.00050 cm/s	Diamètre Trou (cm)	6	<b>Kfs = 1.83E-06 cm/s</b>		Réservoir utilisé	Interne seul	<b>Kfs = 1.83E-08 m/s</b>		Constante X du réservoir	35,220	<b>φm = 1.86E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>		Constante Y du réservoir	2,150			
Paramètres Essai 1		Résultats Essai 1																											
Profondeur Trou (cm)	45	R1 (5 cm)	0.00022 cm/s																										
Profondeur Fouille (cm)	20	R2 (10 cm)	0.00050 cm/s																										
Diamètre Trou (cm)	6	<b>Kfs = 1.83E-06 cm/s</b>																											
Réservoir utilisé	Interne seul	<b>Kfs = 1.83E-08 m/s</b>																											
Constante X du réservoir	35,220	<b>φm = 1.86E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>																											
Constante Y du réservoir	2,150																												
<p>Essai 2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Paramètres Essai 2</th> <th colspan="2">Résultats Essai 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>43</td> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000167 cm/s</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>25</td> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00033 cm/s</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> <td><b>Kfs = 1.00E-06 cm/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> <td><b>Kfs = 1.00E-08 m/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> <td><b>φm = 3.51E-06 cm<sup>2</sup>/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Paramètres Essai 2		Résultats Essai 2		Profondeur Trou (cm)	43	R1 (5 cm)	0.000167 cm/s	Profondeur Fouille (cm)	25	R2 (10 cm)	0.00033 cm/s	Diamètre Trou (cm)	6	<b>Kfs = 1.00E-06 cm/s</b>		Réservoir utilisé	Interne seul	<b>Kfs = 1.00E-08 m/s</b>		Constante X du réservoir	35,220	<b>φm = 3.51E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>		Constante Y du réservoir	2,150			
Paramètres Essai 2		Résultats Essai 2																											
Profondeur Trou (cm)	43	R1 (5 cm)	0.000167 cm/s																										
Profondeur Fouille (cm)	25	R2 (10 cm)	0.00033 cm/s																										
Diamètre Trou (cm)	6	<b>Kfs = 1.00E-06 cm/s</b>																											
Réservoir utilisé	Interne seul	<b>Kfs = 1.00E-08 m/s</b>																											
Constante X du réservoir	35,220	<b>φm = 3.51E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>																											
Constante Y du réservoir	2,150																												
<p>Essai 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Paramètres Essai 3</th> <th colspan="2">Résultats Essai 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>42</td> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000833 cm/s</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>40</td> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00150 cm/s</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> <td><b>Kfs = 3.55E-06 cm/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> <td><b>Kfs = 3.55E-08 m/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> <td><b>φm = 2.61E-05 cm<sup>2</sup>/s</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Paramètres Essai 3		Résultats Essai 3		Profondeur Trou (cm)	42	R1 (5 cm)	0.000833 cm/s	Profondeur Fouille (cm)	40	R2 (10 cm)	0.00150 cm/s	Diamètre Trou (cm)	6	<b>Kfs = 3.55E-06 cm/s</b>		Réservoir utilisé	Interne seul	<b>Kfs = 3.55E-08 m/s</b>		Constante X du réservoir	35,220	<b>φm = 2.61E-05 cm<sup>2</sup>/s</b>		Constante Y du réservoir	2,150			
Paramètres Essai 3		Résultats Essai 3																											
Profondeur Trou (cm)	42	R1 (5 cm)	0.000833 cm/s																										
Profondeur Fouille (cm)	40	R2 (10 cm)	0.00150 cm/s																										
Diamètre Trou (cm)	6	<b>Kfs = 3.55E-06 cm/s</b>																											
Réservoir utilisé	Interne seul	<b>Kfs = 3.55E-08 m/s</b>																											
Constante X du réservoir	35,220	<b>φm = 2.61E-05 cm<sup>2</sup>/s</b>																											
Constante Y du réservoir	2,150																												

Avec,

R1, R2 : Taux d'écoulement en régime permanent correspondant respectivement à la charge hydraulique H1 de 5 cm et à la charge hydraulique H2 de 10 cm

❖ **PT GAIA PA09**

➤ Reconnaissance préalable aux mesures d'infiltration

Carte géologique : 1058 (Mirepoix)

Formation géologique concernée :

- **g1-2a** (1058) ou **g1(2)** (Harmonis. 09) : Molasses et Marnes. Oligocène inférieur (Rupélien). Molasses argileuses, sables molassiques et bancs de cailloutis de faibles dimensions.

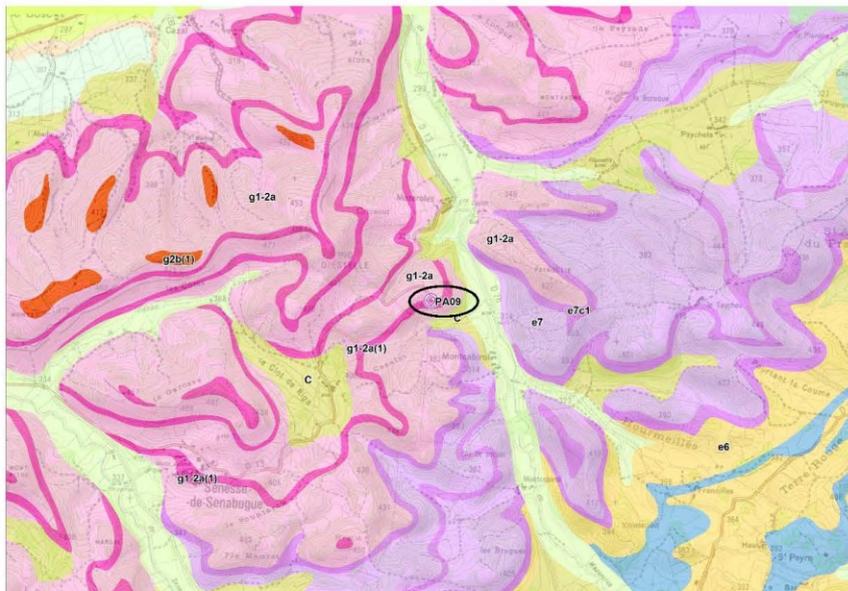


Figure 3 – Contexte géologique du site GAIA PA09 (carte géologique à 1/50000 de Mirepoix)

**Observations Avril 2018** : Affleurement de marnes indurées de teinte ocre-rosée se débitant en plaquettes. Site sélectionné pour la réalisation d'un essai de perméabilité au perméamètre de Guelph.

**Sélection du site et intérêt de l'essai** : Site permettant de caractériser le faciès marneux de la formation des Poudingues de Dun-Roumengoux-Caudeval sur la feuille de Mirepoix.

**Contexte de mise en œuvre de l'essai** : Site de mesures sélectionné au niveau du talus de route nécessitant de réaliser un pré-trou à la pelle pour faciliter l'accès direct aux marnes. Très faible épaisseur de sol, estimé à environ 20 cm.



Figure 4 – Photographies de l'affleurement du site GAIA PP09 (observations avril 2018)

➤ Caractérisation pédologique de la formation

Numéro Projet	<b>GAIA PA09</b>
Opérateurs	MD
Date	12/04/2018
Condition Météo	Nuageux

Nombre d'essai	3
Epaisseur Sol décaissé	20 à 25 cm
Profondeur Trou de tarière	41 à 43 cm
Occupation du sol	Prairie
Position du site de mesure	Talus de route

Numéro Profil	Profondeur reconnue		Texture				Couleur matrice (Charte Munsell)
	Haut	Bas	A%	L%	S%	Geppa	
GAIA_PA09-1	25	42	< 30	< 20	> 50	AS	2.5Y - 7/6

Compacité	Structure	Humidité	MO	Éléments grossiers			
				%T	Nature	Taille	Forme
Peu compact	Non déterminé	Frais	Absence	Très peu nombreux	Calcaire	Graviers	Arrondis

**Photographies**



➤ Mesures d'infiltration

<b>Numéro :</b>	<b>PA09</b>
Date :	12/04/2018
Longitude X :	43.05704
Latitude Y :	1.84377
Météo :	Nuageux

Nombre Essai :	3
Kfs moyen (m/s)	1.93E-08
$\phi_m$ moyen (cm <sup>2</sup> /s)	1.52E-06
Kfs min (m/s)	1.00E-08
Kfs max (m/s)	2.54E-08
$\alpha$ moyen (1/cm)	1.27E-02

Avec :

Kfs : Conductivité hydraulique de champs à saturation

$\phi_m$  : Potentiel hydrique

<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 1</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35.220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2.150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Résultats Essai 1</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.00017 cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00033 cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>1.00E-06 cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>1.00E-08 m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b><math>\phi_m</math> =</b></td> <td><b>3.51E-06 cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Essai 1		Paramètres Essai 1		Profondeur Trou (cm)	42	Profondeur Fouille (cm)	25	Diamètre Trou (cm)	5	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35.220	Constante Y du réservoir	2.150	Résultats Essai 1		R1 (5 cm)	0.00017 cm/s	R2 (10 cm)	0.00033 cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>1.00E-06 cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>1.00E-08 m/s</b>	<b><math>\phi_m</math> =</b>	<b>3.51E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>	
Essai 1																													
Paramètres Essai 1																													
Profondeur Trou (cm)	42																												
Profondeur Fouille (cm)	25																												
Diamètre Trou (cm)	5																												
Réservoir utilisé	Interne seul																												
Constante X du réservoir	35.220																												
Constante Y du réservoir	2.150																												
Résultats Essai 1																													
R1 (5 cm)	0.00017 cm/s																												
R2 (10 cm)	0.00033 cm/s																												
<b>Kfs =</b>	<b>1.00E-06 cm/s</b>																												
<b>Kfs =</b>	<b>1.00E-08 m/s</b>																												
<b><math>\phi_m</math> =</b>	<b>3.51E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>																												
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 2</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 2</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35.220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2.150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Résultats Essai 2</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.00025 cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00058 cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>2.24E-06 cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>2.24E-08 m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b><math>\phi_m</math> =</b></td> <td><b>1.02E-06 cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Essai 2		Paramètres Essai 2		Profondeur Trou (cm)	41	Profondeur Fouille (cm)	20	Diamètre Trou (cm)	5	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35.220	Constante Y du réservoir	2.150	Résultats Essai 2		R1 (5 cm)	0.00025 cm/s	R2 (10 cm)	0.00058 cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>2.24E-06 cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>2.24E-08 m/s</b>	<b><math>\phi_m</math> =</b>	<b>1.02E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>	
Essai 2																													
Paramètres Essai 2																													
Profondeur Trou (cm)	41																												
Profondeur Fouille (cm)	20																												
Diamètre Trou (cm)	5																												
Réservoir utilisé	Interne seul																												
Constante X du réservoir	35.220																												
Constante Y du réservoir	2.150																												
Résultats Essai 2																													
R1 (5 cm)	0.00025 cm/s																												
R2 (10 cm)	0.00058 cm/s																												
<b>Kfs =</b>	<b>2.24E-06 cm/s</b>																												
<b>Kfs =</b>	<b>2.24E-08 m/s</b>																												
<b><math>\phi_m</math> =</b>	<b>1.02E-06 cm<sup>2</sup>/s</b>																												
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 3</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 3</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35.220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2.150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Résultats Essai 3</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.00067 cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00117 cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Ks =</b></td> <td><b>2.54E-06 cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Ks =</b></td> <td><b>2.54E-08 m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b><math>\phi_m</math> =</b></td> <td><b>2.25E-05 cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Essai 3		Paramètres Essai 3		Profondeur Trou (cm)	43	Profondeur Fouille (cm)	21	Diamètre Trou (cm)	5	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35.220	Constante Y du réservoir	2.150	Résultats Essai 3		R1 (5 cm)	0.00067 cm/s	R2 (10 cm)	0.00117 cm/s	<b>Ks =</b>	<b>2.54E-06 cm/s</b>	<b>Ks =</b>	<b>2.54E-08 m/s</b>	<b><math>\phi_m</math> =</b>	<b>2.25E-05 cm<sup>2</sup>/s</b>	
Essai 3																													
Paramètres Essai 3																													
Profondeur Trou (cm)	43																												
Profondeur Fouille (cm)	21																												
Diamètre Trou (cm)	5																												
Réservoir utilisé	Interne seul																												
Constante X du réservoir	35.220																												
Constante Y du réservoir	2.150																												
Résultats Essai 3																													
R1 (5 cm)	0.00067 cm/s																												
R2 (10 cm)	0.00117 cm/s																												
<b>Ks =</b>	<b>2.54E-06 cm/s</b>																												
<b>Ks =</b>	<b>2.54E-08 m/s</b>																												
<b><math>\phi_m</math> =</b>	<b>2.25E-05 cm<sup>2</sup>/s</b>																												

Avec,

R1, R2 : Taux d'écoulement en régime permanent correspondant respectivement à la charge hydraulique H1 de 5 cm et à la charge hydraulique H2 de 10 cm



➤ Caractérisation pédologique de la formation

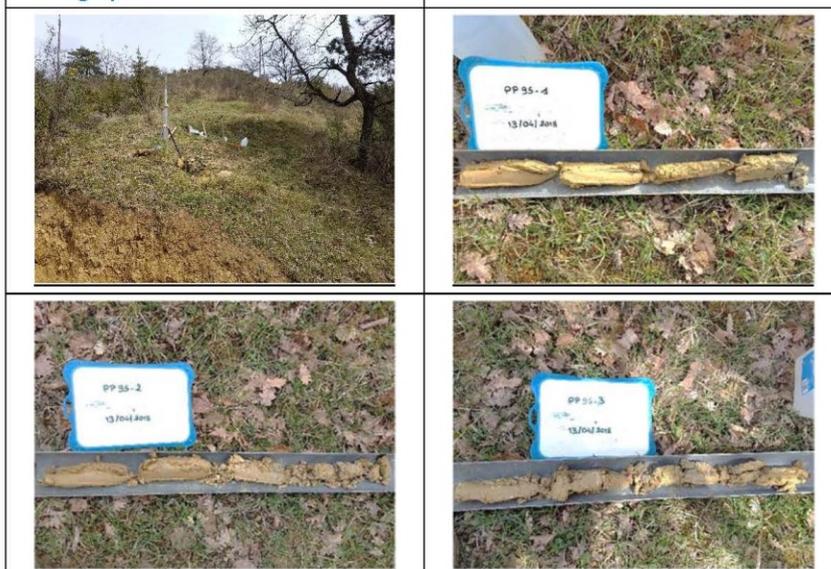
Numéro Projet	<b>GAIA PA10</b>
Opérateurs	MD
Date	13/04/2018
Condition Météo	Ensoleillé

Nombre d'essai	<b>3</b>
Epaisseur Sol décaissé	24 à 27 cm
Profondeur Trou de tarière	49 à 52 cm
Occupation du sol	Friche
Position du site de mesure	Talus de chemin

Numéro Profil	Profondeur reconnue		Texture				Couleur matrice (Charte Munsell)
	Haut	Bas	A%	L%	S%	Geppa	
GAIA_PA10-1	27	49	< 30	>55	<15	LAS	5Y - 6/6
GAIA_PA10-3	24	52	< 30	>55	<15	LAS	5Y - 7/8

Compacité	Structure	Humidité	MO	Eléments grossiers			
				%T	Nature	Taille	Forme
Très compact	Non déterminé	Frais	Absence	Très peu nombreux	Calcaire	Graviers	Arrondis
Très compact	Non déterminé	Frais	Absence	Très peu nombreux	Calcaire	Graviers	De formes diverses

**Photographies**



➤ Mesures d'infiltration

<b>Numéro :</b>	<b>PA10</b>
Date :	13/04/2018
Longitude X :	43.08002
Latitude Y :	1.44105
Météo :	Ensoleillé

Nombre Essai :	3
Kfs moyen (m/s)	2.64E-08
$\phi m$ moyen (cm <sup>2</sup> /s)	2.67E-06
Kfs min (m/s)	2.44E-08
Kfs max (m/s)	2.74E-08
$\alpha$ moyen (1/cm)	9.90E-03

Avec :

Kfs : Conductivité hydraulique de champs à saturation

$\phi m$  : Potentiel hydrique

<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 1</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>49</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>27</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="3">Résultats Essai 1</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000296</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00067</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>Kfs =</td> <td>2.44E-08</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>Kfs =</td> <td>2.44E-08</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td><math>\phi m</math> =</td> <td>2.45E-06</td> <td>cm<sup>2</sup>/s</td> </tr> </table>	Essai 1		Paramètres Essai 1		Profondeur Trou (cm)	49	Profondeur Fouille (cm)	27	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35,220	Constante Y du réservoir	2,150	Résultats Essai 1			R1 (5 cm)	0.000296	cm/s	R2 (10 cm)	0.00067	cm/s	Kfs =	2.44E-08	cm/s	Kfs =	2.44E-08	m/s	$\phi m$ =	2.45E-06	cm <sup>2</sup> /s	
Essai 1																																			
Paramètres Essai 1																																			
Profondeur Trou (cm)	49																																		
Profondeur Fouille (cm)	27																																		
Diamètre Trou (cm)	6																																		
Réservoir utilisé	Interne seul																																		
Constante X du réservoir	35,220																																		
Constante Y du réservoir	2,150																																		
Résultats Essai 1																																			
R1 (5 cm)	0.000296	cm/s																																	
R2 (10 cm)	0.00067	cm/s																																	
Kfs =	2.44E-08	cm/s																																	
Kfs =	2.44E-08	m/s																																	
$\phi m$ =	2.45E-06	cm <sup>2</sup> /s																																	
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 2</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 2</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>51</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="3">Résultats Essai 2</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000333</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00075</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>Kfs =</td> <td>2.74E-06</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>Kfs =</td> <td>2.74E-08</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td><math>\phi m</math> =</td> <td>2.78E-06</td> <td>cm<sup>2</sup>/s</td> </tr> </table>	Essai 2		Paramètres Essai 2		Profondeur Trou (cm)	51	Profondeur Fouille (cm)	24	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35,220	Constante Y du réservoir	2,150	Résultats Essai 2			R1 (5 cm)	0.000333	cm/s	R2 (10 cm)	0.00075	cm/s	Kfs =	2.74E-06	cm/s	Kfs =	2.74E-08	m/s	$\phi m$ =	2.78E-06	cm <sup>2</sup> /s	
Essai 2																																			
Paramètres Essai 2																																			
Profondeur Trou (cm)	51																																		
Profondeur Fouille (cm)	24																																		
Diamètre Trou (cm)	6																																		
Réservoir utilisé	Interne seul																																		
Constante X du réservoir	35,220																																		
Constante Y du réservoir	2,150																																		
Résultats Essai 2																																			
R1 (5 cm)	0.000333	cm/s																																	
R2 (10 cm)	0.00075	cm/s																																	
Kfs =	2.74E-06	cm/s																																	
Kfs =	2.74E-08	m/s																																	
$\phi m$ =	2.78E-06	cm <sup>2</sup> /s																																	
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 3</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 3</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>52</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="3">Résultats Essai 3</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000333</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00075</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>Kfs =</td> <td>2.74E-06</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>Kfs =</td> <td>2.74E-08</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td><math>\phi m</math> =</td> <td>2.78E-06</td> <td>cm<sup>2</sup>/s</td> </tr> </table>	Essai 3		Paramètres Essai 3		Profondeur Trou (cm)	52	Profondeur Fouille (cm)	24	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35,220	Constante Y du réservoir	2,150	Résultats Essai 3			R1 (5 cm)	0.000333	cm/s	R2 (10 cm)	0.00075	cm/s	Kfs =	2.74E-06	cm/s	Kfs =	2.74E-08	m/s	$\phi m$ =	2.78E-06	cm <sup>2</sup> /s	
Essai 3																																			
Paramètres Essai 3																																			
Profondeur Trou (cm)	52																																		
Profondeur Fouille (cm)	24																																		
Diamètre Trou (cm)	6																																		
Réservoir utilisé	Interne seul																																		
Constante X du réservoir	35,220																																		
Constante Y du réservoir	2,150																																		
Résultats Essai 3																																			
R1 (5 cm)	0.000333	cm/s																																	
R2 (10 cm)	0.00075	cm/s																																	
Kfs =	2.74E-06	cm/s																																	
Kfs =	2.74E-08	m/s																																	
$\phi m$ =	2.78E-06	cm <sup>2</sup> /s																																	

Avec,

R1, R2 : Taux d'écoulement en régime permanent correspondant respectivement à la charge hydraulique H1 de 5 cm et à la charge hydraulique H2 de 10 cm

❖ **PT GAIA PA11**

➤ Reconnaissance préalable aux mesures d'infiltration

Carte géologique : 1056 (Le Mas-d'Azil)

Formation géologique concernée :

- **e3b3-6p** (1056) ou **e4-6(2)** (Harmonis. 09) : Poudingues de Palassou s.s.. Poudingues, grès, calcaires. Eocène (Ilerdien moyen à Bartonien). Ensemble atteignant 1200 à 1300 m d'épaisseur, regroupant les formations des couches de Lassardane, Poudingue de Monséгур et couches de Goutte-Longue.

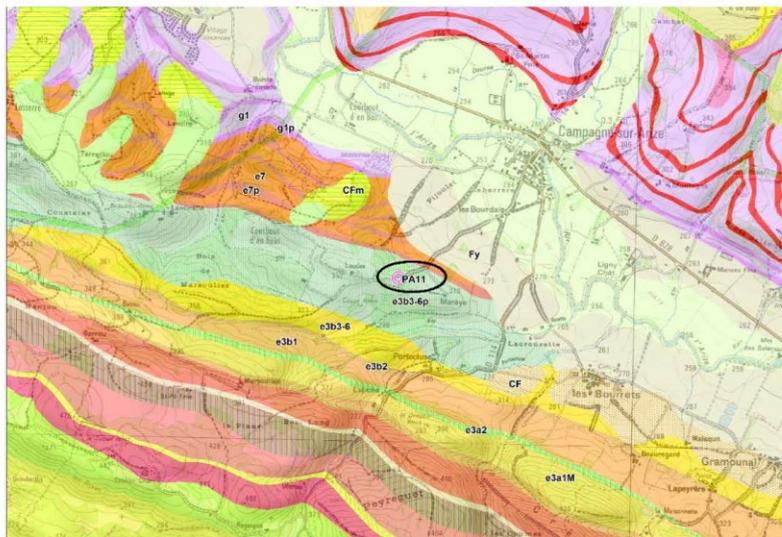


Figure 7 – Contexte géologique du site GAIA PA11 (carte géologique à 1/50000 de Le Mas-d'Azil)

**Observations Avril 2018** : Affleurement de la série de Palassou sous la forme de niveaux marnosableux de teinte ocre. Site sélectionné pour la réalisation d'un essai de perméabilité au perméamètre de Guelph

**Sélection du site et intérêt de l'essai** : Site permettant de caractériser le faciès marneux de la formation des Poudingues de Palassou indifférenciés sur la feuille du Mas-d'Azil.

**Contexte de mise en œuvre de l'essai** : Site de mesures sélectionné au niveau d'un bosquet nécessitant de réaliser un pré-trou à la pelle pour faciliter l'accès direct aux marnes. Faible épaisseur de sol, estimé à environ 40 cm.



Figure 8 – Photographies de l'affleurement du site GAIA PP11 (observations avril 2018)

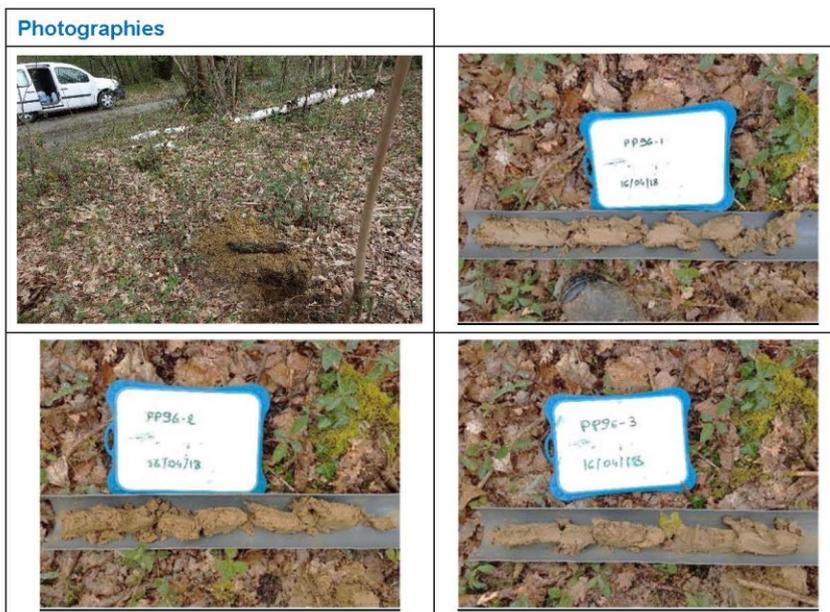
➤ Caractérisation pédologique de la formation

Numéro Projet	GAIA PA11
Opérateurs	MD
Date	16/04/2018
Condition Météo	Pluvieux

Nombre d'essai	3
Epaisseur Sol décaissé	26 à 29 cm
Profondeur Trou de tarière	41 à 45 cm
Occupation du sol	Bosquet
Position du site de mesure	Plateforme en contrehaut d'un talus de route

Numéro Profil	Profondeur reconnue		Texture				Couleur matrice (Charte Munsell)
	Haut	Bas	A%	L%	S%	Geppa	
GAIA_PA11-1	29	43	< 30	< 20	> 50	AS	5Y - 6/6

Compacité	Structure	Humidité	MO	Éléments grossiers			
				%T	Nature	Taille	Forme
Peu compact	Non déterminé	Très humide	Absence	Très peu nombreux	Divers, non calcaire	Graviers	Arrondis



➤ Mesures d'infiltration

<b>Numéro :</b>	<b>PA11</b>
Date :	16/04/2018
Longitude X :	43.12004
Latitude Y :	1.3271
Météo :	Pluvieux

Nombre Essai :	3
Kfs moyen (m/s)	5.91E-09
$\phi m$ moyen (cm <sup>2</sup> /s)	4.34E-06
Kfs min (m/s)	5.02E-09
Kfs max (m/s)	7.70E-09
$\alpha$ moyen (1/cm)	1.36E-03

Avec :

Kfs : Conductivité hydraulique de champs à saturation

$\phi m$  : Potentiel hydrique

<p>Essai 1</p> <table border="1"> <tr> <th colspan="2">Paramètres Essai 1</th> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35.220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2.150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <th colspan="3">Résultats Essai 1</th> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000083</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.000167</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>5.02E-07</b></td> <td><b>cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>5.02E-09</b></td> <td><b>m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b><math>\phi m</math> =</b></td> <td><b>1.76E-06</b></td> <td><b>cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Paramètres Essai 1		Profondeur Trou (cm)	43	Profondeur Fouille (cm)	29	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35.220	Constante Y du réservoir	2.150	Résultats Essai 1			R1 (5 cm)	0.000083	cm/s	R2 (10 cm)	0.000167	cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-07</b>	<b>cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-09</b>	<b>m/s</b>	<b><math>\phi m</math> =</b>	<b>1.76E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>	
Paramètres Essai 1																																	
Profondeur Trou (cm)	43																																
Profondeur Fouille (cm)	29																																
Diamètre Trou (cm)	6																																
Réservoir utilisé	Interne seul																																
Constante X du réservoir	35.220																																
Constante Y du réservoir	2.150																																
Résultats Essai 1																																	
R1 (5 cm)	0.000083	cm/s																															
R2 (10 cm)	0.000167	cm/s																															
<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-07</b>	<b>cm/s</b>																															
<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-09</b>	<b>m/s</b>																															
<b><math>\phi m</math> =</b>	<b>1.76E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>																															
<p>Essai 2</p> <table border="1"> <tr> <th colspan="2">Paramètres Essai 2</th> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35.220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2.150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <th colspan="3">Résultats Essai 2</th> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000083</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.000167</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>5.02E-07</b></td> <td><b>cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>5.02E-09</b></td> <td><b>m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b><math>\phi m</math> =</b></td> <td><b>1.76E-06</b></td> <td><b>cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Paramètres Essai 2		Profondeur Trou (cm)	45	Profondeur Fouille (cm)	26	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35.220	Constante Y du réservoir	2.150	Résultats Essai 2			R1 (5 cm)	0.000083	cm/s	R2 (10 cm)	0.000167	cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-07</b>	<b>cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-09</b>	<b>m/s</b>	<b><math>\phi m</math> =</b>	<b>1.76E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>	
Paramètres Essai 2																																	
Profondeur Trou (cm)	45																																
Profondeur Fouille (cm)	26																																
Diamètre Trou (cm)	6																																
Réservoir utilisé	Interne seul																																
Constante X du réservoir	35.220																																
Constante Y du réservoir	2.150																																
Résultats Essai 2																																	
R1 (5 cm)	0.000083	cm/s																															
R2 (10 cm)	0.000167	cm/s																															
<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-07</b>	<b>cm/s</b>																															
<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-09</b>	<b>m/s</b>																															
<b><math>\phi m</math> =</b>	<b>1.76E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>																															
<p>Essai 3</p> <table border="1"> <tr> <th colspan="2">Paramètres Essai 3</th> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35.220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2.150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <th colspan="3">Résultats Essai 3</th> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000250</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.000417</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>7.70E-07</b></td> <td><b>cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>7.70E-09</b></td> <td><b>m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b><math>\phi m</math> =</b></td> <td><b>9.51E-06</b></td> <td><b>cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Paramètres Essai 3		Profondeur Trou (cm)	41	Profondeur Fouille (cm)	29	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35.220	Constante Y du réservoir	2.150	Résultats Essai 3			R1 (5 cm)	0.000250	cm/s	R2 (10 cm)	0.000417	cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>7.70E-07</b>	<b>cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>7.70E-09</b>	<b>m/s</b>	<b><math>\phi m</math> =</b>	<b>9.51E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>	
Paramètres Essai 3																																	
Profondeur Trou (cm)	41																																
Profondeur Fouille (cm)	29																																
Diamètre Trou (cm)	6																																
Réservoir utilisé	Interne seul																																
Constante X du réservoir	35.220																																
Constante Y du réservoir	2.150																																
Résultats Essai 3																																	
R1 (5 cm)	0.000250	cm/s																															
R2 (10 cm)	0.000417	cm/s																															
<b>Kfs =</b>	<b>7.70E-07</b>	<b>cm/s</b>																															
<b>Kfs =</b>	<b>7.70E-09</b>	<b>m/s</b>																															
<b><math>\phi m</math> =</b>	<b>9.51E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>																															

Avec,

R1, R2 : Taux d'écoulement en régime permanent correspondant respectivement à la charge hydraulique H1 de 5 cm et à la charge hydraulique H2 de 10 cm

❖ **PT GAIA PA12**

➤ Reconnaissance préalable aux mesures d'infiltration

Carte géologique : 1055 (Saint-Gaudens)

Formation géologique concernée :

- **e6-4d** (1055) ou **e4-6** (Harmonis. 09) : Poudingues de Palassou s.s.. Poudingues, grès, calcaires. Eocène (Ilerdien moyen à Bartonien). Poudingues à galets presque exclusivement calcaires alternant avec des bancs de grès, des argiles et des niveaux molassiques.

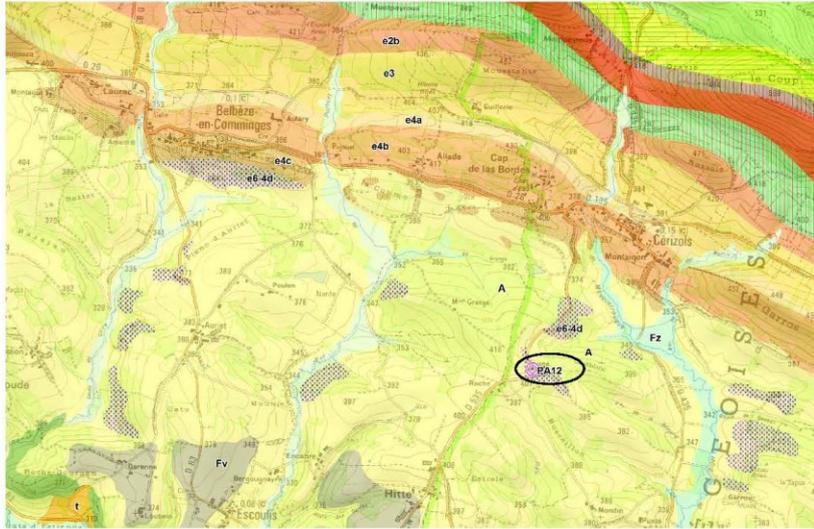


Figure 9 – Contexte géologique du site GAIA PA12 (carte géologique à 1/50000 de Saint-Gaudens)

**Observations Février 2018** : Affleurement de la série de Palassou sous la forme d'un niveau marneux au niveau d'un talus de route. Marnes de teinte blanche à beige contenant de très nombreux cailloutis de calcaires et de quartz. Présence d'un niveau inférieur contenant des galets de calcaires gréseux à débris fossilifères de taille dm. Présence d'un horizon de sol d'environ 1m de puissance

**Sélection du site et intérêt de l'essai** : Site permettant de caractériser le faciès marneux de la formation des Poudingues de Palassou indifférenciés sur la feuille de Saint-Gaudens.

**Contexte de mise en œuvre de l'essai** : Site de mesures sélectionné au niveau d'un talus de route nécessitant de réaliser un pré-trou à la pelle pour faciliter l'accès direct aux marnes. Faible épaisseur de sol, estimé à environ 30 cm.



Figure 10 – Photographies de l'affleurement du site GAIA PP12 (observations février 2018)

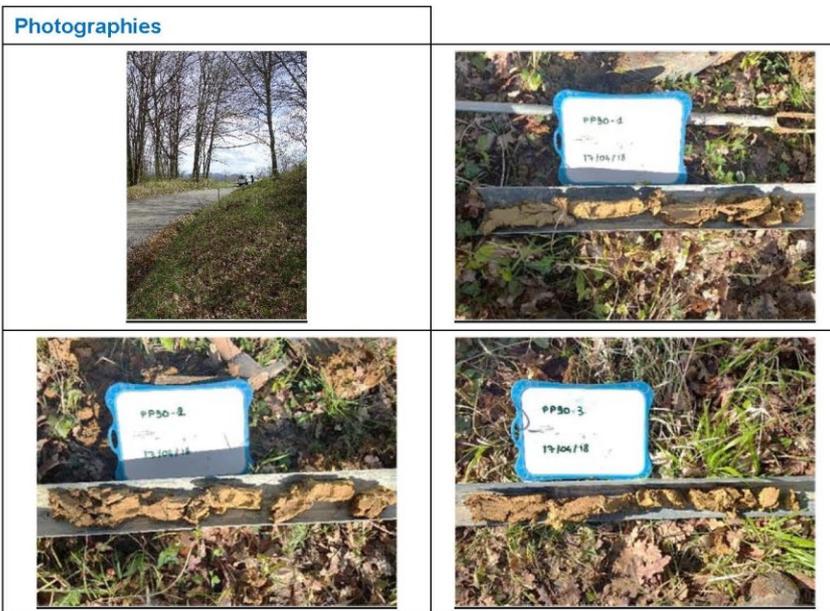
➤ Caractérisation pédologique de la formation

Numéro Projet	<b>GAIA PA12</b>
Opérateurs	MD
Date	17/04/2018
Condition Météo	Ensoleillé

Nombre d'essai	3
Epaisseur Sol décaissé	28 à 31 cm
Profondeur Trou de tarière	43 à 48 cm
Occupation du sol	Talus de route
Position du site de mesure	Contrehaut d'un talus de route

Numéro Profil	Profondeur reconnue		Texture				Couleur matrice (Charte Munsell)
	Haut	Bas	A%	L%	S%	Geppa	
GAIA_PA12-1	29	46	< 30	< 20	> 50	AS	2.5Y - 5/6

Compacité	Structure	Humidité	MO	Éléments grossiers			
				%T	Nature	Taille	Forme
Compact	Non déterminé	Frais	Absence	5 - 15	Calcaire	Graviers	De formes diverses



➤ Mesures d'infiltration

<b>Numéro :</b>	<b>PA12</b>
<b>Date :</b>	17/04/2018
<b>Longitude X :</b>	43.12002
<b>Latitude Y :</b>	1.05328
<b>Météo :</b>	Ensoleillé

<b>Nombre Essai :</b>	<b>3</b>
<b>Kfs moyen (m/s)</b>	<b>1.51E-08</b>
<b>φm moyen (cm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>5.27E-06</b>
<b>Kfs min (m/s)</b>	<b>5.02E-09</b>
<b>Kfs max (m/s)</b>	<b>2.01E-08</b>
<b>α moyen (1/cm)</b>	<b>2.86E-03</b>

Avec :

Kfs : Conductivité hydraulique de champs à saturation

φm : Potentiel hydrique

<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 1</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>46</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="3">Résultats Essai 1</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000333</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.000667</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>2.01E-06</b></td> <td><b>cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>2.01E-08</b></td> <td><b>m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>φm =</b></td> <td><b>7.02E-06</b></td> <td><b>cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Essai 1		Paramètres Essai 1		Profondeur Trou (cm)	46	Profondeur Fouille (cm)	29	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35,220	Constante Y du réservoir	2,150	Résultats Essai 1			R1 (5 cm)	0.000333	cm/s	R2 (10 cm)	0.000667	cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-06</b>	<b>cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-08</b>	<b>m/s</b>	<b>φm =</b>	<b>7.02E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>	
Essai 1																																			
Paramètres Essai 1																																			
Profondeur Trou (cm)	46																																		
Profondeur Fouille (cm)	29																																		
Diamètre Trou (cm)	6																																		
Réservoir utilisé	Interne seul																																		
Constante X du réservoir	35,220																																		
Constante Y du réservoir	2,150																																		
Résultats Essai 1																																			
R1 (5 cm)	0.000333	cm/s																																	
R2 (10 cm)	0.000667	cm/s																																	
<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-06</b>	<b>cm/s</b>																																	
<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-08</b>	<b>m/s</b>																																	
<b>φm =</b>	<b>7.02E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>																																	
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 2</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 2</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="3">Résultats Essai 2</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.000333</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.000667</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>2.01E-06</b></td> <td><b>cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>2.01E-08</b></td> <td><b>m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>φm =</b></td> <td><b>7.02E-06</b></td> <td><b>cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Essai 2		Paramètres Essai 2		Profondeur Trou (cm)	48	Profondeur Fouille (cm)	28	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35,220	Constante Y du réservoir	2,150	Résultats Essai 2			R1 (5 cm)	0.000333	cm/s	R2 (10 cm)	0.000667	cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-06</b>	<b>cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-08</b>	<b>m/s</b>	<b>φm =</b>	<b>7.02E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>	
Essai 2																																			
Paramètres Essai 2																																			
Profondeur Trou (cm)	48																																		
Profondeur Fouille (cm)	28																																		
Diamètre Trou (cm)	6																																		
Réservoir utilisé	Interne seul																																		
Constante X du réservoir	35,220																																		
Constante Y du réservoir	2,150																																		
Résultats Essai 2																																			
R1 (5 cm)	0.000333	cm/s																																	
R2 (10 cm)	0.000667	cm/s																																	
<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-06</b>	<b>cm/s</b>																																	
<b>Kfs =</b>	<b>2.01E-08</b>	<b>m/s</b>																																	
<b>φm =</b>	<b>7.02E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>																																	
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Essai 3</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Paramètres Essai 3</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Trou (cm)</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>Profondeur Fouille (cm)</td> <td>31</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Trou (cm)</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Réservoir utilisé</td> <td>Interne seul</td> </tr> <tr> <td>Constante X du réservoir</td> <td>35,220</td> </tr> <tr> <td>Constante Y du réservoir</td> <td>2,150</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="3">Résultats Essai 3</td> </tr> <tr> <td>R1 (5 cm)</td> <td>0.00008</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td>R2 (10 cm)</td> <td>0.00017</td> <td>cm/s</td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>5.02E-07</b></td> <td><b>cm/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>Kfs =</b></td> <td><b>5.02E-09</b></td> <td><b>m/s</b></td> </tr> <tr> <td><b>φm =</b></td> <td><b>1.76E-06</b></td> <td><b>cm<sup>2</sup>/s</b></td> </tr> </table>	Essai 3		Paramètres Essai 3		Profondeur Trou (cm)	43	Profondeur Fouille (cm)	31	Diamètre Trou (cm)	6	Réservoir utilisé	Interne seul	Constante X du réservoir	35,220	Constante Y du réservoir	2,150	Résultats Essai 3			R1 (5 cm)	0.00008	cm/s	R2 (10 cm)	0.00017	cm/s	<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-07</b>	<b>cm/s</b>	<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-09</b>	<b>m/s</b>	<b>φm =</b>	<b>1.76E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>	
Essai 3																																			
Paramètres Essai 3																																			
Profondeur Trou (cm)	43																																		
Profondeur Fouille (cm)	31																																		
Diamètre Trou (cm)	6																																		
Réservoir utilisé	Interne seul																																		
Constante X du réservoir	35,220																																		
Constante Y du réservoir	2,150																																		
Résultats Essai 3																																			
R1 (5 cm)	0.00008	cm/s																																	
R2 (10 cm)	0.00017	cm/s																																	
<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-07</b>	<b>cm/s</b>																																	
<b>Kfs =</b>	<b>5.02E-09</b>	<b>m/s</b>																																	
<b>φm =</b>	<b>1.76E-06</b>	<b>cm<sup>2</sup>/s</b>																																	

Avec,

R1, R2 : Taux d'écoulement en régime permanent correspondant respectivement à la charge hydraulique H1 de 5 cm et à la charge hydraulique H2 de 10 cm



## **Annexe 11**

### **Nappes profondes et effets de la température**



L'énergie géothermique produite par les couches internes, essentiellement par désintégration d'isotopes radioactifs (chaleur de désintégration) par le refroidissement de la terre depuis sa formation (chaleur initiale) et par la chaleur latente de cristallisation. Cette chaleur se dissipe sous forme de flux de chaleur vers la surface. Il en résulte une augmentation de la température en fonction de la profondeur à partir du sol. Pour quantifier ce phénomène, la notion de gradient géothermique est utilisée, le gradient géothermique moyen dans le Bassin aquitaine est de l'ordre de 3°C/100m qui correspond à un flux de chaleur égal à 63 mW.m<sup>-2</sup>.

En hydrologie, Schoeller (1961), définit verticalement dans les terrains, trois zones aux comportements thermiques différents se superposent :

- zone d'hétérothermie : zone de rencontre entre les flux d'origines interne et externe où la température varie dans le temps selon la profondeur;
- une zone " neutre " : située entre les deux zones précédentes, la température est admise comme constante et proche de la température moyenne annuelle de l'air ;
- homothermique : la température ne fluctue pas et est sous l'influence du flux géothermique.

Les modes de transfert de la chaleur dans les sols sont les suivants :

- **conduction thermique** : ce mode de transfert correspond à un transfert direct au sein des roches (propagation de chaleur de proche en proche). Ce transfert thermique moléculaire est donc réalisé par échange d'énergie cinétique sous l'effet d'un gradient thermique sans déplacement appréciable de particules. Ce transfert est décrit par la loi de Fourier (1822), a lieu même en l'absence de toute circulation de fluide. Ce transfert est lié à la conductivité thermique du milieu (roches)

$$\vec{\Psi}_{cond} = -\bar{\lambda} \cdot \overrightarrow{grad} \theta$$

Avec :

$\vec{\Psi}_{cond}$  : flux conductif de chaleur [M.T<sup>-3</sup>],

$\lambda$  : conductivité thermique du milieu [M.L.T<sup>-3</sup>.Θ<sup>-1</sup>],

$\theta$  : température [Θ].

Dans les aquifères, les mouvements de fluides peuvent également transférer de la chaleur par convection thermique. Ce processus de transfert thermique est induit par perturbation de la distribution des températures par un gradient de pesanteur avec déplacement appréciable des particules (différence de densité créée par la différence de température). La convection, associée au mouvement d'un fluide, est régie par l'équation suivante :

$$\vec{\Psi}_{conv} = (\rho_f C_f) \cdot \frac{\vec{U}}{\omega_c} \cdot \overrightarrow{grad} \theta$$

$\vec{\Psi}_{conv}$  : flux convectif [ $M.T^{-3}$ ].

$\rho_f$  : masse volumique du fluide [ $M.L^{-3}$ ],

$C_f$  : capacité calorifique massique du fluide [ $L^2.T^2.\Theta^{-1}$ ],

$\vec{U}$  : vitesse de Darcy du fluide [ $L.T^{-1}$ ],

$\omega_c$  : porosité cinématique du milieu [-].

- **advection** : ce mode de transport de chaleur est induit par un gradient d'écoulement de fluide en l'absence de conduction.

Ces différents types de transfert de chaleur peuvent coexister au sein d'un même aquifère. Le flux thermique total est égal à la somme du flux conductif et du flux convectif ( $\vec{\Psi} = \vec{\Psi}_{cond} + \vec{\Psi}_{conv}$ )

Dans les aquifères, on considère, en raison des vitesses d'écoulement relativement lentes, que la température de l'eau se met instantanément en équilibre avec celle de la roche. Il n'existe alors qu'une seule température dans le milieu poreux (Houpeurt et al. (1965)).

A noter que lors d'un pompage d'où ouvrage profond la colonne d'eau va se réchauffer (et prendre globalement la température de fond). Cette colonne d'eau plus chaude va donc de proche en proche transférer de la chaleur aux terrains traversés.

## **Annexe 12**

### **Calcul de la charge d'eau douce équivalente à la charge mesurée à chaud (J.J. Seguin)**



## INTRODUCTION

Dans la pratique courante de l'hydrodynamique souterraine, on traite les problèmes en considérant que la masse volumique de l'eau reste constante (fluide incompressible) ; cela se justifie en effet dans la mesure où la plupart des nappes auxquelles on s'intéresse sont peu profondes et peu minéralisées. Dans ce cas, la variable descriptive des écoulements est la charge hydraulique définie, par rapport à un plan de référence, comme la somme d'un terme de pression et d'un terme gravitaire.

Les cartes piézométriques sont établies à partir de cette charge hydraulique, qui correspond à la cote du niveau de l'eau mesurée dans un piézomètre. Conformément à la loi de Darcy, les directions d'écoulement sont alors orthogonales aux courbes isopièzes (si le milieu n'est pas anisotrope).

Par contre, cette hypothèse de masse volumique constante doit être abandonnée dès lors que la température et la salinité peuvent devenir des forces motrices essentielles. A la loi de Darcy classique se substitue la loi de Darcy généralisée qui tient compte de la variabilité de la masse volumique en fonction de la pression, de la température et de la salinité. On ne peut plus alors définir simplement une charge hydraulique dont dériveraient (au sens mathématique) les vitesses d'écoulement. L'existence de gradients de densité dans la nappe provoque l'apparition d'une composante rotationnelle de la vitesse (d'origine thermique et/ou saline) qui se superpose au mouvement de translation habituel.

Dans ce cas, de plus, la cartographie classique sous forme de courbes isovaleurs (isopièzes) tracées à partir des mesures directes de niveau d'eau dans les piézomètres n'est plus un système de représentation approprié pour déduire des directions d'écoulement (il n'y a plus d'orthogonalité) et ces directions d'écoulement peuvent être parfois très différentes de la direction des gradients piézométriques.

Dans une première partie de cette note, on présente donc les concepts qui peuvent être introduits pour traiter les problèmes densitaires, en particulier le concept de charge d'eau douce équivalente. Une deuxième partie expose le mode de calcul de la vitesse de Darcy à partir de ces concepts.

La troisième partie est une application à l'aquifère thermal de Dax, caractérisé par des remontées d'eau thermominérale dont la température dépasse parfois 60 ° C, des méthodes décrites; on calcule, à partir des mesures faites en puits "chauds" (en exploitation) ou "froids" (en équilibre thermique avec l'encaissant) des charges d'eau douce équivalentes afin de pouvoir intégrer le contexte hydrodynamique local "chaud" dans la problématique des écoulements régionaux ("froids") et dans l'optique d'une modélisation classique de ceux-ci (c'est à dire sans couplage densitaire).



## 1. CARACTÉRISTIQUES DES PHÉNOMÈNES DENSITAIRES. CONCEPTS ET RELATIONS

### 1.1. INFLUENCE DES EFFETS DENSITAIRES SUR LES NAPPES

#### 1.1.1. Notations

$p$  est la pression ( en Pa ) :  $p = p(x,y,z,t)$

$C$  est la salinité (en  $\text{kg/m}^3$ ) :  $C = C(x,y,z,t)$

$T$  est la température (en  $^{\circ}\text{C}$ ) :  $T = T(x,y,z,t)$

$\rho$  est la masse volumique du fluide (en  $\text{kg/m}^3$ ) :  $\rho = \rho(p, C, T)$

$\mu$  est la viscosité dynamique du fluide, (en  $\text{kg/m.s}$  ou en  $\text{Pa.s}$ ) :  $\mu = \mu(T,C)$

$g$  est l'accélération de la pesanteur :  $g = 9.807 \text{ m/s}^2$

$K$  est la perméabilité, en  $\text{m/s}$  (de façon générale un tenseur, noté  $\bar{K}$ )

$k$  est la perméabilité intrinsèque, en  $\text{m}^2$  (de façon générale un tenseur, noté  $\bar{k}$ )

La perméabilité intrinsèque  $k$  est caractéristique du milieu poreux et indépendante du fluide. Elle est parfois exprimée en Darcy:  $1 \text{ Darcy} = 0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ .

La relation entre  $K$  et  $k$  est : 
$$K = \frac{\rho(p, C, T) \cdot g \cdot k}{\mu(T, C)}$$

La perméabilité  $K$  dépend donc des conditions de température et de salinité par l'intermédiaire de la masse volumique et de la viscosité (celle-ci étant divisée par 2 en passant de  $15^{\circ}\text{C}$  à  $50^{\circ}\text{C}$ ).

Le tableau ci-dessous fournit les valeurs de  $\rho$  et  $\mu$  pour de l'eau pure ( $C=0$ ) à pression atmosphérique, et pour quelques valeurs de température :

Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\mu$ ( $\text{Pa.s}$ )
10 $^{\circ}$	999.688	$1.309 \cdot 10^{-3}$
15 $^{\circ}$	999.100	$1.143 \cdot 10^{-3}$
20 $^{\circ}$	998.216	$1.008 \cdot 10^{-3}$
25 $^{\circ}$	997.065	$0.896 \cdot 10^{-3}$
50 $^{\circ}$	988.049	$0.543 \cdot 10^{-3}$
80 $^{\circ}$	971.818	$0.338 \cdot 10^{-3}$

La viscosité en fonction de la température a été calculée à l'aide de la formule suivante (réf. 1) :

$$\mu = \frac{1.78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0377T + 0.000221T^2} \rho(P, T, C) \quad (\text{en Pa.s})$$

La masse volumique a été calculée avec la formule (2) présentée au § 2.1.2.

**1.1.2. Condition d'existence d'un potentiel hydraulique**

Lorsque la masse volumique du fluide est supposée invariable, on définit, par rapport à un plan de référence donné, la charge (ou potentiel) hydraulique  $H (= H(x,y,z,t))$  par :

$$H = \frac{p}{\rho g} + z$$

La charge  $H$  ainsi définie est effectivement un potentiel (au sens mathématique et physique) du terme duquel dérive la vitesse de Darcy :

$$\vec{V} = -\bar{K} \vec{\text{grad}} H \quad \text{[LD]}$$

Pour tenir compte d'une variabilité de la masse volumique, et tenter de conserver cette notion de potentiel, Hubert (1940) a introduit la grandeur suivante, dans laquelle la masse volumique est supposée uniquement fonction de la pression  $p$  (Annexe 1):

$$\Phi^* = g \int_{z_0}^z dz + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho(p)} \quad (\text{énergie par unité de masse})$$

Une condition pour que cette grandeur soit effectivement un potentiel duquel dériverait une vitesse est que le rotationnel de son gradient soit nul.(cf annexe). Or cela n'est vérifié que :

- 1) si la pression  $p$  est constante
- 2) ou si la masse volumique est constante
- 3) ou si les surfaces d'égale pression sont parallèles aux surfaces d'égale densité.

Hors ces trois conditions, et a fortiori lorsque  $\rho = \rho(p, c, T)$  et non plus seulement  $\rho = \rho(p)$  on ne peut plus définir une vitesse telle que :  $\vec{V} = -\bar{K} \vec{\text{grad}} \Phi^*$

L'expression générale de la vitesse de Darcy est alors :

$$\vec{V} = -\frac{\bar{K}}{\mu} \left( \vec{\text{grad}} p + \rho \cdot g \cdot \vec{\text{grad}} z \right) \quad \text{[LDG]}$$

Pour trouver néanmoins une formulation de la vitesse analogue à la loi de Darcy [LD] et résoudre les problèmes liés aux nappes salées, Luszczynski (1960), puis De Wiest (1969), ont introduit différents concepts de charge.

Ces concepts peuvent également être étendus aux écoulements souterrains influencés par des gradients thermiques.

**1.2. CHARGE ÉQUIVALENTE**

**1.2.1 Définitions**

- $p_i$  est la pression au point de mesure  $i$  dans la nappe ;
  - $\rho_i$  est la masse volumique de l'eau au point  $i$  ;
  - $z_i$  est la cote du point de mesure  $i$  par rapport au plan de référence (niveau de la mer)
- La pression de référence est la pression atmosphérique prise égale à 0.

L'axe des z est orienté vers le haut.

On peut définir (N.J. Lusczynski, 1961 - R.J.M. De Wiest, 1969) :

- Une **charge ponctuelle**  $H_{pi}$  : ("point water head")

$$H_{pi} = \frac{P_i}{\rho_i g} + z_i \quad H_{pi} = h_i + z_i \quad \text{avec:} \quad h_i = \frac{P_i}{\rho_i g} \quad [H1]$$

Cette charge correspond au niveau d'eau (mesuré par rapport au plan de référence) dans un puits occupé par une colonne d'eau dont la salinité et la température sont celles du point i et dont la hauteur  $h_i$  équilibre la pression au point i :

$$P_i = \rho_i g (H_{pi} - z_i) \quad [P1]$$

$H_{pi}$  est la charge réelle, caractérisant l'énergie disponible au point de mesure ; c'est le niveau que l'on observerait dans un piézomètre en l'absence d'échange thermique avec l'encaissant.

La masse volumique  $\rho_i$  est la masse volumique correspondant aux conditions de pression, température et salinité au point de mesure.

- Une **charge d'eau douce équivalente**  $H_{di}$  ("fresh water head")

$$H_{di} = \frac{P_i}{\rho_d g} + z_i \quad H_{di} = h_{di} + z_i \quad \text{avec:} \quad h_{di} = \frac{P_i}{\rho_d g} \quad [H2]$$

Cette charge correspond au niveau d'eau qui serait mesurée (par rapport au plan de référence) dans un puits occupé par une colonne d'eau douce de masse volumique  $\rho_d$  constante dans le puits et dont la hauteur  $h_{di}$  équilibre la pression au point i (charge d'eau douce équivalente).

$$P_i = \rho_d g (H_{di} - z_i) \quad [P2]$$

La masse volumique  $\rho_d$  est une masse volumique de référence correspondant à une eau à pression atmosphérique, de salinité nulle et dont la température est celle d'une eau de surface, par exemple 15°C :  $\rho_d = \rho_d(p=0, C=0, T=15^\circ)$ .

### 1.2.2. Relations

- Des relations [P1] et [P2] on tire :

$$\boxed{H_{di} = \frac{\rho_i}{\rho_d} H_{pi} + \left(\frac{\rho_d - \rho_i}{\rho_d}\right) z_i} \quad [H3]$$

et inversement :

$$H_{pi} = \frac{\rho_d}{\rho_i} H_{di} - \left(\frac{\rho_d - \rho_i}{\rho_i}\right) z_i$$

- Entre charge ponctuelle et pression (en hauteur d'eau douce), on a les relations

$$\boxed{H_{pi} = \frac{\rho_d}{\rho_i} h_{di} + z_i} \quad [H4]$$

et inversement :

$$h_{di} = \frac{\rho_i}{\rho_d} (H_{pi} - z_i)$$

### 1.2.3. Terminologie

Dans la suite de ce travail, on désignera donc par:

- hauteur piézométrique (ou, par extension, piézométrie) la hauteur d'eau **effectivement mesurée** par rapport à un plan de référence en puits "froid" (en équilibre thermique avec l'encaissant) ou en puits "chaud" (exploité) ;
- charge ponctuelle (ou réelle) la charge **calculée**, en un point donné, suivant la relation [H1] ;
- charge d'eau douce équivalente la charge **calculée** suivant la relation [H2] ou [H3].

⊞

## 2. DES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES AUX CHARGES ÉQUIVALENTES

### 2.1. CONVERSION D'UNE MESURE PIÉZOMÉTRIQUE EN CHARGE D'EAU DOUCE ÉQUIVALENTE

Pour particulariser le problème, on considère un piézomètre permettant d'effectuer des mesures au toit d'un aquifère thermal. On désigne par  $z_{\text{toit}}$  la cote du point de mesure, où la pression est  $p_{\text{toit}}$ , la température  $T_{\text{toit}}$  et la salinité  $C_{\text{toit}}$  (figure 1). La colonne d'eau dans ce piézomètre est supposée en équilibre thermique avec l'encaissant.

Soit  $z_{\text{obs}}$  la mesure de niveau effectuée dans le piézomètre. Le problème consiste à passer de la mesure  $z_{\text{obs}}$  à la hauteur équivalente  $H_d$  calculée avec une masse volumique de référence  $\rho_d$  :

$$H_d = \frac{p_{\text{toit}}}{\rho_d g} + z_{\text{toit}}$$

Il faut donc préalablement calculer la pression au toit de la nappe  $p_{\text{toit}}$ .

#### 2.1.1. Calcul de la pression au toit de la nappe

Lorsque la colonne d'eau dans le piézomètre présente, entre le fond et la surface, une stratification thermique et chimique, la pression au toit de la nappe doit être calculée en tenant compte de la variation de la masse volumique en fonction des profils de température et de salinité. Il s'agit donc d'une sommation exprimée par :

$$p_{\text{toit}} = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot g \cdot dz = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(p(z), T(z), C(z)) \cdot g \cdot dz$$

#### 1) Données nécessaires

##### • Géométrie

- Profondeur du toit de l'aquifère  $Pr_{\text{toit}}$  (ou bien la cote  $z_{\text{toit}}$  par rapport au plan de référence)
- Profondeur du niveau d'eau  $Pr_{\text{niv}}$  observé dans le forage (ou bien la cote  $z_{\text{obs}}$ )

On en déduit la hauteur de la colonne d'eau observée au dessus du toit

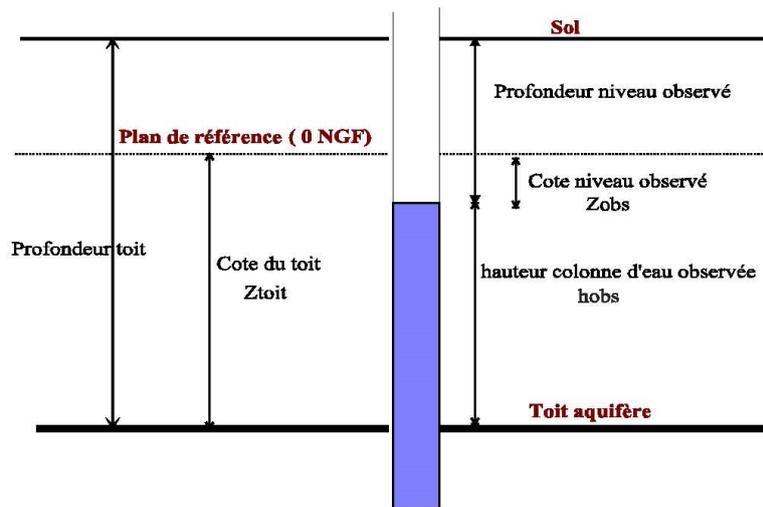
$$h_{\text{obs}} = Pr_{\text{toit}} - Pr_{\text{niv}} = z_{\text{toit}} - z_{\text{obs}}$$

##### • Température

- Température au toit de l'aquifère ( $T_{\text{toit}}$ )
- Température de surface ( $T_{\text{surf}}$ )

En l'absence de données sur le profil thermique dans la colonne, on peut admettre une variation linéaire de la température le long de la colonne entre  $T_{\text{toit}}$  et  $T_{\text{surf}}$  :

$$T(z) = \frac{T_{\text{toit}} - T_{\text{surf}}}{z_{\text{toit}} - z_{\text{obs}}} (z - z_{\text{obs}}) + T_{\text{surf}}$$



$Z_{\text{toit}}$ , cote du toit de la nappe captive  
 $Z_{\text{obs}}$ , cote mesurée de la surface libre de la colonne d'eau  
 $h_{\text{obs}}$  hauteur de la colonne d'eau observée  
 $h_{\text{equ}}$  hauteur de la colonne d'eau équivalente  
 $T(z)$  température à la cote  $z$   
 $C(z)$  salinité à la cote  $z$   
 $\rho(z)$  masse volumique à la cote  $z$ , variable en fonction de  $T(z)$ ,  $p(z)$  et  $C(z)$   
 $\rho_4$  masse volumique constante de la colonne d'eau équivalente

Figure 1 - Schéma précisant les notations utilisées

•Salinité

S'il n'y a pas de données sur le profil de salinité, on prendra une valeur constante sur toute la hauteur du tubage, égale à celle mesurée ponctuellement (ou bien une valeur moyenne s'il y a quelques mesures).

2) Calcul de l'intégrale

On subdivise la colonne d'eau en n tronçons de hauteur  $\Delta z_i$  ( $i = 1, n$ ) à chacun desquels on affecte la température  $T_i$ , la salinité  $C_i$  et la pression  $p_i$  mesurée à la cote moyenne  $z_i$  du tronçon :

$$\text{Int}(\rho) = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z). dz = \sum_{i=1}^n \rho(T_i, C_i, p_i) \Delta z_i$$

Les formules disponibles pour le calcul de la masse volumique en fonction de la pression de la température et de la salinité sont présentées au paragraphe suivant.

**Remarque :** en principe, pour calculer la masse volumique à une cote donnée, il faut y connaître la pression, elle même fonction de la masse volumique, inconnue. Le calcul devrait donc être itératif. En fait, la dilatabilité de l'eau étant prépondérante sur la compressibilité (en termes de variation par rapport à un état donné, cf § 2.3.3), on peut prendre comme approximation de la pression celle qui équivaut à la hauteur de la colonne au dessus de la cote considérée, sans que cela ne nuise vraiment à la précision des calculs.

3) Masse volumique moyenne de la colonne d'eau équivalente :

$$\rho_m = \frac{1}{z_{\text{obs}} - z_{\text{toit}}} \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z). dz$$

Cette relation est exploitée au §2.1.4

**2.1.2. Formules de calcul de la masse volumique en fonction de la pression, de la température et de la salinité.**

Deux formules sont disponibles pour le calcul de la masse volumique :

- l'une établie par le BRGM et décrite en détail dans le rapport BRGM 76 SGN 482 AME (*Essais et mise en production des aquifères profonds*) ;
- l'autre utilisée par GDF et mise au point par A.M. Rowe et J.C.S. Chou (*Pressure-Volume-Temperature-Concentration Relation of Aqueous NaCl Solutions - Journal of Chemical and Engineering Data - Vol.15 n° 1 1970*).

Ces deux formules ont fait l'objet d'une comparaison poussée par P. Lachassagne (note de calcul interne BRGM). Les différences sont généralement faibles mais peuvent être sensibles pour certaines gammes de température et de pression.

On présente en annexe 2 quelques exemples de courbes de variation de la masse volumique calculées avec l'une et l'autre de ces deux formules. L'un de ces exemples montre un écart sensible pour des températures inférieures à 10 °C sous une pression de 100 atm. et pour une salinité nulle (écart relatif de 0.03% à 10°C, de 0.2% à 2°C)

1) Formule BRGM

La masse volumique, exprimée en g/cm<sup>3</sup>, est calculée par le produit de 3 fonctions, l'une correspondant à une correction de température, la deuxième à une correction de température et salinité, la troisième à une correction de température et pression:

$$\rho(p, T, C) = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3$$

Dans cette formule :

p est la pression exprimée en m de colonne d'eau douce (de densité égale à 1)  
 T est la température, en °C  
 C est la salinité, en g/l

- *Correction de température seule*

$$r_1 = 0.999973(1 - d_1 \cdot d_2 \cdot d_3)$$

avec :

$$d_1 = (350 - T)/(365 - T)$$

$$d_2 = (T + 273)/(T + 67)$$

$$d_3 = ((T - 3.982)^2)/466700$$

Cette correction est supposée applicable pour des températures comprises entre 17°C et 102°C (Vandenbeusch, réf.6). Une variante est proposée pour des températures inférieures à 17°C mais donne des résultats très similaires. Les écarts avec la formule GDF pour les faibles températures pourraient résulter d'une mauvaise adaptation de l'expression ci-dessus aux faibles températures.

- *Correction de température-salinité*

$$r_2 = 1 + C/(d_1 + d_2 \cdot C)$$

avec :

$$d_1 = 1341.3 + 6.419T - 9.36610^{-2} T^2 + 3.368 10^{-4} T^3$$

$$d_2 = 0.5677 - 9.7993310^{-3} T + 1.33210^{-4} T^2 - 5.1626710^{-7} T^3$$

- *Correction de température-pression*

$$r_3 = 1/(1 + d_3)$$

avec :

$$d_3 = -9.678410^{-7} p \cdot d_1 (88620/(19560 + p) + d_2)$$

$$d_1 = 1 + (0.739 - 1.1910^{-4} p) \times \exp(-T/(3.9 + 1.3210^{-3} p))$$

$$d_2 = (1.804 10^{-4} + 1.981 10^{-9} p)(T - 55.5 + 2.5710^{-3} p)^2$$

2) Formule de Rowe et Chou

La formule de Rowe et Chou (réf. 5), établie pour des solutions de NaCl et ajustée sur des données validées par la 3<sup>ème</sup> "International Conference on Steam Tables", fournit le volume spécifique du fluide (en cm<sup>3</sup>/g):

$$\Omega(p, T, C) = \alpha(T) - p \cdot \beta(T) - p^2 \cdot \gamma(T) + C \cdot \delta(T) + C^2 \cdot \varepsilon(T) - C \cdot p \cdot X(T) - C^2 \cdot p \cdot \lambda(T) - \frac{C \cdot p^2 \cdot \eta(T)}{2}$$

La masse volumique est alors:

$$\rho(p, T, C) = \frac{1}{\Omega} \quad \text{en g/cm}^3$$

p est la pression exprimée dans cette formule en  $\text{kgf.cm}^{-2}$  (et non en m de hauteur d'eau)

S est la salinité en kg NaCl / kg de solution (et non en g/l)

T est la température absolue en °K (et non en °C)

Les différentes fonctions de la température sont :

$$\alpha(T) = a(1,1) + a(1,2).T + a(1,3).T^2 + a(1,4)/T + a(1,5)/T^2$$

$$\beta(T) = a(2,1) + a(2,2).T + a(2,3).T^2 + a(2,4)/T + a(2,5)/T^2$$

$$\gamma(T) = a(3,1) + a(3,2).T$$

$$\delta(T) = a(4,1) + a(4,2).T + a(4,3).T^2$$

$$\varepsilon(T) = a(5,1) + a(5,2).T + a(5,3).T^2$$

$$X(T) = a(6,1) + a(6,2).T + a(6,3).T^2$$

$$\lambda(T) = a(7,1) + a(7,2).T + a(7,3).T^2$$

$$\eta(T) = a(8,1) + a(8,2).T + a(8,3).T^2$$

les coefficients  $a(i,j)$  sont donnés dans le tableau ci-dessous.

i	J	1	2	3	4	5
1		5.916365	-1.035794E-2	9.270048E-6	-1.127522E3	1.006741E5
2		5.204914E-3	-1.0482101E-5	8.328532E-9	-1.1702939	1.022783E2
3		1.18547E-8	-6.599143E-11			
4		-2.5166	1.11766E-2	-1.70552E-5		
5		2.84851	-1.54305E-2	2.23982E-5		
6		-1.4814 <sup>E-3</sup>	8.2969E-6	-1.2469E-8		
7		2.7141 <sup>E-3</sup>	-1.5391E-5	2.2655E-8		
8		6.2158 <sup>E-7</sup>	-4.0075E-9	6.5972E-12		

Le domaine de validité de la formule de Rowe et Chou est :

Température de 0 à 175°C

Salinité de 0 à 0.25 kg NaCl / kg de solution

Pression jusqu'à 350  $\text{kgf/cm}^2$  (soit  $3.43 \cdot 10^7$  Pa)

### 3) Rappels

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 101306 \text{ Pa} = 10.33 \text{ m d'eau}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ m d'eau} = 9.807 \cdot 10^3 \text{ Pa} = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$$

Les conversions sont faites avec une densité de l'eau égale à 1.

### 2.1.3 Compressibilité et dilatabilité

En terme de variation par rapport à un état donné, la dilatabilité de l'eau joue un rôle beaucoup plus important que sa compressibilité. En effet, à partir de l'équation d'état d'un fluide :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \beta dP - \alpha dT$$

où

$\beta$  est le coefficient de compressibilité à température constante (en  $\text{Pa}^{-1}$ ) :  $\beta = 4.591 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  à  $20^\circ \text{C}$

$\alpha$  est le coefficient de dilatation volumique à pression constante (en  $\text{K}^{-1}$ ) :  $\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  à  $20^\circ \text{C}$

on peut écrire, au voisinage d'un état de référence  $\rho_0(P_0, T_0)$  :

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 [\beta(P - P_0) - \alpha(T - T_0)]$$

Ainsi, au voisinage de  $20^\circ$ , pour une variation de pression de  $10^4 \text{ Pa}$  (1 m d'eau), on aura une variation relative de masse volumique:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \beta\Delta P = 4.59 \cdot 10^{-10} \times 10^4 \approx 4.610^{-6}$$

alors que pour une variation de température de  $1^\circ$ , on aura :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -\alpha\Delta T = 2 \cdot 10^{-4}$$

c'est à dire une influence de la dilatabilité 40 fois plus importante que la compressibilité.

### 2.1.4 Calcul de la charge d'eau douce en fonction de la piézométrie observée.

La hauteur  $h_d$  de la colonne d'eau "douce" de masse volumique constante  $\rho_d$ , qui exerce la même pression (au toit de la nappe captée) que la colonne observée dont la masse volumique varie de la base de la colonne (le toit de la nappe captée) à la surface libre, de cote  $z_{\text{obs}}$ , est telle que:

$$\rho_d \cdot g \cdot h_d = p_{\text{toit}} = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot g \cdot dz = \rho_m \cdot g \cdot (z_{\text{obs}} - z_{\text{toit}}) = \rho_m \cdot g \cdot h_{\text{obs}}$$

D'où :

$$h_d = \frac{1}{\rho_d} \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot dz = \frac{\rho_m}{\rho_d} h_{\text{obs}}$$

La charge d'eau douce équivalente au toit de la nappe est alors :

$$H_d = z_{\text{toit}} + \frac{1}{\rho_d} \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot dz$$

ou encore, en introduisant la masse volumique moyenne  $\rho_m$  (cf § 2.2.2)

$$H_d = Z_{\text{toit}} + \frac{\rho_m}{\rho_d} h_{\text{obs}} = Z_{\text{toit}} + \frac{\rho_m}{\rho_d} (Z_{\text{obs}} - Z_{\text{toit}})$$

soit,  $Z_{\text{obs}}$  n'étant autre que la hauteur piézométrique  $H_{\text{obs}}$  par rapport au plan de référence:

$$H_d = \frac{\rho_m}{\rho_d} H_{\text{obs}} + (1 - \frac{\rho_m}{\rho_d}) Z_{\text{toit}} \quad \text{[HD1]}$$

ou encore, connaissant la hauteur de la colonne d'eau dans le piézomètre ( $h_{\text{obs}} = Pr_{\text{tot}} - Pr_{\text{niv}}$ ) et la piézométrie observée  $H_{\text{obs}}$  ( $H_{\text{obs}} = Z_{\text{obs}}$ ):

$$\begin{aligned} H_d &= h_d + (H_{\text{obs}} - h_{\text{obs}}) \\ h_d &= \frac{\text{Int}(\rho)}{\rho_d} \end{aligned} \quad \text{[HD2]}$$

## 2. VITESSE DE DARCY EN FONCTION DE LA CHARGE D'EAU DOUCE ÉQUIVALENTE

La vitesse de Darcy généralisée est donnée par :

$$V(x, y, z) = -\frac{\bar{k}}{\mu(T)} \left( \vec{\text{grad}} p(x, y, z) + \rho(p, T, C) \cdot \vec{g} \cdot \text{grad } z \right)$$

En définissant la perméabilité par :  $\bar{K} = \frac{\bar{k} \rho_d g}{\mu(T)}$

et en introduisant le concept de charge d'eau douce équivalente les composantes de la vitesse suivant les axes de coordonnées (en supposant que les directions principales du tenseur de perméabilité sont parallèles aux axes) sont données par (cf annexe 1) :

$$\begin{aligned} V_x &= -K_x \frac{\partial H_d}{\partial x} \\ V_y &= -K_y \frac{\partial H_d}{\partial y} \\ V_z &= -K_z \frac{\partial H_d}{\partial z} - \frac{\rho(p, T, C) - \rho_d}{\rho_d} K_z \end{aligned}$$

$$H_d = \frac{P}{\rho_d g} + z$$

Il suffit donc de convertir, à l'aide des relations [HD1] ou [HD2] ci-dessus, les hauteurs piézométriques observées en charges d'eau douce pour obtenir les composantes de la vitesse de Darcy exprimées suivant une formulation en charge similaire, au moins dans un plan horizontal, à la formulation classique.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Nouvelle Aquitaine**

Parc technologique Europarc  
24, avenue Leonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05-57-26-52-70